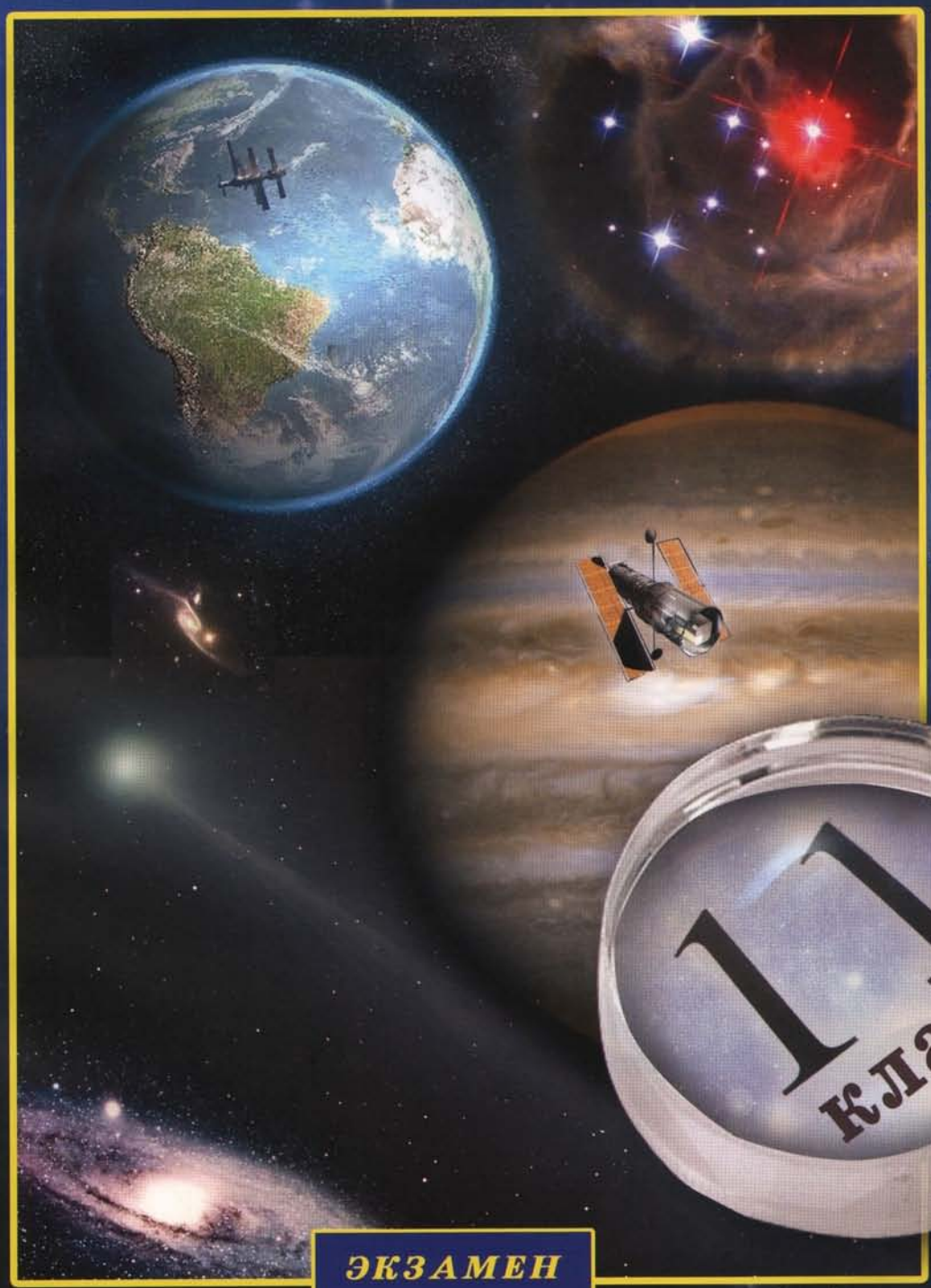
В.А. Касьянов

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ АТЛАС ПО ФИЗИКЕ



11 класс

ЭКЗАМЕН

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ И ЛУНЫ

Тело Солнечной системы	☿ МЕРКУРИЙ MERCURY	♀ ВЕНЕРА VENUS	⊕ ЗЕМЛЯ EARTH	♂ МАРС MARS	☾ ЛУНА LUNA
Фотография					
Масса (в массах Земли, $m_\oplus$)	0,06	0,82	1,0 $m_\oplus = 6 \cdot 10^{24}$ кг	0,11	0,012
Радиус (в радиусах Земли, $R_\oplus$)	0,38	0,95	1,0 $R_\oplus = 6378$ км	0,53	0,27
Средняя плотность, 10^3 кг/м^3	5,43	5,24	5, 52	3,93	3,34
Среднее расстояние от Солнца, а.е.	0,387	0,723	1,00	1,52	-
Среднее расстояние от Солнца, млн. км	58	108	150	228	-
Звездный период обращения вокруг Солнца, годы	0, 241 (87,9 д)	0, 615 (225 д)	1, 00	1,881	-
Средняя орбитальная скорость, км/с	47,9	35,0	29,79	24,1	1,02
Звездный период вращения вокруг оси	58,6 д	243 д	23,93 ч	24,6 ч	27,3 д
g, м/с^2	3,7	8,9	9,8	3,7	1,67
v_{II}, км/с	4,2	10,4	11,2	5,0	2,38
Температура поверхности, К	700 (днем) 100 (ночью)	740	290	240	400 (днем) 100 (ночью)
Наклон оси плоскости орбиты	90°	– 87°	66,5°	65°	83,3°
Число спутников (на 2008 г.)	0	0	1	2	-
Состав атмосферы	Практически отсутствует ($p \approx 10^{-14}$ атм)	CO_2 (96%) N_2 (3,5%)	N_2 (77%) O_2 (21%) Ar (1%)	CO_2 (95%) N_2 (2,7%) Ar (1,6%)	Практически отсутствует ($p \approx 10^{-14}$ атм)

В.А. Касьянов

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ АТЛАС по ФИЗИКЕ

Рекомендовано
Российской Академией
Образования

Издательство
ЭКЗАМЕН
Москва

УДК 373:53(083.4)
ББК 22.3я72
К28

. **Касьянов, В.А.**
К28 Иллюстрированный Атлас по физике: 11 класс / В.А. Касьянов. — М.: Издательство «Экзамен», 2010. — 191, [1] с.

ISBN 978-5-377-02835-2

«Иллюстрированный Атлас по физике» — уникальное учебное пособие, не имеющее аналогов в мировой и отечественной учебной литературе, сочетающее достоинства интересного, доказательного учебника и красочного альбома наглядных иллюстраций, помогающих глубже понять суть физических явлений и легче запомнить их взаимосвязи.

«Иллюстрированный Атлас по физике» может использоваться как основное учебное пособие для изучения физики на базовом уровне. Простота и лаконичность изложения курса физики 10–11 классов делает «Иллюстрированный Атлас по физике» незаменимым при подготовке к контрольным работам, экзаменам и ЕГЭ.

«Иллюстрированный Атлас по физике. 11 класс» содержит следующие разделы: Электродинамика (постоянный ток, магнитное поле, электромагнетизм), Электромагнитное излучение (излучение радио- и СВЧ-диапазона, геометрическая и волновая оптика, квантовая теория излучения), Физика высоких энергий (физика атомного ядра, элементарные частицы), Эволюция Вселенной.

УДК 373:53(083.4)
ББК 22.3я72

Формат 60x90/8. Гарнитура «Школьная». Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 7,68.
Усл. печ. л. 24. Тираж 10 000 экз. Заказ № 16927.

ISBN 978-5-377-02835-2

© Касьянов В.А, 2010
© Издательство «***ЭКЗАМЕН***», 2010

Оглавление

Введение 5

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 1. Постоянный электрический ток

§1. Электрический ток. Сила тока 6
§2. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи). Сопротивление 8
§3. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры 10
§4. Электрический ток в полупроводнике 12
§5. Электрический ток в вакууме и газах 14
§6. Соединение проводников 16
§7. ЭДС. Закон Ома для замкнутой цепи 18
§8. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля-Ленца 20

Глава 2. Магнитное поле

§9. Магнитное взаимодействие 22
§10. Магнитное поле электрического тока 24
§11. Линии магнитной индукции 26
§12. Действие магнитного поля на проводник с током 28
§13. Рамка с током в однородном магнитном поле 30
§14. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы 32
§15. Масс-спектрограф. Циклотрон 34
§16. Пространственные траектории заряженных частиц в магнитном поле 36
§17. Взаимодействие электрических токов 38
§18. Магнитный поток. Энергия магнитного поля тока 40
§19. Магнитное поле в веществе. Диа- и парамагнетизм 42
§20. Ферромагнетики 44

Глава 3. Электромагнетизм

§21. ЭДС индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле 46
§22. Опыты Фарадея с катушками 48
§23. Опыты Генри 50
§24. Трансформатор. Электромагнитная индукция в современной технике 52
§25. Передача и распределение электроэнергии 54

Глава 4. Цепи переменного тока

§26. Векторные диаграммы для описания переменных токов и напряжений 56
§27. Резистор, конденсатор, катушка индуктивности в цепи переменного тока 58
§28. Свободные гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре 60
§29. Колебательный контур в цепи переменного тока 62
§30. Полупроводниковый диод 64
§31. Транзистор 66

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Глава 5. Излучение и прием электромагнитных волн радио- и СВЧ-диапазона

§32. Излучение электромагнитных волн 68
§33. Распространение электромагнитных волн 70
§34. Импульс, давление электромагнитных волн 72
§35.Спектр электромагнитных волн 74
§36. Виды радиосвязи 76
§37. Радиолокация 78
§38. Радиопередача 80
§39. Радиоприем 82

Глава 6. Геометрическая оптика

§40. Принцип Гюйгенса. Отражение волн 84
§41. Изображение предмета в плоском зеркале 86
§42. Преломление света 88
§43. Полное внутреннее отражение 90
§44. Дисперсия света 92

Оглавление

§45. Линзы ... 94
§46. Собирающая линза. Ход лучей ... 96
§47. Изображение предмета в собирающей линзе ... 98
§48. Рассеивающая линза ... 100
§49. Человеческий глаз как оптическая система ... 102
§50. Оптические приборы ... 104

Глава 7. Волновая оптика
§51. Интерференция волн ... 106
§52. Пространственная интерференционная картина ... 108
§53. Опыт Юнга. Получение когерентных источников ... 110
§54. Дифракция света ... 112
§55. Дифракция света на щели ... 114
§56. Дифракционная решетка ... 116

Глава 8. Квантовая теория электромагнитного излучения и вещества
§57. Тепловое излучение ... 118
§58. Фотоэффект ... 120
§59. Корпускулярно-волновой дуализм ... 122
§60. Волновые свойства частиц ... 124
§61. Планетарная модель атома. Опыт Резерфорда ... 126
§62. Атом водорода (теория Бора) ... 128
§63. Излучение и поглощение света атомом ... 130
§64. Лазер ... 132
§65. Рентгеновская трубка ... 134

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Глава 9. Физика атомного ядра
§66. Состав и размеры ядра ... 136
§67. Энергия связи нуклонов в ядре ... 138
§68. Естественная радиоактивность ... 140
§69. Закон радиоактивного распада ... 142
§70. Цепная ядерная реакция ... 144
§71. Ядерный реактор ... 146
§72. Атомная электростанция ... 148
§73. Термоядерный синтез. Биологическое действие радиоактивного излучения ... 150

Глава 10. Элементарные частицы
§74. Классификация элементарных частиц ... 152
§75. Лептоны и адроны ... 154
§76. Кварки ... 156
§77. Фундаментальные частицы ... 158

Глава 11. Эволюция Вселенной
§78. Астрономические структуры ... 160
§79. Закон Хаббла ... 162
§80. Модель Фридмана ... 164
§81. Периоды эволюции Вселенной ... 166
§82. Ранняя Вселенная ... 168
§83. Первичный нуклеосинтез ... 170
§84. Реликтовое излучение ... 172
§85. Образование астрономических структур ... 174
§86. Основные термоядерные реакции в звездах ... 176
§87. Эволюция звезд различной массы ... 178
§88. Образование Солнечной системы ... 180
§89. Планеты Солнечной системы ... 182

Приложение I. Астрономические структуры. Оптические иллюзии ... 184
Приложение II. Предметный указатель ... 188
Приложение III. Именной указатель ... 190

ВВЕДЕНИЕ

Достижения и прогресс современной технологической цивилизации базируются прежде всего на достижениях физики — науки, определившей возникновение и совершенствование машин и механизмов, источников энергии и излучения, средств связи и компьютерной техники.

Исследуя и формулируя наиболее общие и фундаментальные закономерности в природе, физика смогла объяснить и описать количественно множество природных явлений.

Главная цель настоящего издания — представить физику ***интересной, наглядной, легко запоминающейся и аргументированной.***

Отличительная особенность **«Иллюстрированного атласа по физике»** — наглядное представление физических явлений и принципа действия современных технических устройств с кратким объяснением физических законов, лежащих в их основе.

Иллюстративный материал помогает глубже понять и легче запомнить суть физического явления.

Доказательность, аргументированность изложения базируется на простых математических методах и легко запоминающихся качественных оценках.

В **«Иллюстрированном атласе по физике»** приведены таблицы основных физических величин, их единиц, диапазон их изменения, значения фундаментальных физических констант, 3-D-карты астрономических структур.

Простота и лаконичность изложения курса физики 10–11 классов позволяет продуктивно использовать **«Иллюстрированный атлас по физике»** *для подготовки к экзаменам и зачетам, а также как учебное пособие для изучения физики как на базовом, так и на профильном уровне.* Заголовки тем, изучаемых на профильном уровне, выделены красным цветом.

Особенно эффективно использование ***«Иллюстрированного атласа по физике»*** *при подготовке к ЕГЭ.*

§1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА ТОКА

Перенос энергии электромагнитного поля в пространстве происходит при направленном движении электрических зарядов. В проводнике концентрация свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объему проводника, наибольшая. Поэтому для передачи энергии электромагнитного поля из одной точки пространства в другую используют металлические проводники подобно тому, как для транспортировки воды применяют трубы. В отсутствие внешнего электрического поля ($\vec{E} = 0$), тепловое движение зарядов (показанное на рисунке ① серыми линиями) является хаотическим. Так движутся, например, положительные и отрицательные ионы в электролитах, электроны в металлических проводниках. После нескольких столкновений с другими частицами заряженные частицы могут вернуться практически к первоначальному положению. Поэтому направленное движение свободных зарядов в проводнике возможно под действием электрического поля.

Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

В проводнике, помещенном в электрическое поле ($\vec{E} \neq 0$) происходит наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое. В результате действия на заряды внешней кулоновской силы положительный заряд, притягиваясь к отрицательному полюсу и отталкиваясь от положительного, приобретает составляющую скорости v_+ вдоль напряженности электрического поля, или ***направленную скорость***. За промежуток времени t положительный заряд «дрейфует» на расстояние $l_+ = v_+ t$ в направлении напряженности электрического поля (черная линия на рисунке). Отрицательный заряд смещается со скоростью «дрейфа» v_- в направлении, противоположном напряженности электрического поля на расстояние $l_- = v_- t$ ②.

За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц. Направление тока совпадает с направлением напряженности электрического поля ③.

В металлах, где носителями тока являются свободные, отрицательно заряженные электроны, направление тока считается противоположным направлению их скорости направленного движения. Интенсивность направленного движения заряженных частиц в проводнике характеризует величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с, или сила тока.

Сила тока — производная по времени от заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени t ④: $I = q'$

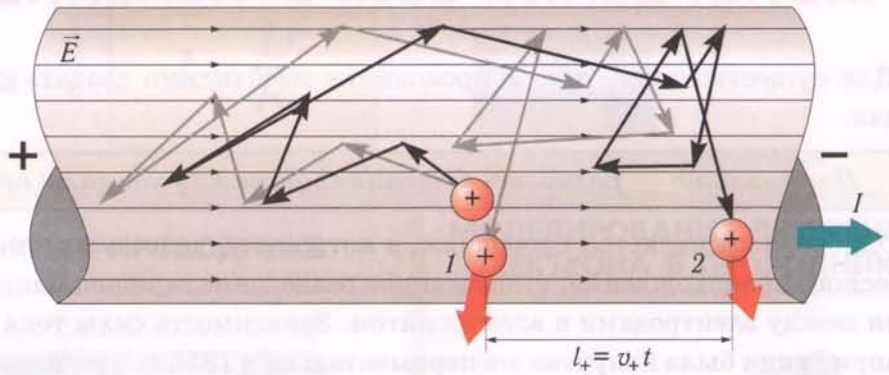
Единица силы тока (основная единица СИ) — *ампер* (1 А): 1 А = 1 Кл/с.

При расчете силы тока учтем, что за время t сквозь сечение проводника пройдут только заряды, движущиеся со скоростью v сонаправленно с напряженностью внешнего электрического поля, которые находятся внутри цилиндра сечением S с образующей $l = vt$. Зная концентрацию n заряженных частиц, можно найти число заряженных частиц в этом объеме: $N = nSvt$, и определить их заряд: $q = q_0 nSvt$, где q_0 — заряд одной частицы. Тогда сила тока $I = q' = q_0 nSv$. Если $v = const$, то $I = const$.

Постоянный ток — ток, сила которого не изменяется с течением времени.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ПРОВОДНИКЕ

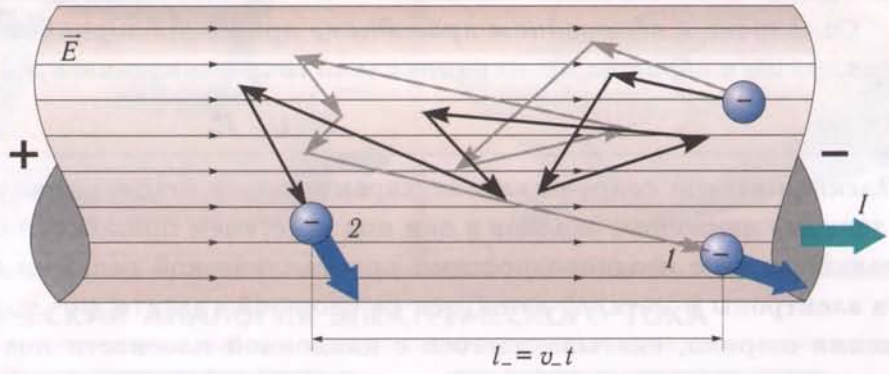
①



$\vec{E} = 0$

$\vec{E} \neq 0$

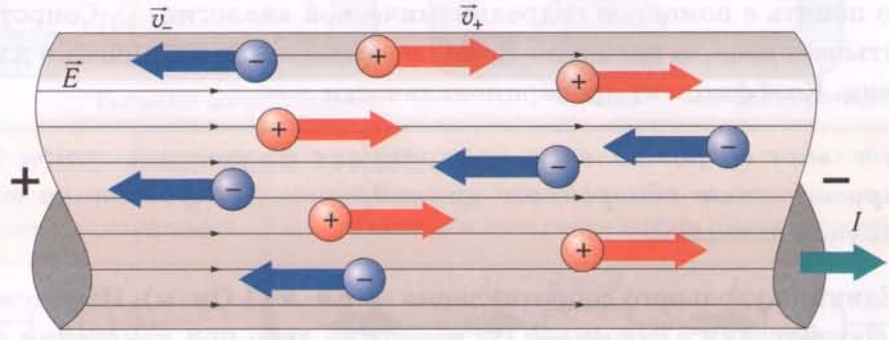
②



В электрическом поле упорядоченное движение зарядов накладывается на хаотическое тепловое движение

НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА

③

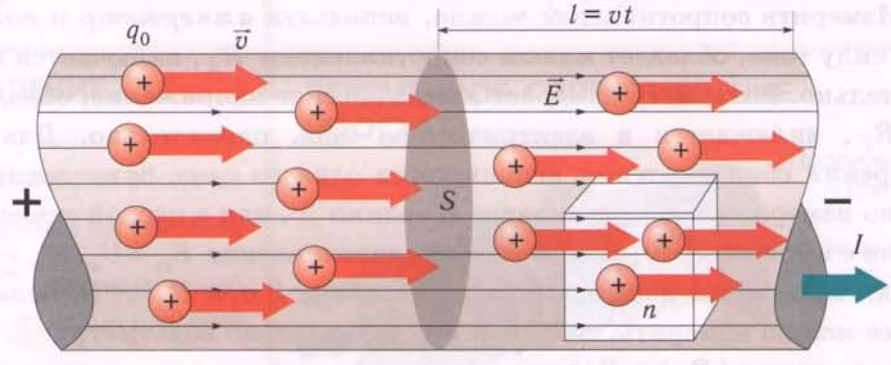


Направление тока в проводнике – направление движения положительно заряженных частиц

СИЛА ТОКА

④

$$I = q' = q_0 n v S$$



$q = q_0 n v S t$

Единица объема

§2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПРОВОДНИКА (УЧАСТКА ЦЕПИ). СОПРОТИВЛЕНИЕ

Для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

Напряжение — разность потенциалов между концами однородного проводника.

Однородным является проводник, в котором не действуют сторонние силы — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов, например, за счет химической реакции между электродами и электролитом. Зависимость силы тока для однородного проводника от напряжения была получена экспериментально в 1826 г. немецким ученым ***Георгом Омом*** ①:

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = U / R. \qquad (1)$$

Электрическое сопротивление характеризует степень противодействия проводника направленному движению зарядов в нем под действием приложенной разности потенциалов. Из-за столкновений с неоднородностями кристаллической решетки или примесями другого элемента электроны в металле движутся по сложной траектории ②. Она напоминает траекторию движения шарика, скатывающегося с наклонной плоскости под действием силы тяжести и сталкивающегося с выступающими цилиндрическими штырями ③.

Зависимость сопротивления проводника от его длины l и площади поперечного сечения S:

$$R = \rho l / S, \qquad (2)$$

легко понять с помощью гидродинамической аналогии ④. Сопротивление движению, которое испытывает вода, текущая по трубе, возрастает при увеличении длины трубы и уменьшении ее сечения. Коэффициент пропорциональности ρ —

удельное сопротивление — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади.

Единица удельного сопротивления — *ом · м* (1 Ом · м). Изменение сопротивления проводника в соответствии с формулой (2) возможно либо при изменении его длины (как в реостате — проводнике с переменным сопротивлением), либо при различном составе и объеме наполнителя (как в резисторе — проводнике с постоянным сопротивлением).

Измерить сопротивление можно, используя ***амперметр*** и ***вольтметр***. Амперметр измеряет силу тока, обладает малым сопротивлением R_A, включается в электрическую цепь последовательно. Вольтметр измеряет электрическое напряжение, обладает большим сопротивлением R_V, включается в электрическую цепь параллельно. Для уменьшения погрешности измерения сопротивления используется одна из двух приведенных схем. Если предположительно измеряемое сопротивление R велико ⑤, как в первой схеме, оно включается последовательно с амперметром. В этом случае сопротивление $R_m = U_{ac} / I_a = R + R_A$, измеренное по показаниям вольтметра и амперметра, стремится к R при $R_A << R$. Величину малого сопротивления точнее можно измерить, соединяя его параллельно вольтметру ⑥. Из-за большого сопротивления вольтметра ($R_V >> R$) ток в него практически не ответвляется в точке a. Весь ток протекает через измеряемое сопротивление R.

Сопротивление. Закон Ома для участка цепи

① **ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ**

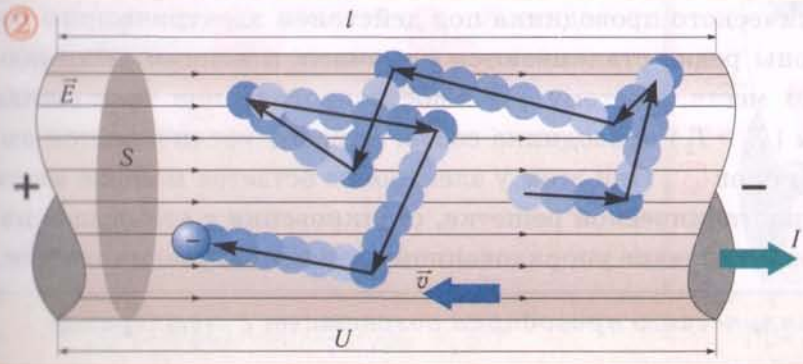
$$I = \frac{U}{R}$$

R – сопротивление

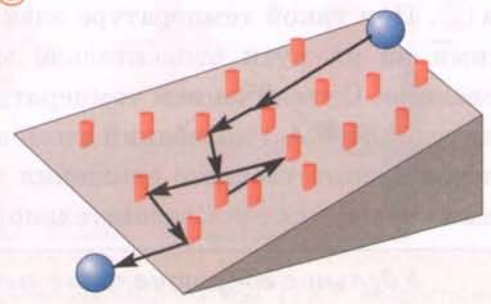
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ – удельное сопротивление

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ

② 

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ПРОВОДНИКЕ

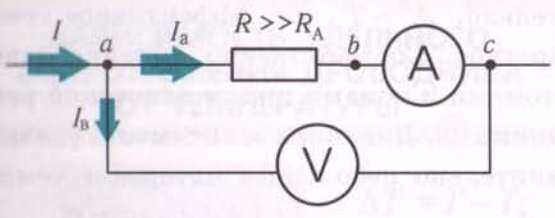
③ 

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

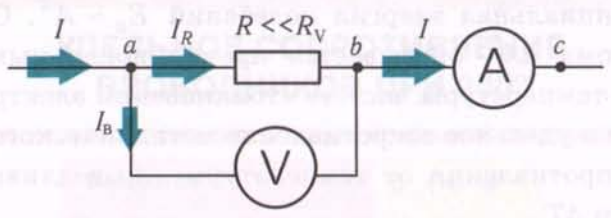
④ Масса жидкости, перекачиваемой насосом в единицу времени, эквивалентна силе тока в электрической цепи

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

⑤ Схема для измерения больших сопротивлений



⑥ Схема для измерения малых сопротивлений



ПОСТОЯННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (РЕЗИСТОР)

ПЕРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (РЕОСТАТ)

§3. ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура проводника влияет на характер движения электронов в проводнике и соответственно на удельное сопротивление проводника, зависящее от частоты столкновений электронов с неоднородностями кристаллической решетки и примесями другого элемента в проводнике. В кристаллической решетке проводника происходят хаотические тепловые колебания атомов и ионов около положений равновесия (узлов). При малой температуре T_1 амплитуда A_1 тепловых колебаний атомов и ионов невелика ①, и электроны почти беспрепятственно движутся в кристаллической решетке металлического проводника под действием электрического поля ②. При такой температуре электроны редко сталкиваются с атомами и ионами, занимающими на их пути относительно мало места, поэтому удельное сопротивление проводника невелико. С увеличением температуры ($T_2 > T_1$) проводника соответственно увеличивается амплитуда ($A_2 > A_1$) колебаний атомов и ионов ③. При этом у электронов остается меньше места для беспрепятственного движения в кристаллической решетке, столкновения с атомами и ионами учащаются ④. Следовательно, сопротивление упорядоченному движению увеличивается.

Удельное сопротивление металлического проводника возрастает с температурой T по линейному закону:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при $t_0 = 20\ ^\circ C$ ($T_0 = 293$ К); $\Delta T = T - T_0$; α — *температурный коэффициент сопротивления*. Единица температурного коэффициента сопротивления — *кельвин в минус первой степени* ($1\ \text{К}^{-1}$).

Линейную зависимость удельного сопротивления металлического проводника качественно можно пояснить следующим образом. Удельное сопротивление прямо пропорционально частоте столкновений электронов. Она складывается из частоты столкновений с неоднородностями решетки, не зависящей от температуры, и частоты столкновений с атомами и ионами, упорядоченно расположенными в кристаллической решетке. Последняя линейно зависит от температуры. Это связано с тем, что потенциальная энергия E_p колебаний атома с амплитудой A оказывается по порядку величины равной внутренней энергии kT: $E_p \approx kT$. В то же время потенциальная энергия колебаний $E_p \sim A^2$. Следовательно, $A^2 \sim T$, т.е. эффективное сечение атома πA^2 оказывается пропорциональным температуре. Соответственно линейно зависят от температуры частота столкновений электрона с атомами и ионами кристаллической решетки и удельное сопротивление металлического проводника ⑤. Линейная зависимость удельного сопротивления от температуры справедлива в сравнительно небольшом интервале температур ΔT.

При низких температурах (≈ 10 К) наблюдается резкая зависимость удельного сопротивления от температуры, характерная для сверхпроводящего состояния.

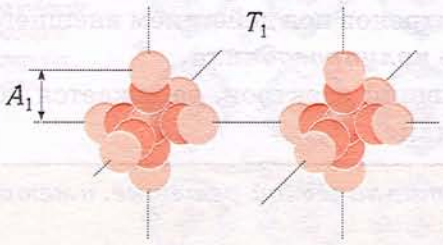
Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления $\alpha \approx 1/273\ \text{К}^{-1}$. По изменению температуры проволоки можно определить температуру в диапазоне температур, недоступном для жидкостных термометров.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ

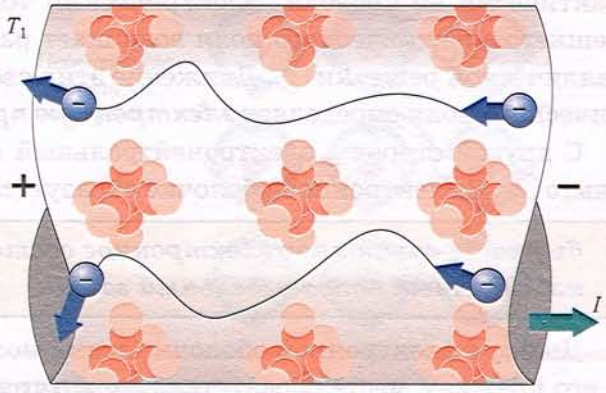
КОЛЕБАНИЯ ИОНОВ В УЗЛАХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

① При малой температуре T_1 амплитуда колебаний A_1 ионов относительно положения равновесия невелика



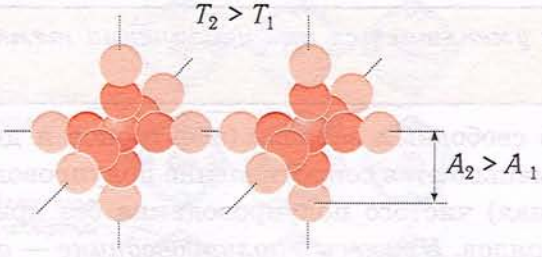
ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ

② При малой температуре T_1 колебания ионов несущественно препятствуют направленному движению электронов

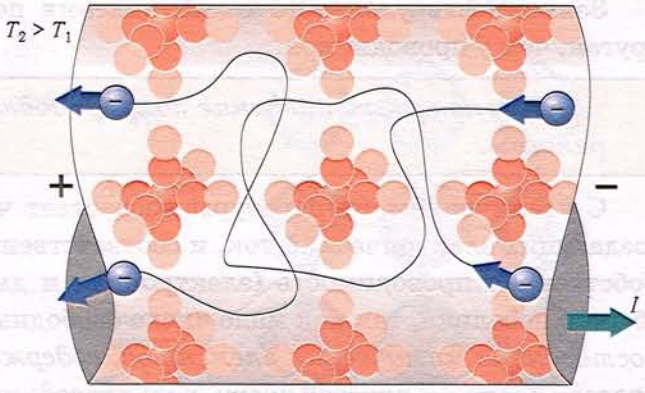


③ С увеличением температуры $T_2 > T_1$ амплитуда колебаний A_2 ионов возрастает:

$$A_2 > A_1$$



④ При увеличении температуры $T_2 > T_1$ возрастание амплитуды колебаний ионов препятствует направленному движению электронов



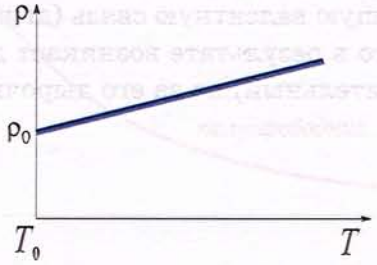
ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

⑤

$$\rho = \rho_0 (1 + \Delta T)$$

$$\Delta T = T - T_0$$

$$\Delta T = 293\ K$$



УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ ПРИ 200°

Вещество	ρ_0, Ом · м
Серебро	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$
Медь	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
Золото	$2{,}4 \cdot 10^{-8}$
Алюминий	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$
Вольфрам	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$
Платина	10^{-7}
Сталь	$2 \cdot 10^{-7}$
Манганин (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	$4{,}4 \cdot 10^{-7}$
Константан (60% Cu, 40% Ni)	$4{,}9 \cdot 10^{-7}$
Ртуть	$9{,}6 \cdot 10^{-7}$
Нихром (58% Ni, 25% Cu, 16% Cr)	10^{-6}

§4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Величина удельного сопротивления полупроводников, являющегося промежуточным между удельными сопротивлениями проводников и диэлектриков, определяется механизмом образования свободных зарядов — носителей электрического тока. В качестве примера рассмотрим кристалл кремния, атомы которого имеют на внешней оболочке по четыре электрона. При низких температурах электроны прочно связаны в атомах, свободных электронов нет, кремний практически не проводит электрический ток. При нагревании кристалла или под действием внешнего электрического поля возникает разрыв связей некоторых электронов с ионами кристаллической решетки ①. Движение этих свободных электронов под действием внешнего электрического поля определяет ***электронную проводимость полупроводника***.

С другой стороны электронейтральный атом, потерявший электрон, заряжается положительно ②. В электронной оболочке образуется вакансия, или

> ***дырка — вакантное электронное состояние в кристаллической решетке, имеющее избыточный положительный заряд.***

Дырку в электронной оболочке атома может заполнить электрон соседнего атома. При этом на его прежнем месте образуется новая дырка, которая затем может аналогично перемещаться по кристаллу. Движение валентных электронов между электронными оболочками соседних атомов на вакантные места (дырки) под действием внешнего электрического поля определяет ***дырочную проводимость полупроводника***.

Зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры принципиально другая, чем у проводников.

> ***Удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры.***

С увеличением температуры возрастает число свободных зарядов (электронов и дырок), создающих электрический ток, и соответственно уменьшается сопротивление полупроводника. Собственная проводимость (электронная и дырочная) чистого полупроводника без примесей обычно невелика, так как мало число свободных зарядов. *Примеси в полупроводнике — атомы посторонних химических элементов, содержащиеся в основном полупроводнике. Примесная проводимость — проводимость полупроводников, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей.* Дозированное введение в чистый полупроводник примесей позволяет целенаправленно изменять число носителей заряда, их знак, проводимость полупроводника.

> ***Если валентность атома примеси больше валентности атома основного полупроводника, говорят о донорной примеси ③, а если меньше — об акцепторной ④.***

Пример донорной примеси — пятивалентные атомы As в четырехвалентном Ge. Пятый валентный электрон атома As слабее связан с атомом и под действием внешнего электрического поля легко отрывается от атома, становясь свободным. Полупроводник с донорной примесью — ***полупроводник n-типа*** (от лат. negativus — отрицательный). Примером акцепторной примеси в Ge являются трехвалентные атомы галлия Ga. Недостающую валентную связь (дырку) может заполнить валентный электрон соседнего атома, у которого в результате возникает дырка. Такой ***полупроводник — p-типа*** (от лат. positivus — положительный) из-за его дырочной проводимости.

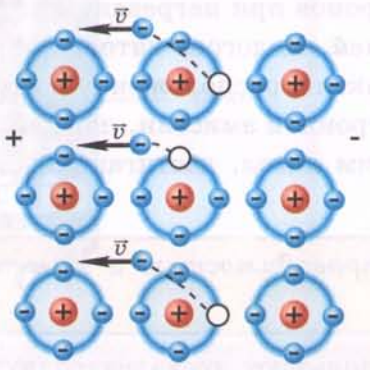
СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Возникновение носителей электрического тока в полупроводнике

Электронная проводимость полупроводника

①

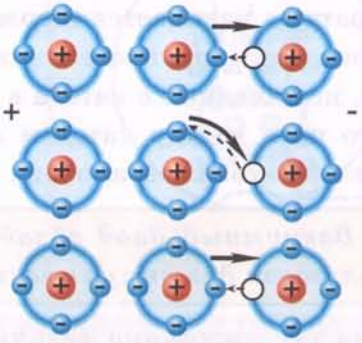
Образование свободного электрона и дырки



Дырочная проводимость полупроводника

②

Перемещение валентного электрона

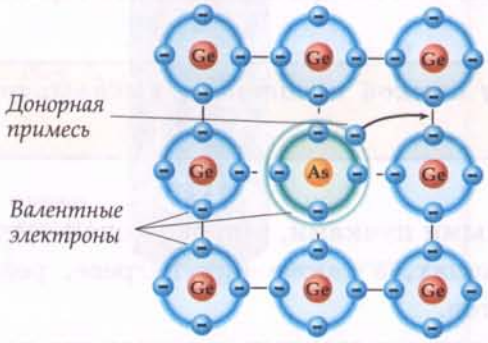


ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Фрагмент кристаллической решетки примесных полупроводников

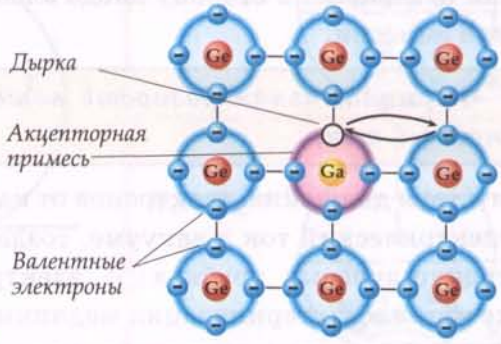
Донорный полупроводник

③

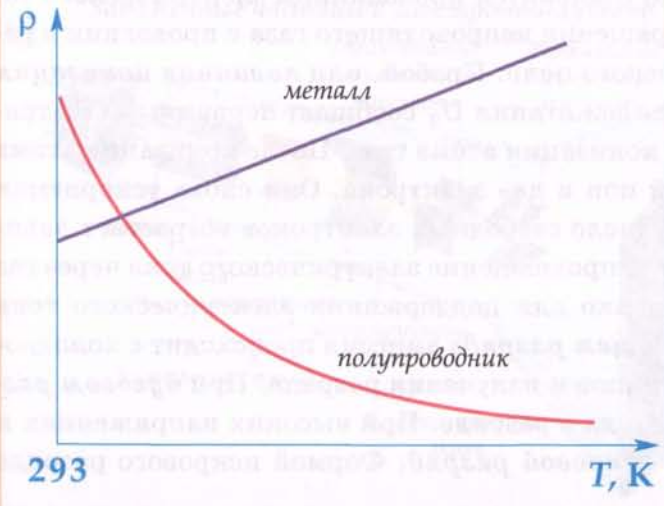


Акцепторный полупроводник

④



Зависимость удельного сопротивления металла и полупроводника от температуры



УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

$t = 20^0$ C

ВЕЩЕСТВО	ρ, Ом · м
Углерод	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$
Поваренная соль (насыщенный раствор)	0,044
Германий	0,5
Кровь	1,5
Жир	25
Кремний	2300

§5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

Электрический ток в вакууме (разреженном газе, в котором молекулы не сталкиваются между собой в пределах сосуда) может протекать, если ввести в сосуд свободные заряды. В двухэлектродной электронной лампе — ***вакуумном диоде*** — электроны появляются в вакуумированном стеклянном баллоне в результате нагревания до высокой температуры одного из электродов — ***катода*** ①. Процесс испускания электронов при нагревании катода до высокой температуры называется ***термоэлектронной эмиссией***. Подогрев катода обеспечивается выделением тепла при протекании тока через спираль накала, расположенную внутри него. Электроны, испущенные с катода в результате термоэлектронной эмиссии, под действием электрического поля между катодом и ***анодом***, окружающим катод, достигают анода ②. Обратное направление тока невозможно.

Вакуумный диод обладает односторонней проводимостью и может быть использован для выпрямления переменного тока.

Для регулирования величины анодного тока используют трехэлектродную электронную лампу — ***триод*** ③. Для этого в триоде между катодом и анодом помещается третий электрод (в виде спирали) – ***сетка*** ④.

Положительная разность потенциалов между сеткой и катодом увеличивает анодный ток,

так как оттягивает в сторону анода электроны, вылетевшие из катода в результате термоэлектронной эмиссии.

Отрицательная разность потенциалов между сеткой и катодом уменьшает анодный ток,

препятствуя движению электронов от катода.

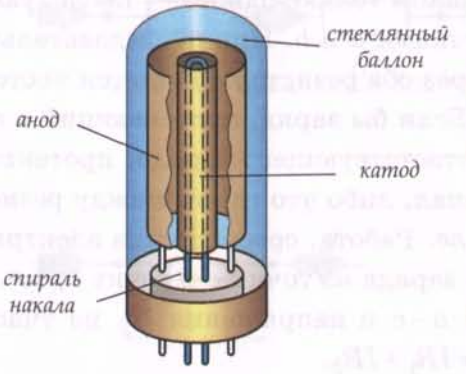
Электрический ток в вакууме, созданный электронными пучками, широко используется в электронно-лучевых трубках ⑤, электронных микроскопах, а также при нагреве, резке и сварке металлов, стерилизации медицинских инструментов.

Из-за практического отсутствия свободных зарядов при нормальных условиях газ не проводит электрический ток. Появление в газе значительного числа свободных зарядов возможно в результате внешней ионизации: нагревания газа, воздействия на него излучения, внешнего электрического поля. Ионизованный газ (плазма) становится проводником электрического тока. ***Электрический пробой газа*** — процесс превращения непроводящего газа в проводник в результате приложения к нему сильного электрического поля. Пробой, или ***лавинная ионизация газа***, начинается, когда приложенное напряжение зажигания U_3 сообщает первичным («затравочным») электронам энергию, достаточную для ионизации атома газа. После ионизации атома электронным ударом образуется положительный ион и два электрона. Они снова ускоряются электрическим полем и производят ионизацию. Число свободных электронов возрастает лавинообразно. Зажигается ***самостоятельный разряд***: прохождение электрического тока через газ перестает зависеть от внешних ионизаторов. Однако для поддержания электрического тока требуется эмиссия электронов с катода. При ***тлеющем разряде*** эмиссия происходит с холодного катода под действием ударов положительных ионов и излучения разряда. При ***дуговом разряде*** эмиссия электронов — результат нагрева катода в разряде. При высоких напряжениях и давлении газа порядка атмосферного возникает ***искровой разряд***. Формой искрового разряда является молния.

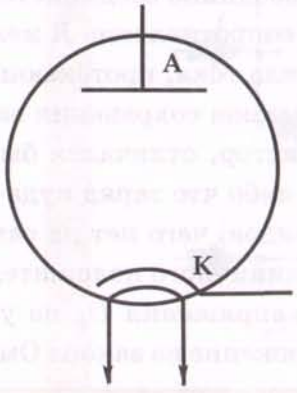
ВАКУУМНЫЙ ДИОД

Конструкция

①

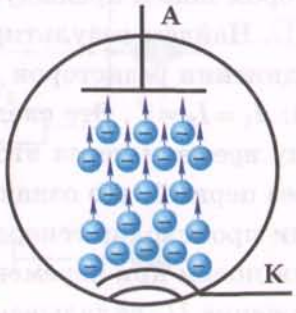


Условное обозначение



Ток насыщения

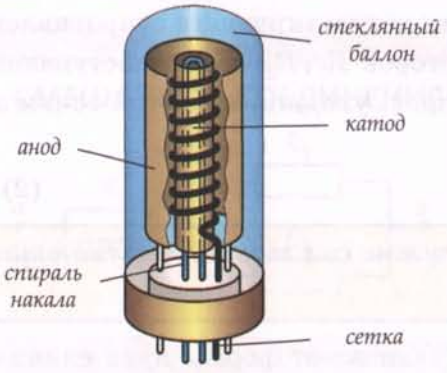
②



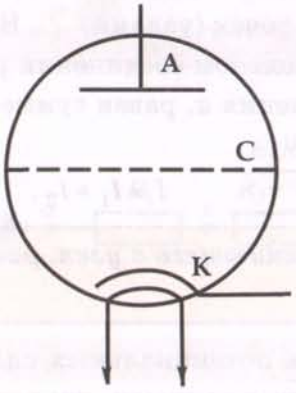
ТРИОД – *трехэлектродная электронная лампа*

Конструкция

③



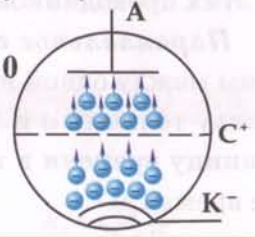
Условное обозначение



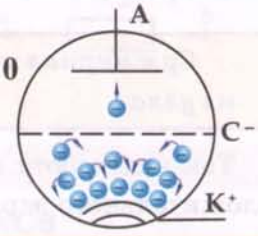
Сетка – *регулятор анодного тока*

④

$\varphi_C - \varphi_K > 0$



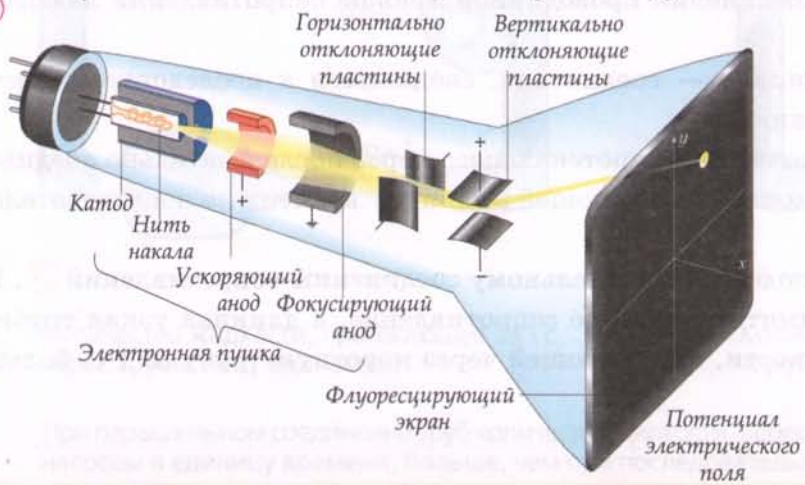
$\varphi_C - \varphi_K < 0$



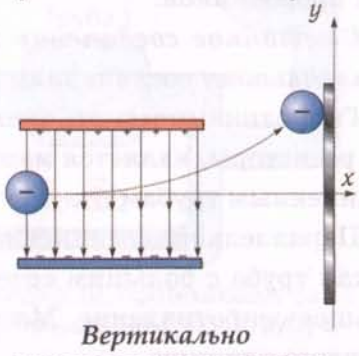
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Заряженные частицы в электронно-лучевой трубке

⑤



Траектория электрона перед попаданием на экран



Вертикально отклоняющие пластины

§6. СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Основными типами соединений элементов электрической цепи являются последовательное и параллельное соединения. ***Последовательное соединение проводников*** — соединение, при котором конец предыдущего проводника соединяется с началом только одного — последующего ①. Найдем результирующее сопротивление R между точками a и b. При последовательном соединении резисторов R_1, R_2 сила тока, протекающего через оба резистора, остается постоянной: $I_1 = I_2 = I$. Это следует из закона сохранения заряда. Если бы заряд, протекающий в единицу времени через второй резистор, отличался бы от соответствующего заряда, протекшего через первый, это означало бы, либо что заряд куда-то пропал, либо что где-то между резисторами происходит генерация зарядов, чего нет на самом деле. Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении единичного положительного заряда из точки a в точку b, т.е. напряжение U, складывается из напряжения U_1 на участке $a-c$ и напряжения U_2 на участке $c-b$: $U = U_1 + U_2$. Выразим напряжение из закона Ома: $IR = IR_1 + IR_2$.

При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений: $R = R_1 + R_2$. (1)

Сопротивление последовательного соединения проводников больше сопротивления любого из этих проводников.

Параллельное соединение проводников — соединение, при котором проводники подключены между одной и той же парой точек (узлами) ②. Найдем результирующее сопротивление R между точками a и b. При параллельном соединении резисторов R_1, R_2 заряд, поступающий в единицу времени в точку разветвления a, равен сумме зарядов, уходящих из этой точки за это же время:

$$I = I_1 + I_2. \quad (2)$$

Суммарная сила тока, втекающего в узел, равна сумме сил токов, вытекающих из узла.

Так как работа электрических потенциальных сил не зависит от формы пути единичного положительного заряда между двумя точками, напряжение на каждом из параллельно соединенных проводников одно и то же:

$$U_1 = U_2 = U. \quad (3)$$

Выразим силу тока для каждого проводника в (2) с учетом (3). Тогда $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

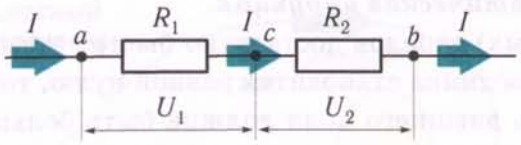
Сопротивление параллельного соединения проводников меньше сопротивления любого из этих проводников.

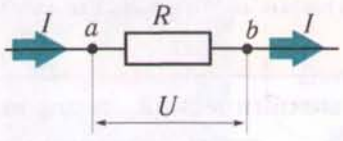
Смешанное соединение проводников — соединение, сводящееся к последовательному и параллельному соединениям проводников ③.

Гидродинамическим аналогом силы тока, протекающего через последовательно соединенные резисторы, является масса жидкости, протекающей в единицу времени по последовательно соединенным трубам ④.

Параллельное соединение труб подобно параллельному соединению сопротивлений ⑤. Короткая труба с большим сечением имитирует малое сопротивление, а длинная узкая труба — большое сопротивление. Масса жидкости, протекающей через короткую трубу за 1 с, больше, чем через длинную.

① ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

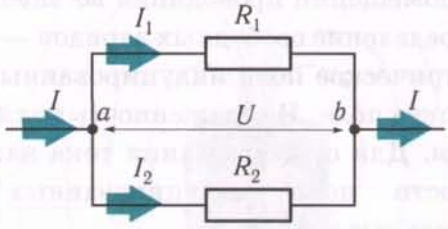


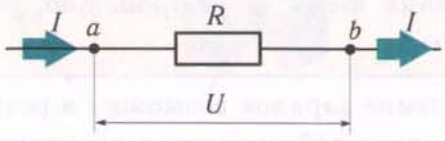


$I = I_1 = I_2, \quad U = U_1 + U_2, \quad IR = IR_1 + IR_2$

$$R = R_1 + R_2 \qquad R > \{R_1, R_2\}$$

② ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

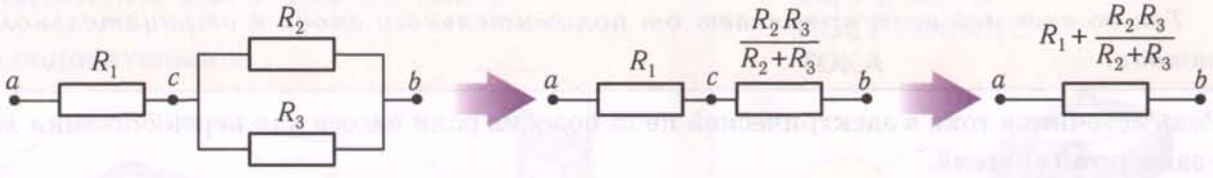




$I = I_1 + I_2, \quad \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

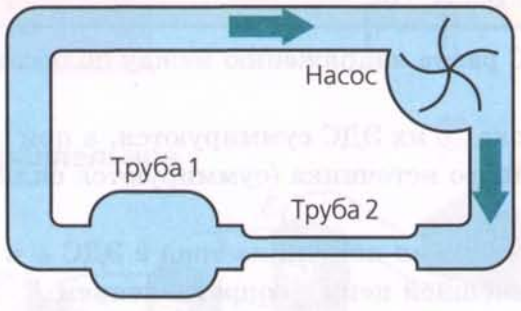
$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad R < \{R_1, R_2\}$$

③ СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ



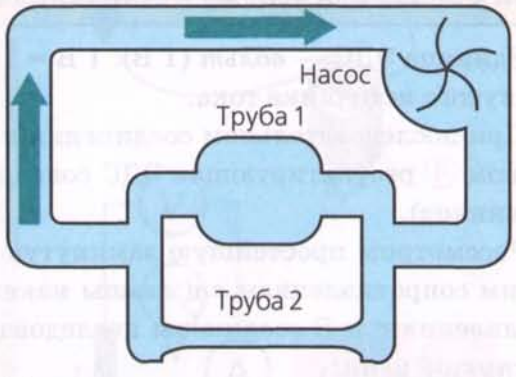
ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ СОЕДИНЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ

④ Последовательное соединение труб



Количество жидкости, протекающее за 1 с через трубы 1 и 2, одинаково

⑤ Параллельное соединение труб



Количество жидкости, протекающее за 1 с через трубу 1, больше, чем через трубу 2

При параллельном соединении труб количество жидкости, перекачиваемое насосом в единицу времени, больше, чем при последовательном

§7. ЭДС. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ

При помещении проводника во внешнее постоянное электрическое поле в нем происходит перераспределение свободных зарядов — ***электростатическая индукция.***

Электрическое поле индуцированных (наведенных) зарядов достаточно быстро компенсирует внешнее поле. Напряженность поля внутри проводника становится равной нулю, ток прекращается. Для существования тока напряженность внешнего поля должна быть больше напряженности поля индуцированных зарядов. Для этого к проводнику подводит дополнительные заряды

источник тока — устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды.

Разделение зарядов возможно в результате преобразования механической, тепловой, химической, световой энергии в электрическую. ***Сторонние силы*** — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов. В кислотном аккумуляторе, например, заряды на электродах оказываются разноименными за счет энергии химической реакции медного (Cu) и цинкового (Zn) электродов с электролитом (раствором серной кислоты H_2SO_4) ①. Под действием притяжения отрицательных ионов SO_4^{2-} положительно заряженные ионы цинка Zn^{2+} и меди Cu^{2+} переходят в раствор. В результате ухода положительных зарядов электронейтральные электроды заряжаются отрицательно. Из-за меньшей энергии связи с кристаллической решеткой ионы Zn^{2+} легче покидают электрод, чем ионы Cu^{2+}. Поэтому цинковый электрод, имеющий меньший потенциал, является отрицательным полюсом источника — ***катодом***, а медный — положительным — ***анодом.***

Ток во внешней цепи протекает от положительного анода к отрицательному катоду.

Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости в замкнутой системе.

Широко распространенными источниками тока являются элемент питания с угольно-цинковыми электродами и ртутная батарейка, используемая в калькуляторах и часах ②.

ЭДС — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному к величине этого заряда: $\mathcal{E} = A_c / q$.

Единица ЭДС — *вольт* (1 В). 1 В = 1 Дж/Кл. ЭДС равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока.

При последовательном соединении источников тока ③ их ЭДС суммируются, а при параллельном ④ результирующая ЭДС совпадает с ЭДС одного источника (суммируются силы тока источников).

Рассмотрим простейшую замкнутую цепь, состоящую из источника тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r и лампы накаливания во внешней цепи с сопротивлением R ⑤. Сопротивления r и R соединены последовательно. Силу тока в цепи определяет ***закон Ома для замкнутой цепи***:

Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \mathcal{E} / (R + r).$$

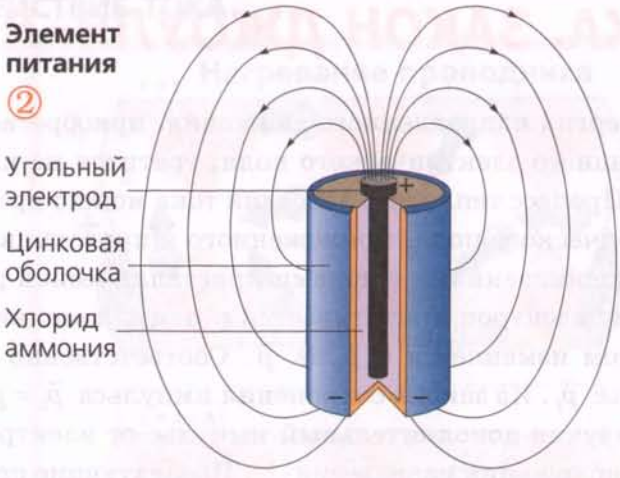
ИСТОЧНИКИ ТОКА

Кислотный аккумулятор

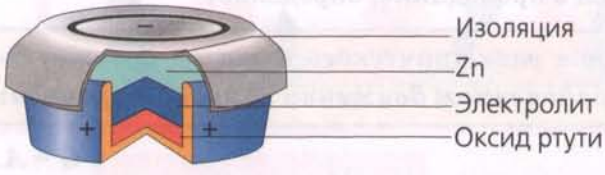
①

Элемент питания

②



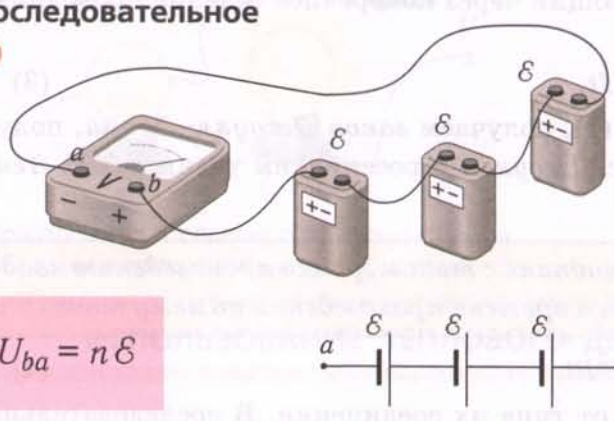
Миниатюрная батарейка



СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Последовательное

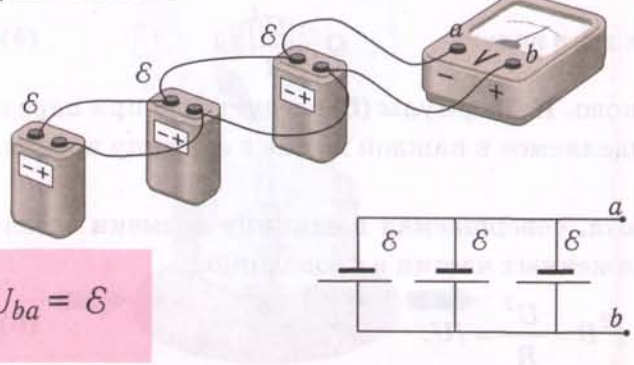
③



$$U_{ba} = n\mathcal{E}$$

Параллельное

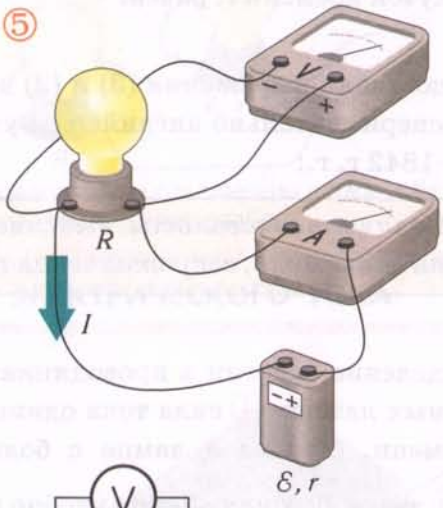
④

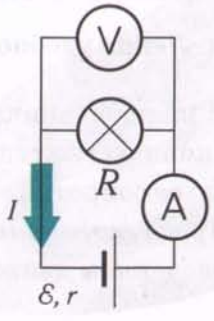


$$U_{ba} = \mathcal{E}$$

ЭДС В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

⑤





$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

§8. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА

Энергия направленного движения, приобретаемая электронами в проводнике под действием внешнего электрического поля, тратится на нагревание кристаллической решетки проводника. Процесс теплового действия тока можно представить следующим образом. Под действием электрического поля, приложенного к проводнику, электроны ускоряются в промежутках между столкновениями с ионами кристаллической решетки. При приближении к положительному иону электрон притягивается к нему, изменяя направление движения. Импульс электрона при этом изменяется с $\vec{p}_0$ на $\vec{p}$. Соответственно ион притягивается к электрону, приобретая импульс $\vec{p}_i$. Из закона сохранения импульса $\vec{p}_i = \vec{p}_0 - \vec{p}$.

Получив дополнительный импульс от электрона, ион совершает колебательное движение около положения равновесия ①. Последующие столкновения иона с другими электронами увеличивают амплитуду колебаний ионов, среднюю энергию решетки и соответственно температуру проводника ②. Количество теплоты, получаемое кристаллической решеткой, т.е. выделяющееся в проводнике, определяет

работа электрического тока — работа, совершаемая электрическим током при упорядоченном движении зарядов в проводнике.

$$Q = A. \qquad (1)$$

Работу по перемещению единичного положительного заряда характеризует разность потенциалов U. Для заряда q

$$A = qU = qIR. \qquad (2)$$

При постоянной силе тока I заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени t, равен:

$$q = It. \qquad (3)$$

Подставляя выражения (3) и (2) в формулу (1), получаем ***закон Джоуля–Ленца***, полученный экспериментально английским ученым *Дж. Джоулем* и российским ученым ***Э.Х. Ленцем*** в 1831–1842 г. г.:

Количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему тока ③:

$$Q = I^2Rt. \qquad (4)$$

Выделение энергии в проводниках зависит от типа их соединения. В последовательно соединенных лампах ④ сила тока одинакова, поэтому количество теплоты, выделяемое в единицу времени, больше в лампе с большим сопротивлением. При параллельном соединении ламп ⑤ закон Джоуля–Ленца удобно представить в виде: $$Q = \frac{U^2}{R}t, \qquad (5)$$

так как напряжение U на проводниках одинаково. Из формулы (5) следует, что при параллельном соединении ламп количество теплоты, выделяемое в каждой лампе в единицу времени, обратно пропорционально ее сопротивлению.

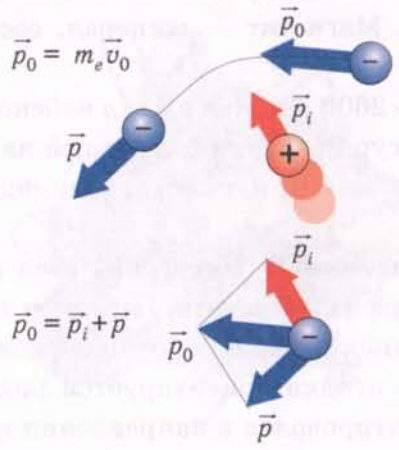
Мощность электрического тока — работа, совершаемая в единицу времени электрическим полем при упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t} = I^2R = \frac{U^2}{R} = IU. \qquad (6)$$

ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Взаимодействие электрона с ионом

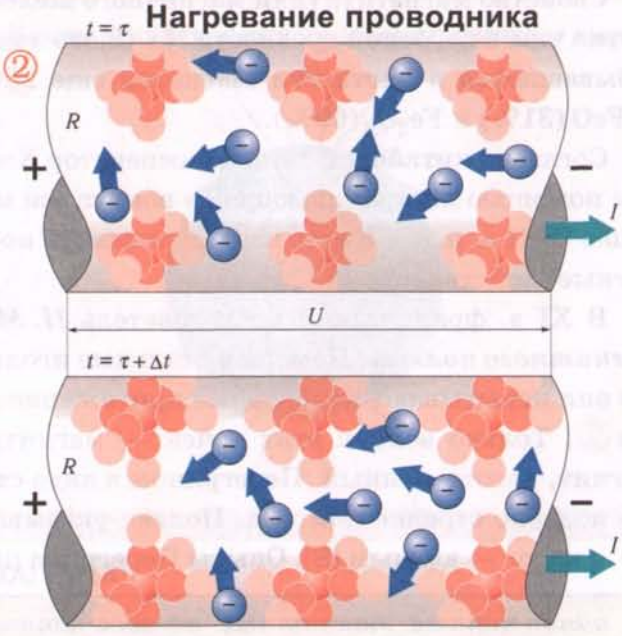
①



Энергия, приобретаемая электронами под действием электрического поля, идет на увеличение амплитуды колебаний ионов, т.е. на нагревание проводника

Нагревание проводника

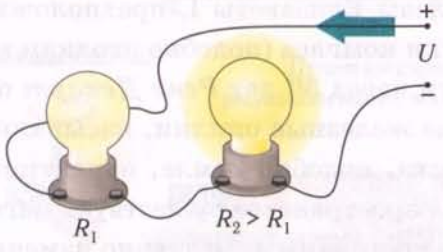
②



③ **ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА:**

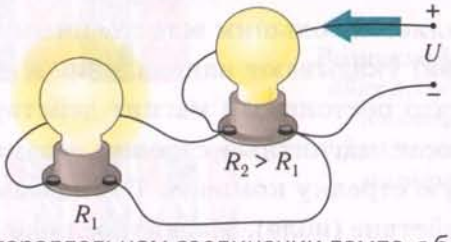
$$Q = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$$

④



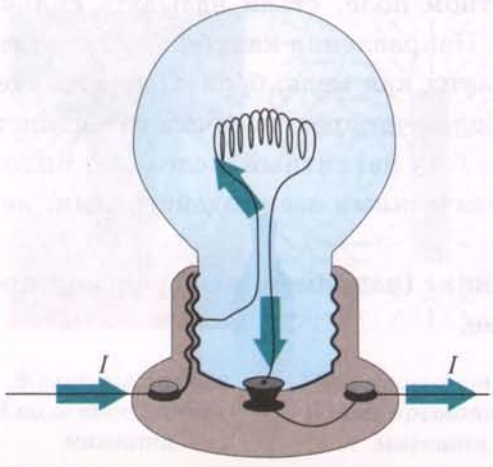
При последовательном соединении лампа с большим сопротивлением горит ярче

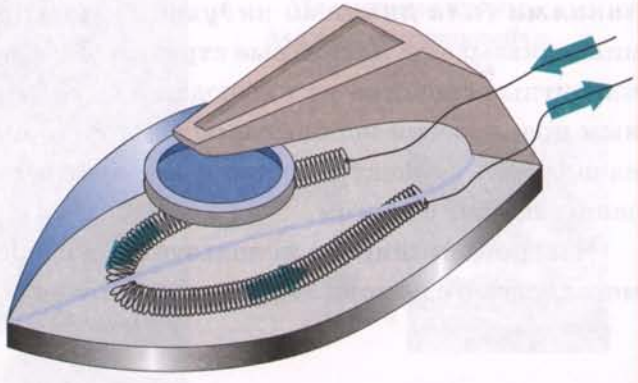
⑤



При параллельном соединении лампа с большим сопротивлением горит слабее

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА





§9. МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Свойство магнетита (или магнитного железняка) притягивать железные предметы было известно уже в глубокой древности ①. Слово «магнит» (от греч. magnes) означает название руды, добывавшейся в местности Магнезия еще 2500 лет назад. Магнетит — минерал, состоящий из FeO (31%) и Fe_2O_3 (69%).

Согласно китайской легенде император Хванг Ти (около 2600 лет до н.э.) вел войско в тумане с помощью поворачивающейся вокруг оси магнитной фигурки, всегда смотрящей на юг. Начиная со II в. н.э. в Китае изготавливались ***постоянные магниты***, надолго сохранявшие магнитные свойства.

В XI в. французский исследователь ***П. Марикур*** (псевдоним ***П. Перегрин***) ввел понятие ***магнитного полюса***. Помещая стальные иголки вблизи шара из магнетита, Перегрин заметил, что они испытывают наибольшее притяжение вблизи двух диаметрально противоположных точек ②. Только вблизи этих точек — магнитных полюсов иголка ориентируется радиально. Магнит, изготовленный Перегрином в виде стержня, ориентировался в направлении юг — север подобно стрелке компаса. Полюс, указывающий направление на север, назвали северным (N), а на юг — южным (S). Опыты Перегрина показали, что

> ***одноименные магнитные полюса отталкивают друг друга*** ③, ***а разноименные притягивают*** ④.

Все попытки их разделить и получить магнитный монополь (магнитный заряд) не увенчались успехом ⑤. Каждый фрагмент разделенного магнита имел два полюса: северный и южный.

В 1600 г. ***Уильям Гильберт***, врач английской королевы Елизаветы I, предположил, что Земля является большим естественным магнитом, а стрелки компаса (подобно иголкам в опыте Перегрина) указывают направление к его полюсам. Почти через 50 лет ***Рене Декарт*** обнаружил ⑥, что постоянный магнит действует на мельчайшие железные опилки, насыпанные вокруг него, и магнитные стрелки, размещенные поблизости, подобно Земле, ориентирующей магнитную стрелку компаса. Тем самым он показал, что в пространстве существует магнитное взаимодействие (поле). Магнитное поле Земли не остается постоянным, медленно изменяясь со временем. Через достаточно большие интервалы времени может происходить обмен местами (инверсия) магнитных полюсов. За последние 30 млн лет среднее время между инверсиями составляло около 150000 лет. Магнитные поля существуют и у ряда планет Солнечной системы: Меркурия, Марса, Юпитера, Сатурна. У Венеры и Луны магнитное поле отсутствует.

Линии, образуемые железными опилками в магнитном поле, стали называть ***силовыми линиями (или линиями индукции) магнитного поля***. Направление касательных к этим линиям указывают магнитные стрелки. У ряда веществ, таких как медь, бронза, дерево, стекло, магнитные свойства не наблюдаются. На протяжении более четырех тысячелетий единственным практически используемым источником магнетизма был магнитный железняк. Вплоть до начала XIX в. электричество и магнетизм считались физическими взаимодействиями, не связанными друг с другом.

Магнетизм широко используется в современной технике (например, для транспортировки металлолома с помощью магнитного крана ⑦) и медицине.

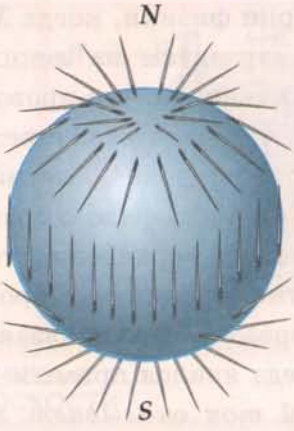
МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Притяжение стальных предметов магнитом

①

Иголки вблизи поверхности намагниченного шара

②



ПОЛЮСЫ МАГНИТА

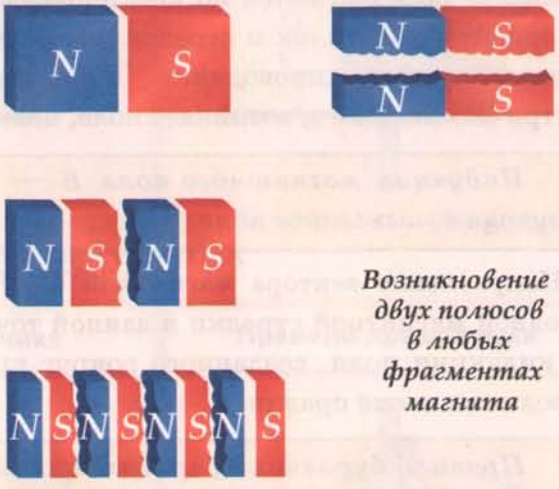
③

Отталкивание одноименных полюсов

④

Притяжение разноименных полюсов

⑤

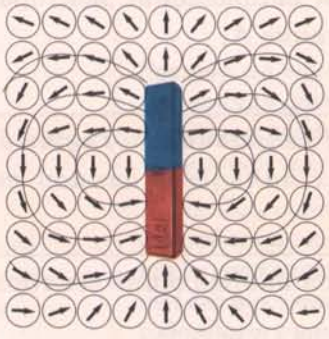


Возникновение двух полюсов в любых фрагментах магнита

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

⑥

Железные опилки в поле постоянного магнита



Магнитные стрелки в поле постоянного магнита

⑦

Магнитные краны для транспортировки металлолома

§10. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Разгадка взаимосвязи электричества и магнетизма пришла лишь после того, как исследователи научились получать электрический ток. В 1820 г. было сделано одно из важнейших открытий в истории физики, когда ***Ханс Эрстед***, профессор Копенгагенского университета, демонстрировал студентам на лекции нагревание проводника электрическим током. Эрстед обратил внимание на то, что проводник в отсутствие тока ① располагается вдоль магнитного поля Земли, на что указывала стрелка компаса, случайно оказавшегося на столе под проводником. При включении тока ② магнитная стрелка отклонилась почти перпендикулярно проводнику, что свидетельствовало о возникновении дополнительного магнитного поля, созданного током. Изменение направления тока на противоположное ③ сопровождалось отклонением стрелки в противоположную сторону, что означало изменение направления магнитного поля тока. Таким образом, было показано, что электрический ток воздействует на магнитную стрелку. Опыт Эрстеда явился прямым доказательством взаимосвязи электричества и магнетизма: ***электрический ток оказывает магнитное действие***. Покоящиеся заряды на магнитную стрелку не действуют. Следовательно, ***магнитное поле порождается движущимися зарядами***.

В плоскости, перпендикулярной проводнику с током, железные опилки ④ и магнитные стрелки ⑤ располагаются по касательным к концентрическим окружностям. Пространственная ориентация опилок и стрелок изменяется на противоположную (на 180°) при изменении направления тока в проводнике ⑥. Следовательно, в пространстве, окружающем проводник с электрическим током, возникает поле, называемое магнитным.

Индукция магнитного поля $\vec{B}$ — векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле ⑦.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением северного полюса свободной магнитной стрелки в данной точке. Для определения направления вектора магнитной индукции поля, созданного вокруг проводника с током, следует использовать любое из приводимых ниже правил.

Правило буравчика (правого винта, штопора) для прямого тока ⑧: ***Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление скорости движения конца его рукоятки в данной точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в этой точке.***

С помощью правила буравчика определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в произвольной точке А.

Правило правой руки для прямого тока ⑨:

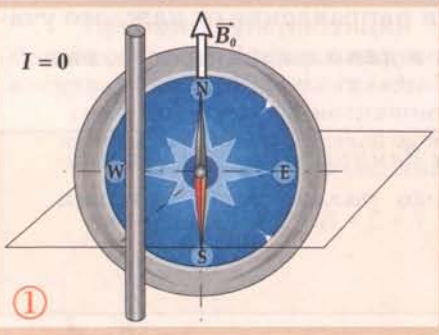
Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление индукции в этой точке.

С помощью правила правой руки определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в точке *А*.

Линии индукции магнитного поля для прямого проводника с током являются концентрическими окружностями с центром на оси проводника, лежащими в плоскостях, перпендикулярных проводнику.

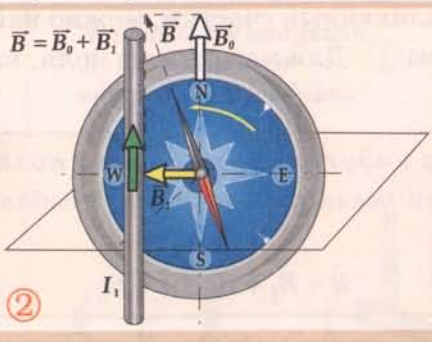
ОПЫТ ЭРСТЕДА

Магнитная стрелка в отсутствие тока



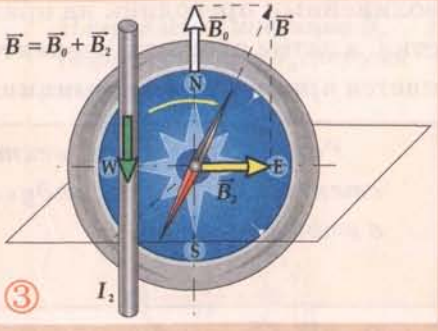
①

Поворот магнитной стрелки при направлении тока вверх



②

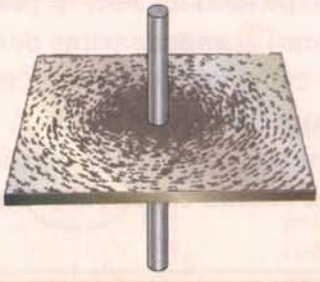
Поворот магнитной стрелки при направлении тока вниз



③

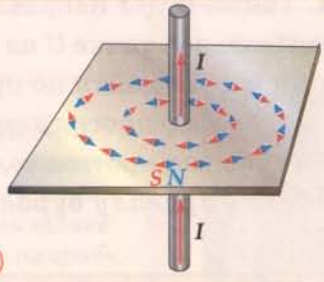
МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ПЛОСКОСТИ

Упорядоченное расположение железных опилок



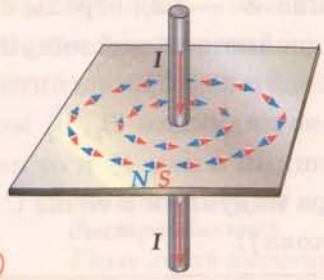
④

Ориентация магнитных стрелок



⑤

Изменение ориентации магнитных стрелок при смене направления тока

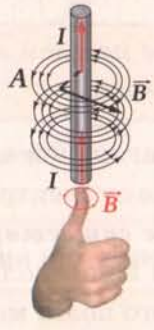


⑥

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Направление вектора магнитной индукции в разных горизонтальных плоскостях

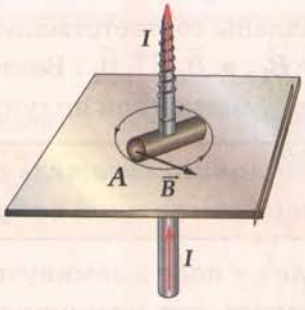
⑦



Магнитное поле убывает с увеличением расстояния от проводника с током

Правило буравчика

⑧

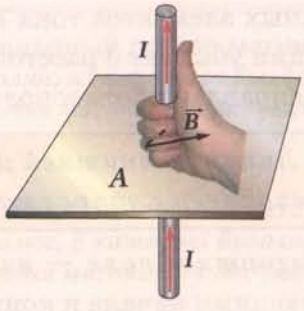


Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ – векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле.

"Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление скорости движения его рукоятки в данной точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в этой точке"

Правило правой руки

⑨



"Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление вектора индукции в этой точке"

§11. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Правило буравчика, как и правило правой руки, позволяют находить направление вектора индукции магнитного поля, созданного только прямым током. Однако мысленно разделив криволинейный проводник на прямолинейные участки, можно найти направление от каждого участка, а затем сложить эти векторы ①. Для магнитного поля, как и для электрического, выполняется ***принцип суперпозиции***:

> ***Результирующий вектор индукции магнитного поля в данной точке складывается из векторов индукции магнитного поля, созданного различными токами в этой точке:***
>
> $$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + ... + \vec{B}_n .$$

С помощью принципа суперпозиции найдем направление вектора магнитной индукции в нескольких точках вблизи кольцевого тока. В центре в точке O все прямолинейные участки (1, 2, 3, 4) кольцевого тока создают магнитное поле, индукция которого по правилу буравчика направлена от нас (перпендикулярно плоскости кольца). Этому направлению соответствует обозначение ⊗ — вид стрелы с оперения. Также будет направлен в центре кольца вектор результирующей магнитной индукции. В произвольной точке C на оси кольца ② направление результирующего вектора магнитной индукции можно найти по принципу суперпозиции, складывая попарно индукции $\vec{B}_1, \vec{B}_2$ магнитного поля, созданного элементарными прямыми токами, протекающими к нам ⊙ и от нас ⊗ в диаметрально противоположных точках 1 и 2. Направление вектора индукции в точке C можно найти ***по правилу буравчика для витка с током (кольцевого тока):***

> ***Если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в витке, то поступательное перемещение буравчика совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля, созданного током в витке на своей оси.***

В точке D (вне кругового тока) ③ векторы магнитной индукции от диаметрально противоположных элементов тока 1 и 2 направлены соответственно вверх $\vec{B}_1$ и вниз $\vec{B}_2$. Учитывая, что индукция убывает с расстоянием, $B_2 > B_1$, а $\vec{B}_D \uparrow\uparrow \vec{B}_2$. Вектор индукции снаружи от кольцевого тока направлен противоположно вектору магнитной индукции внутри кольцевого тока ④.

> ***Линии магнитной индукции — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.***

Магнитное поле — вихревое поле — поле с замкнутыми линиями магнитной индукции, не имеющими начала и конца. Это означает, что ***магнитное поле*** (в отличие от электрического) ***не имеет источников: магнитных зарядов*** (подобных электрическим) ***не существует.*** Магнитное поле более сложных конфигураций тока (двух витков ⑤, катушки из нескольких витков ⑥, U-образного магнита ⑦), предназначенных для усиления магнитного поля, можно найти по принципу суперпозиции. Французский ученый ***Андре Ампер*** выдвинул гипотезу, что

> ***магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него.***

Подобие линий индукции постоянного полосового магнита ⑧ и катушки с током наглядно подтверждает эту гипотезу. Магнитное поле Земли ⑨ напоминает поле полосового магнита: северный полюс N магнита подобен Южному полюсу Земли.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Магнитное поле кольцевого тока

Принцип суперпозиции

Результирующий вектор магнитной индукции в данной точке складывается из векторов магнитной индукции, созданной в этой точке различными токами :

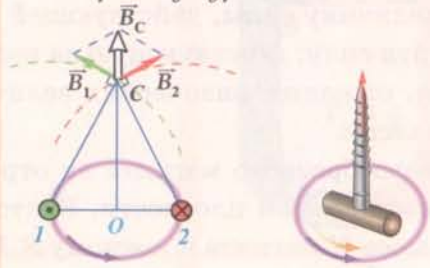
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + ... + \vec{B}_N$$

Индукция в центре витка (т. O)

①

Индукция на оси витка (т. C)

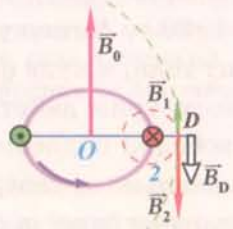
Направление индукции $\vec{B}_C$ определяется по правилу буравчика



②

Индукция вне витка (т. D)

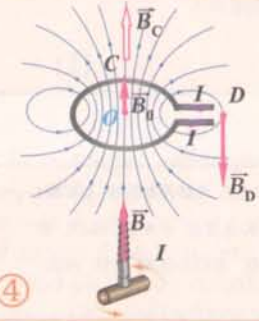
Направления индукции $\vec{B}_0$ внутри витка и $\vec{B}_D$ снаружи - противоположны



③

ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

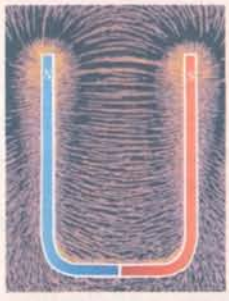
Виток с током



Линии магнитной индукции – *линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке*

④

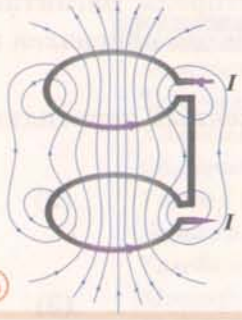
Постоянный U-образный магнит



Железные опилки выстраиваются вдоль линий индукции магнитного поля

⑦

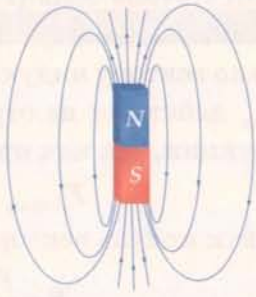
Линии индукции магнитного поля для двух витков



Линии магнитной индукции всегда замкнуты: они не имеют начала и конца

⑤

Постоянный полосовой магнит

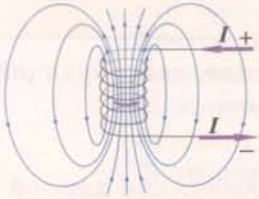


Северный полюс магнита – *полюс, из которого выходят линии магнитной индукции*

Южный полюс магнита – *полюс, в который входят линии магнитной индукции*

⑧

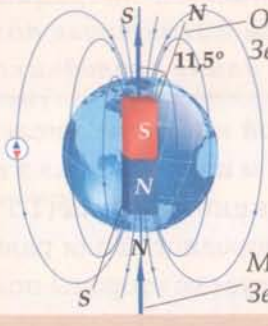
Линии индукции катушки с током



Магнитное поле – *вихревое поле, т.е. поле с замкнутыми линиями магнитной индукции*

⑥

Магнитное поле Земли



Линии индукции магнитного поля Земли подобны линиям индукции полосового магнита

⑨

§12. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Магнитное поле действует на магнитную стрелку. Согласно гипотезе Ампера внутри вещества, из которого изготовлена стрелка, циркулируют элементарные электрические токи. Поэтому для изучения свойств магнитного поля целесообразно изучить его действие на проводник с током. Зная направление и величину силы, действующей на каждый малый отрезок проводника (элемент тока), можно найти силу, действующую на весь проводник.

В 1820 г. Ампер установил, от каких физических величин зависит сила, действующая на элемент тока, и куда она направлена.

Рассмотрим действие подковообразного магнита на отрезок проводника длиной Δl, который свободно подвешен в горизонтальной плоскости. Вектор магнитной индукции направлен горизонтально от северного полюса N магнита к южному S. Если направление тока в проводнике составляет угол α с вектором $\vec{B}$, то сила Ампера (1), действующая на элемент тока I длиной Δl, определяется ***законом Ампера:***

Сила, с которой магнитное поле действует на помещенный в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями тока и магнитной индукции:

$$F_A = IB\Delta l \sin\alpha. \qquad (1)$$

Направление силы Ампера определяет ***правило левой руки*** (2):

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника.

Сила Ампера перпендикулярна как направлению тока, так и вектору магнитной индукции.

Опыт показывает, что в отсутствие тока ($I = 0$) в проводнике сила со стороны магнитного поля (сила Ампера) на проводник не действует. Она также отсутствует, если ток направлен параллельно или антипараллельно вектору индукции $\vec{B}$ (3).

Максимальная сила $F_{A\max}$ действует на отрезок проводника, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, так как при $\alpha = 90°$, $\sin\alpha = 1$ (4):

$$F_{A\max} = IB\Delta l. \qquad (2)$$

Из формулы (2) можно найти модуль вектора магнитной индукции:

$$B = \frac{F_{A\max}}{I\Delta l}. \qquad (3)$$

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину проводника.

Модуль вектора магнитной индукции численно равен максимальной силе, действующей на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А.

Единица магнитной индукции — *тесла* (1 Тл): 1 Тл = 1 Н/(А · м).

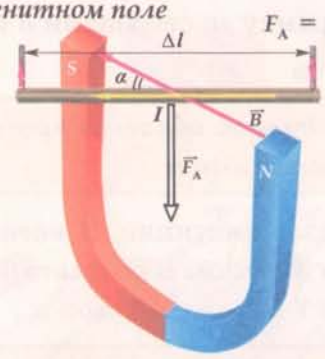
Магнитная индукция однородного поля равна 1 Тл, если на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля максимальная сила 1 Н.

Действие магнитного поля на проводник с током

ЗАКОН АМПЕРА

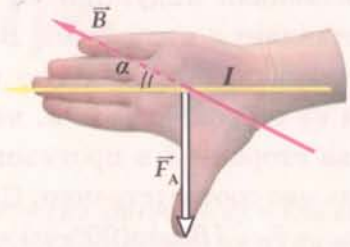
① *Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле*

$$F_A = IB\Delta l \sin\alpha$$



ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ

②

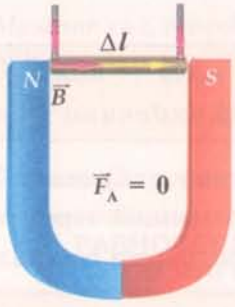


"Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника."

ПРОВОДНИК С ТОКОМ В ПЛОСКОСТИ МАГНИТА

③

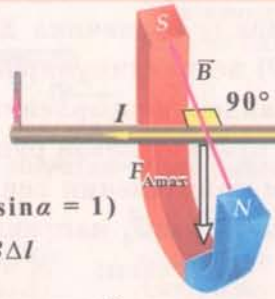
$$\alpha = 0 \ (\sin\alpha = 0)$$



Если направление тока совпадает с направлением вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля, сила Ампера на проводник не действует

МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

④



$\alpha = 90°$ $(\sin\alpha = 1)$

$F_{Amax} = IB\Delta l$

$$B = \frac{F_{Amax}}{I\Delta l}$$

Модуль магнитной индукции – *физическая величина, равная отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину отрезка проводника.*

Единица магнитной индукции – *тесла* (1 Тл)

1 Тл = 1 Н/А · м

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Источник	*Индукция, Тл*
Межзвездное пространство	10^{-10}
Тело человека	$3 \cdot 10^{-10}$
Холодильник (50 Гц)	10^{-6}
Солнечный свет	$3 \cdot 10^{-6}$
Тостер (50 Гц)	$3 \cdot 10^{-5}$
Линия электропередачи , поле Земли	$5 \cdot 10^{-5}$
Телевизор (50 Гц)	10^{-4}
Миксер	$3 \cdot 10^{-4}$
Юпитер (у полюсов)	$8 \cdot 10^{-4}$
Фен (50 Гц)	10^{-3}
Солнце (на поверхности)	10^{-2}
Полосовой магнит (вблизи полюсов)	10^{-2}
Керамический магнит	$2 \cdot 10^{-2}$
Предельное магнитное поле при длительном воздействии на человека	0,2
Солнечное пятно	0,3
Электромагнит (лабораторный)	5
Щадящее магнитное воздействие на бактерии и мышей	14
Сверхпроводник	40
Нейтронная звезда (на поверхности)	10^8
Атомное ядро (на поверхности)	10^{12}

§13. РАМКА С ТОКОМ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Выясним, как действует на прямоугольную проволочную рамку со сторонами a и b, по которой протекает сила тока I,

однородное магнитное поле — поле, для которого в некоторой области пространства вектор магнитной индукции $\vec{B}$ можно считать постоянным ①.

Выберем декартову систему координат X, Y, Z с осью Z вдоль индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля и осью X, проходящей через середины сторон 1 и 3 рамки. В результате поворота рамки вокруг оси X плоскость рамки составляет с плоскостью XY некоторый угол α.

Собственная индукция — индукция магнитного поля, созданного током, протекающим по рамке.

Согласно правилу буравчика для контурного тока собственная индукция $\vec{B}_0$ в центре рамки (в точке O) перпендикулярна плоскости рамки и составляет с индукцией $\vec{B}$ внешнего поля угол α. Найдем направления и величины сил, действующих на каждую из сторон рамки. Согласно правилу левой руки сила $\vec{F}_1$, действующая на сторону 1 рамки, направлена в положительном направлении оси X. Сила $\vec{F}_3$ действует на сторону 3 в противоположном направлении. Силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_4$ направлены против оси Y и вдоль нее соответственно. С помощью закона Ампера получаем: $F_1 = IBa\sin(90°+\alpha) = IBa\cos\alpha$, $F_3 = IBa\sin(90°-\alpha) = IBa\cos\alpha$, $F_2 = F_4 = IBb$.

Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$ лишь растягивают рамку. Пара сил $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_4$ стремится повернуть рамку вокруг оси X в направлении, показанном голубой стрелкой. Это означает, что их моменты относительно оси X ②:

$$M_2 = F_2 \cdot OK = IBb(a/2)\sin\alpha \qquad \text{и} \qquad M_4 = F_4 \cdot OK = IBb(a/2)\sin\alpha$$

складываются.

Момент сил, действующих на рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле,

$$M = M_2 + M_4 = ISB\sin\alpha, \qquad (1)$$

где S — площадь рамки ($S = ab$). Вращающий момент не действует на рамку ($M = 0$) в двух случаях: когда угол между собственной и внешней индукцией $\alpha = 0$ ③ и когда $\alpha = 180°$ ④. В первом случае равновесие рамки — устойчиво, во втором — неустойчиво.

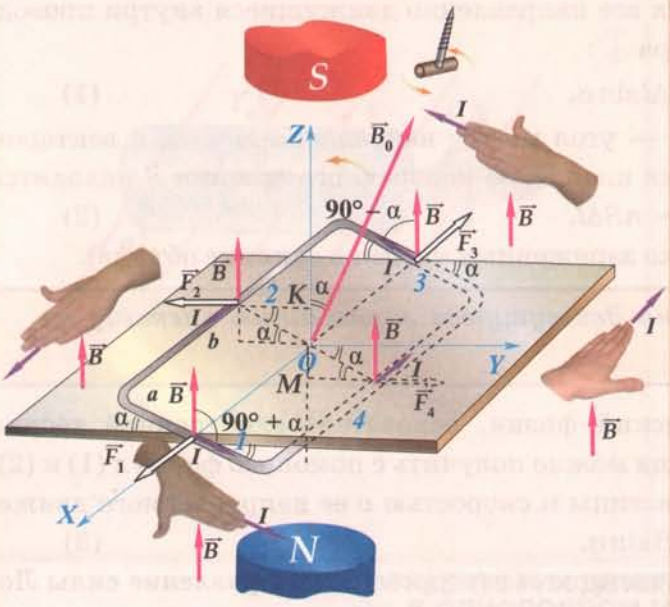
Витком тока является орбита электрона в атоме ⑤. Вращению электрона вокруг ядра со скоростью v_e соответствует ток I, протекающий в противоположную сторону. При включении внешнего магнитного поля плоскость орбиты атома выстраивается перпендикулярно направлению внешней индукции ⑥. Поворот рамки с током в магнитном поле используют в электроизмерительных приборах ⑦.

В электродвигателе постоянного тока рамка с током, находящаяся в положении неустойчивого равновесия, поворачивается на 180° вокруг горизонтальной оси к положению устойчивого равновесия. При прохождении этого положения коллектор изменяет направление тока в рамке на противоположное. В результате положение рамки становится вновь неустойчивым, и она по инерции продолжает вращение в прежнем направлении ⑧.

Рамка с током в однородном магнитном поле

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РАМКУ С ТОКОМ

①



$F_1 = IBa \sin(90° + \alpha) = IBa \cos\alpha$
$F_3 = IBa \sin(90° - \alpha) = IBa \cos\alpha$
$F_2 = F_4 = IBb \sin 90° = IBb$

ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ, ДЕЙСТВУЮЩИЙ НА РАМКУ С ТОКОМ

②

$M_2 = F_2 \cdot OK;\ M_4 = F_4 \cdot OM$

$M_2 = M_4 = IbB\,\frac{a}{2}\sin\alpha$

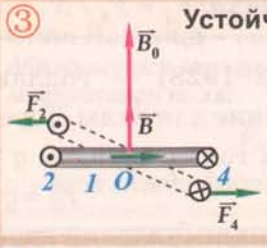
Момент сил, действующих на рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, равен

$$M = ISB\sin\alpha$$

S – площадь рамки (S = ab)

РАВНОВЕСИЕ РАМКИ С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

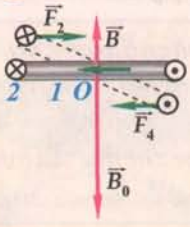
③ **Устойчивое равновесие (α = 0)**



При выведении рамки из положения равновесия силы Ампера возвращают ее.

$\vec{B}_0 \uparrow\uparrow \vec{B}$

④ **Неустойчивое равновесие (α = 180°)**

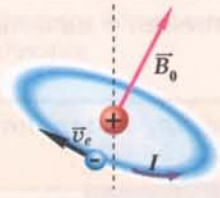


При выведении рамки из положения равновесия силы Ампера переводят ее в новое положение (α = 0)

$\vec{B}_0 \uparrow\downarrow \vec{B}$

ОРБИТА ЭЛЕКТРОНА В АТОМЕ – ВИТОК С ТОКОМ

Плоскость орбиты электрона в отсутствие внешнего магнитного поля: $\vec{B} = 0$
($\vec{B}_0$ – собственная индукция)



⑤

Ориентация плоскости орбиты электрона в атоме при $\vec{B} = 0$ произвольна

ОРИЕНТАЦИЯ ПЛОСКОСТИ ОРБИТЫ

Изменение положения плоскости орбиты электрона при помещении атома во внешнее магнитное поле $\vec{B}$.

⑥

В однородном магнитном поле замкнутый контур стремится установиться так, чтобы направление его собственной магнитной индукции $\vec{B}_0$ совпало с направлением индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

⑦ **Принципиальное устройство**

Поворот катушки происходит до тех пор, пока $M_{упр} = M$:

$C\varphi = INBS$, где φ – угол поворота рамки, N – число витков

$$I = \frac{C}{NSB}\cdot\varphi$$

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

⑧ **Принципиальная схема**

Рамка, оказываясь в положении неустойчивого равновесия, поворачивается на 180°. Изменение коллектором направления тока на противоположное вновь поворачивает рамку

§14. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Со стороны однородного магнитного поля на все направленно движущиеся внутри проводника заряженные частицы действует сила Ампера ①:

$$F_A = IB\Delta l \sin\alpha, \qquad (1)$$

где I — сила тока в проводнике длиной Δl, α — угол между направлением тока и вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В объеме V проводника площадью поперечного сечения S находится N частиц ②:

$$N = n\,V = nS\Delta l, \qquad (2)$$

где n — концентрация заряженных частиц (число заряженных частиц в единице объема).

Сила Лоренца — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля: $F_Л = F_A / N$.

Хендрик Лоренц (1853–1928) — голландский физик, основатель электронной теории строения вещества. Выражение для силы Лоренца можно получить с помощью формул (1) и (2), учитывая также связь силы тока с зарядом q частицы и скоростью v ее направленного движения ($I = qnvS$):

$$F_Л = qvB\sin\alpha, \qquad (3)$$

где α — угол между скоростью $\vec{v}$ заряженной частицы и вектором $\vec{B}$. Направление силы Лоренца определяет ***правило левой руки:***

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление скорости положительного заряда (или противоположное скорости отрицательного заряда), а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на данный заряд.

Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле зависит от угла α между ее скоростью и вектором магнитной индукции. Рассмотрим два важных частных случая: $\alpha = 0$ и $\alpha = 90°$

1. Заряженная частица влетает в магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции со скоростью $\vec{v}_\parallel \uparrow\uparrow \vec{B}$ ③, ④. В этом случае $\alpha = 0$, $\sin\alpha = 0$, $F_Л = 0$. В отсутствии силы Лоренца частица по инерции будет продолжать двигаться равномерно и прямолинейно с начальной скоростью $\vec{v}_\parallel$ вдоль линий магнитной индукции.

Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям индукции, движется равномерно вдоль этих линий.

2. Заряженная частица влетает в магнитное поле со скоростью $\vec{v}_\perp$ перпендикулярно линиям магнитной индукции ⑤, ⑥. В этом случае $\alpha = 90°$, $\sin\alpha = 1$, $F_Л = qv_\perp B$. Сила Лоренца, перпендикулярная скорости, заставляет частицу массой m двигаться по окружности радиуса R, сообщая частице центростремительное ускорение $a_n = v_\perp^2 / R$. Из второго закона Ньютона $mv_\perp^2 / R = qv_\perp B$, следует, что

$$R = m\,v_\perp / (qB). \qquad (4)$$

Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности.

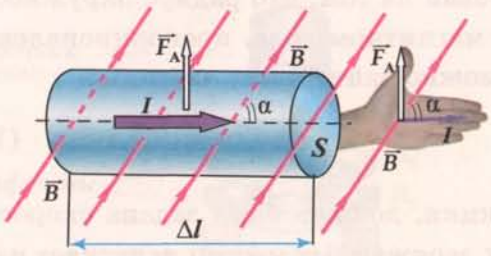
Направление вращения зависит от знака заряда.

Период обращения частицы по окружности $T = 2\pi R / v_\perp = 2\pi m / (qB)$.

Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы

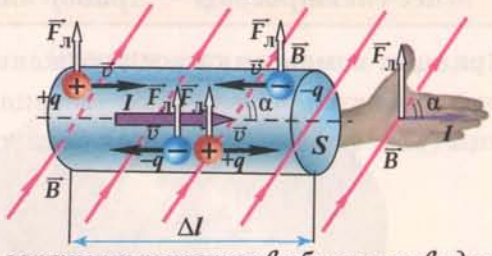
СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ТОК И ЗАРЯД

① Сила Ампера



$$F_A = I\Delta l B \sin\alpha$$

② Сила Лоренца



Число заряженных частиц в объеме проводника $N = nS\Delta l$, где n – концентрация заряженных частиц.

$$I = qnvS$$

Сила Лоренца – *сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля:*

$$F_л = \frac{F_A}{N} = qvB\sin\alpha$$

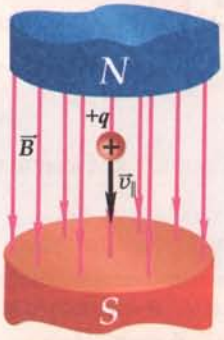
α – угол между вектором скорости $\vec{v}$ и вектором $\vec{B}$

ПЛОСКИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

③ $\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{B}$ $(q > 0)$

$\alpha = 0$

$F_л = 0$

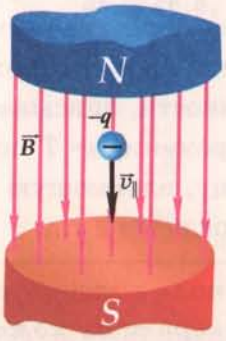


Положительно заряженная частица движется вдоль линий магнитной индукции

④ $\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{B}$ $(q < 0)$

$\alpha = 0$

$F_л = 0$

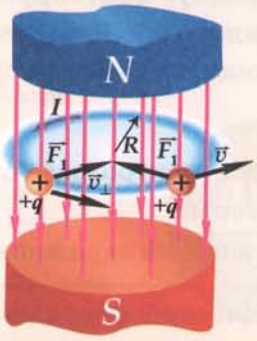


Отрицательно заряженная частица движется вдоль линий магнитной индукции

⑤ $\vec{v} \perp \vec{B}$ $(q > 0)$

$\alpha = 90°$

$F_л = qv_\perp B$



Второй закон Ньютона для частицы:

$$m\frac{v_\perp^2}{R} = qv_\perp B$$

$$R = \frac{mv_\perp}{qB}$$ –

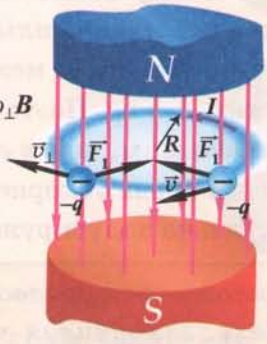
– циклотронный радиус

Положительно заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности

⑥ $\vec{v} \perp \vec{B}$ $(q < 0)$

$\alpha = 90°$

$F_л = qv_\perp B$



Период обращения частицы по окружности в поперечном магнитном поле

$$T = \frac{2\pi R}{v_\perp} = \frac{2\pi m}{qB}$$ –

не зависит от ее скорости

Вращение отрицательного заряда по окружности в поперечном магнитном поле происходит в направлении, противоположном вращению положительного заряда

§15. МАСС-СПЕКТРОГРАФ. ЦИКЛОТРОН

Масс-спектрограф — прибор для измерения масс заряженных частиц ①.

Принцип измерения масс заряженных частиц основан на том, что радиус окружности, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле, пропорционален массе частицы (§14, формула (4)). Зная радиус окружности, можно найти массу частицы:

$$m = \frac{qB}{v_\perp} R . \qquad (1)$$

Если известны заряд частицы и магнитная индукция, должна быть задана скорость $v_\perp$, с которой частица влетает в магнитное поле. Источник заряженных частиц испускает частицы с различными скоростями. Диафрагмы $Д_1$ и $Д_2$ направляют частицы в фильтр скоростей, который выделяет частицы с определенной скоростью $v_\perp$. В фильтре скоростей заряженная частица попадает во взаимно перпендикулярные электрическое (с напряженностью $\vec{E}_0$) и магнитное (с индукцией $\vec{B}_0$) поля. На ион, движущийся между пластинами конденсатора, действуют в противоположных направлениях две силы: электрическая $F_К = qE_0$ и магнитная (сила Лоренца) $F_Л = qv_\perp B_0$. Через диафрагму $Д_3$ пройдут только те ионы, для которых эти силы уравновешены: $qE_0 = qv_\perp B_0$, т.е. ионы, обладающие скоростью $v_\perp = E_0 / B_0$. Ионы, движущиеся с другими скоростями, через фильтр не пройдут. По местоположению следа, который оставляют ионы на фотопластинке, находят радиус полуокружности, описываемой ионом под действием поперечного магнитного поля с индукцией B. Масса иона определяется по формуле (1):

$$m = \frac{qBB_0}{E_0} R . \qquad (2)$$

С помощью подобных масс-спектрографов была определена масса всех химических элементов, обнаружены многие изотопы.

Для сообщения высоких энергий заряженным частицам используют ускорители.

Циклотрон — циклический ускоритель заряженных частиц, в котором заряженные частицы движутся под действием электрического и магнитного полей по раскручивающейся спирали ②.

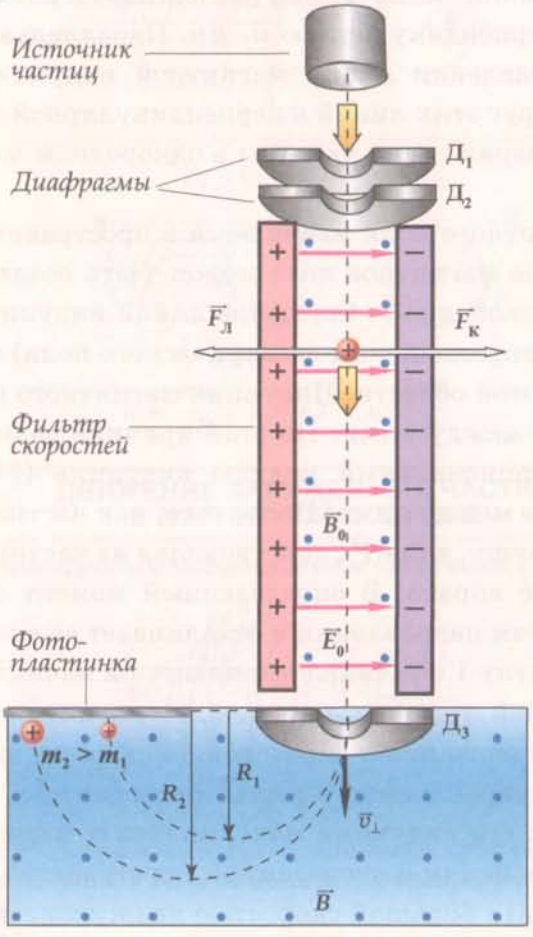
Рассмотрим процесс ускорения заряженных частиц до энергий, необходимых для бомбардировки частиц-мишеней ③. От источника И заряженная частица попадает в дуант 1 (пустотелый полуцилиндр, помещенный между полюсами сильного электромагнита) со скоростью v_1, двигаясь по полуокружности под действием силы Лоренца в течение промежутка времени $T/2$. В момент времени $t = T/2$ электрическое поле между дуантами ускоряет положительный заряд, влетающий в дуант 2 со скоростью $v_2 > v_1$. Поэтому радиус полуокружности, описываемой частицей в дуанте 2, оказывается большим, чем в дуанте 1. В момент времени $t = T$ полярность электрического тока изменяется и вновь ускоряет заряженную частицу, влетающую в дуант 1 со скоростью $v_3 > v_2$ и движущуюся по полуокружности еще большего радиуса и т.д.

Ускорение частиц в циклотроне производит электрическое поле в зазоре между дуантами. Магнитное поле, закручивая частицы, делает ускоритель компактным.

МАСС-СПЕКТРОГРАФ

Принципиальная схема масс-спектрографа

①



$$F_л = qv_\perp B_0$$

$$F_к = qE_0$$

$$F_к = F_л$$

$$qE_0 = qv_\perp B_0$$

$$v_\perp = \frac{E_0}{B_0}$$

$$R = \frac{mv_\perp}{qB}$$

$$m = \frac{qBB_0}{E_0} \cdot R$$

Масс-спектрограф – *прибор для измерения масс заряженных частиц*

ЦИКЛОТРОН

Принципиальная схема циклотрона

②

Циклотрон – *циклический ускоритель заряженных частиц, в котором они движутся под действием электрического и магнитного полей по раскручивающейся спирали. На последнем ее витке пучок быстрых заряженных частиц выводится наружу, бомбардируя частицы – мишени*

Ускорение заряженных частиц в циклотроне

③

$$t = \frac{T}{2} \qquad R_1 = \frac{mv_1}{qB}$$

$$t = T \qquad R_2 = \frac{mv_2}{qB}$$

$$t = \frac{3T}{2} \qquad R_3 = \frac{mv_3}{qB}$$

Электрическое поле в зазоре между дуантами ускоряет частицы.
Магнитное поле в дуантах закручивает частицы, делая ускоритель более компактным

§16. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТРАЕКТОРИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Скорость частицы, влетающей в ***однородное магнитное поле***, можно разложить на две составляющие — параллельную $\vec{v}_{\parallel}$ линиям индукции и перпендикулярную $\vec{v}_{\perp}$ им. Параллельная компонента скорости вызывает снос частицы в направлении линий магнитной индукции, а перпендикулярная определяет вращение частицы вокруг этих линий в перпендикулярной им плоскости ①. Результирующая траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле — ***винтовая линия***.

В неоднородном магнитном поле индукция магнитного поля изменяется в пространстве как по величине, так и по направлению. Неоднородное магнитное поле может быть создано двумя витками с токами, протекающими в одном направлении ②. Сгущение линий индукции в какой-либо пространственной области (как и линий напряженности электрического поля) означает большее значение индукции магнитного поля в этой области. Индукция магнитного поля вблизи витков с током больше, чем в пространстве между ними. По этой причине радиус винтовой линии траектории частицы, обратно пропорциональный модулю индукции (§14, формула (4)), меньше вблизи витков, чем в пространстве между ними. После того, как частица, двигаясь вправо по винтовой линии, пройдет среднюю точку, сила $\vec{F}$, действующая на частицу, приобретает компоненту $\vec{F}_{\parallel}$, тормозящую ее движение вправо. В определенный момент эта компонента силы останавливает движение частицы в этом направлении и отталкивает ее влево к витку 1. При приближении заряженной частицы к витку 1 она также тормозится и начинает циркулировать между витками, оказавшись в магнитной ловушке, или между «магнитными зеркалами». ***Магнитные ловушки*** используются для удержания в определенной области пространства высокотемпературной плазмы ($T \approx 10^6$ К) при управляемом термоядерном синтезе.

Неоднородным является магнитное поле Земли ③: его индукция максимальна у магнитных полюсов и минимальна вблизи экватора. В сторону Земли в околоземном пространстве из космического пространства (главным образом от Солнца) с большой скоростью движутся заряженные частицы космических лучей. Магнитное поле Земли как защитный пояс предохраняет поверхность планеты от попадания на нее этих частиц высокой энергии, изменяя их траектории, рассеивая наиболее быстрые частицы. Частицы с меньшей энергией попадают в магнитные ловушки, образуемые линиями индукции магнитного поля Земли, перемещаясь между полюсами Земли за время порядка 1 с. В результате торможения заряженных частиц вблизи полюсов, а также их столкновений с молекулами атмосферного воздуха возникает электромагнитное излучение (радиация), наблюдаемое, в частности, в виде полярных сияний ④. Спектральный состав излучения зависит от энергий заряженных частиц.

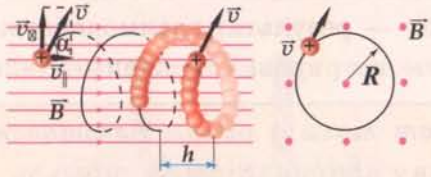
Радиационные пояса — области в атмосфере Земли с повышенной концентрацией заряженных частиц.

Во внешнем радиационном поясе, располагающемся на высоте от 12000 до 20000 км, большинство заряженных частиц составляют электроны. Протоны, обладающие большей массой, чем электроны, задерживаются лишь более сильным магнитным полем во внутреннем радиационном поясе на меньших высотах от 2400 до 6000 км.

Пространственные траектории заряженных частиц в магнитном поле

① ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

$B = \text{Const}$ $(q > 0)$

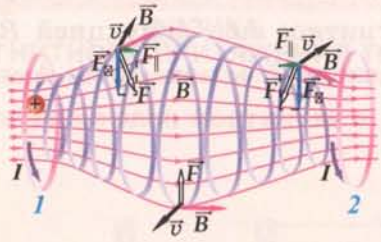


$(q < 0)$

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}; \quad h = v_{\parallel}T = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

② ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Неоднородное магнитное поле (два витка с током)

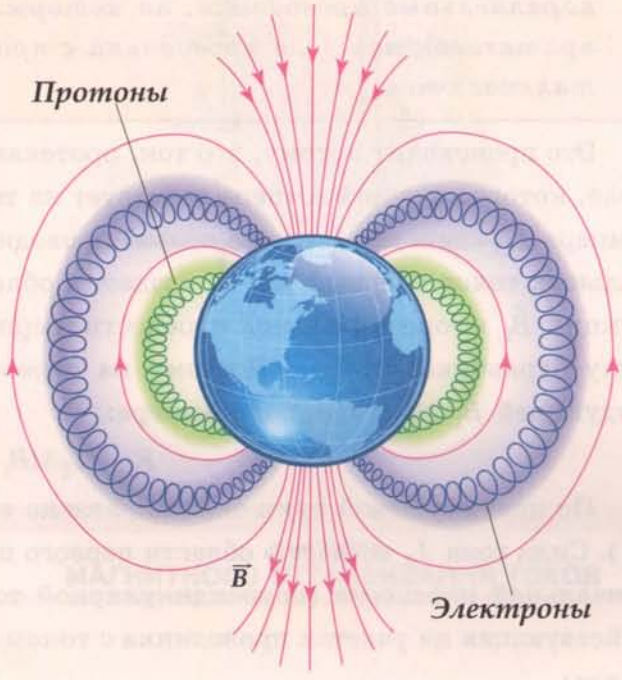


Заряженная частица тормозится, приближаясь к виткам 1 и 2, и начинает циркулировать между ними.

Магнитные ловушки используются для удержания в определенной области пространства высокотемпературной плазмы ($T \approx 10^6$ K) при управляемом термоядерном синтезе

③ РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ

Радиационные пояса – *области в атмосфере Земли с повышенной концентрацией заряженных частиц*



Внутренний радиационный пояс располагается на высоте от 2400 *до* 6000 *км*

Внешний радиационный пояс находится на высоте от 12000 *до* 20000 *км*

④ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Аляска, 2000

Норвегия, 2007

§17. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Магнитное поле действует на проводник с током с силой Ампера. С другой стороны, согласно гипотезе Ампера магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Поэтому магнитное взаимодействие тел — результат взаимодействия электрических токов, протекающих в этих телах. Ампер продемонстрировал экспериментально, что

параллельные проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются ①, а проводники с противоположно направленными токами отталкиваются ②.

Это происходит потому, что ток, протекающий в одном из проводников, создает магнитное поле, которое с силой Ампера действует на ток в другом проводнике ③. Найдем сначала силу Ампера $\vec{F}_{21}$, действующую на второй проводник с током I_2 со стороны первого в случае параллельных токов. Первый ток I_1 создает в области второго проводника магнитное поле. Его индукция $\vec{B}_1$ в горизонтальной плоскости (перпендикулярной второму току) направлена (по правилу буравчика) от нас. Поэтому на отрезок Δl второго проводника в магнитном поле с индукцией $\vec{B}_1$ действует сила Ампера:

$$F_{21} = I_2 \Delta l B_1 \sin 90^\circ = I_2 \Delta l B_1.$$

По правилу левой руки она направлена в горизонтальной плоскости влево (в сторону тока I_1). Сила тока I_2 создает в области первого проводника магнитное поле индукцией $\vec{B}_2$ в горизонтальной плоскости (перпендикулярной току I_1), направленной к нам. Сила Ампера $\vec{F}_{12}$, действующая на участок проводника с током I_1 длиной Δl, в магнитном поле с индукцией B_2 равна:

$$F_{12} = I_1 \Delta l B_2 \sin 90^\circ = I_1 \Delta l B_2.$$

По правилу левой руки сила $\vec{F}_{12}$ направлена в горизонтальной плоскости вправо (в сторону тока I_2). Таким образом, мы доказали, что параллельные проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются.

По третьему закону Ньютона: $F_{21} = F_{12}$, или $I_2 \Delta l B_1 = I_1 \Delta l B_2$. Последнее равенство означает, что индукция магнитного поля, созданного первым током, пропорциональна силе тока I_1, т.е. $B_1 \sim I_1$. Аналогично $B_2 \sim I_2$. Значит, сила взаимодействия проводников $F_{21} = F_{12} \sim I_1 I_2$. Опыты Ампера показали, что ***сила взаимодействия двух параллельных проводников*** длиной Δl, находящихся на расстоянии r друг от друга, по которым протекают силы тока I_1, I_2 ④

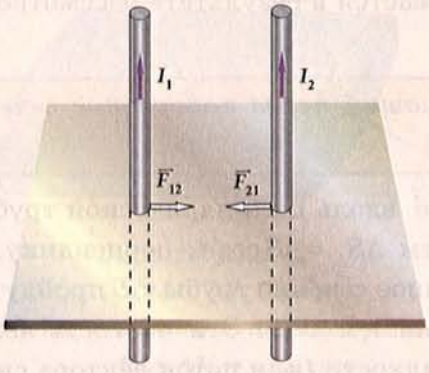
$$F_{21} = F_{12} = k_m I_1 I_2 \Delta l / r.$$

Коэффициент пропорциональности $k_m = 2 \cdot 10^{-7}$ Н/м^2. Единица силы тока — *ампер*.

1 А — сила постоянного тока, который, протекая по двум параллельным тонким проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

ПРИТЯЖЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ

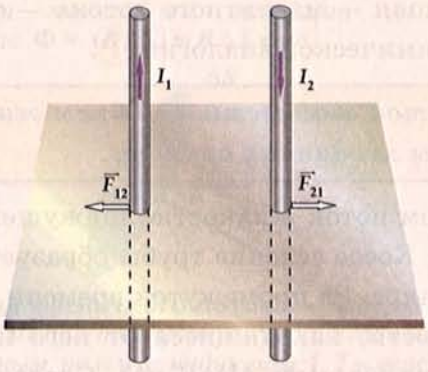
①



$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

ОТТАЛКИВАНИЕ АНТИПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ

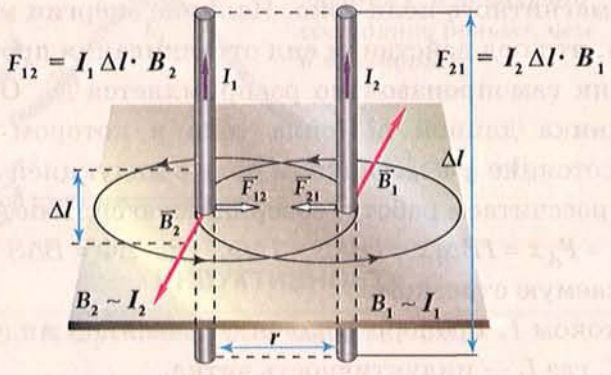
②



$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

ФИЗИКА МАГНИТНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ТОКОВ

③

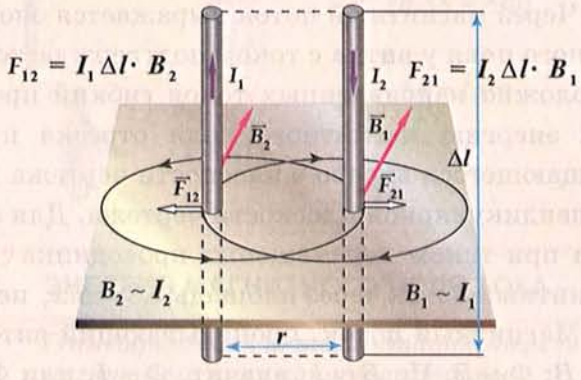


$$F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l \ , \ k_m = 2 \cdot 10^{-7} \ \text{Н/А}^2$$

$$B = k_m \frac{I}{r}$$

ФИЗИКА МАГНИТНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ ТОКОВ

④



Ампер – *сила постоянного тока, который, протекая по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную* $2 \cdot 10^{-7}$ Н

§18. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Понимание физического смысла и необходимости введения важной характеристики магнитного поля — магнитного потока — существенно облегчается в результате рассмотрении его гидродинамической аналогии ①.

Поток жидкости — объем жидкости, протекающий через поперечное сечение трубы за единицу времени.

Найдем поток жидкости, движущейся со скоростью $\vec{v}$ вдоль цилиндрической трубы сечением ΔS. Косое сечение трубы образует угол α с сечением $\Delta S_\perp = \Delta S \cos\alpha$, перпендикулярным оси цилиндра. За промежуток времени Δt сквозь поперечное сечение трубы ΔS пройдут частицы жидкости, находящиеся от него на расстоянии, меньшем $v\Delta t$. Эти частицы находятся в цилиндре объемом $\Delta V \Delta S_\perp v\Delta t$. Следовательно, поток жидкости (или поток вектора скорости) $\Phi_{\vec{v}} = v\Delta S\cos\alpha$. Часто вводится ***вектор площади контура*** $\overrightarrow{\Delta S}$, равный по модулю площади ΔS и направленный перпендикулярно площади по правилу буравчика для контурных токов. Необходимо лишь выбрать направление обхода контура, ограничивающего площадь. Тогда поток жидкости (или поток вектора скорости) определяется как скалярное произведение векторов $\vec{v}$ и $\overrightarrow{\Delta S}$: $\Phi_{\vec{v}} = (\vec{v}, \overrightarrow{\Delta S}) = v\Delta S\cos\alpha$. По аналогии

магнитный поток (поток магнитной индукции) через поверхность площадью ΔS — физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади ②: $\Phi = (\vec{B}\,\overrightarrow{\Delta S}) = B\Delta S\cos\alpha$,

где α — угол между векторами $\vec{B}$ и $\overrightarrow{\Delta S}$. Единица магнитного потока — *вебер* (1 Вб).

Через магнитный поток выражается энергия магнитного поля тока. Наличие энергии магнитного поля у витка с током подтверждается тем, что под действием сил отталкивания противоположно направленных токов гибкий проводник самопроизвольно распрямляется ③. Оценим энергию магнитного поля отрезка проводника длиной Δl (сила тока в котором I), смещающегося вправо в плоскости чертежа на расстояние x в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, перпендикулярной плоскости чертежа. Для этого рассчитаем работу, совершаемую силами Ампера при таком перемещении проводника ④: $\delta A = F_A x = IB\Delta l x = IB\Delta S = I\Delta\Phi$, где $\Delta\Phi = B\Delta S$ — магнитный поток через площадь $\Delta S = \Delta l x$, пересекаемую отрезком.

Магнитный поток, пронизывающий виток с током I, пропорционален собственной индукции B: $\Phi \sim B$. Но $B \sim I$, значит, $\Phi \sim I$, или $\Phi = LI$, где L — индуктивность витка.

Индуктивность контура — физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника, и силой тока в контуре ⑤.

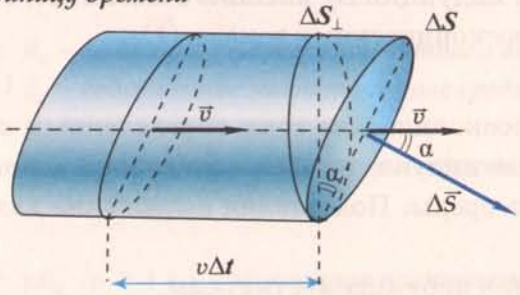
Единица индуктивности — генри (1 Гн). С помощью графика линейной зависимости $\Phi(I)$ можно найти элементарную работу при изменении силы тока в контуре на ΔI ⑥: $\delta A = I\Delta\Phi = LI\Delta I$. На графике δA — площадь трапеции с высотой ΔI и со средней линией LI_1. Суммарная работа и энергия магнитного поля в контуре определяется площадью прямоугольного треугольника со сторонами LI и I:

$$A = W_m = LI^2/2.$$

Магнитный поток. Энергия магнитного поля тока

① ПОТОК ЖИДКОСТИ

Поток жидкости – *объем ΔV_1 жидкости, протекающей сквозь поперечное сечение трубы за единицу времени*



$\Delta V_1 = \Delta S_\perp v\,\Delta t,\ \Delta S_\perp = \Delta S\cos\alpha$

Поток жидкости (или поток вектора скорости)

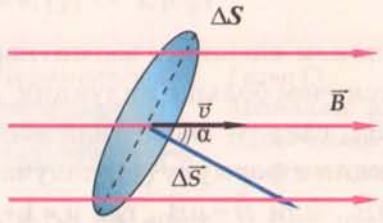
$$\Phi_{\vec{v}} = \Delta V_1 = v\,\Delta S\cos\alpha$$

или

$$\Phi_{\vec{v}} = (\vec{v}\,\Delta\vec{S})$$

② МАГНИТНЫЙ ПОТОК

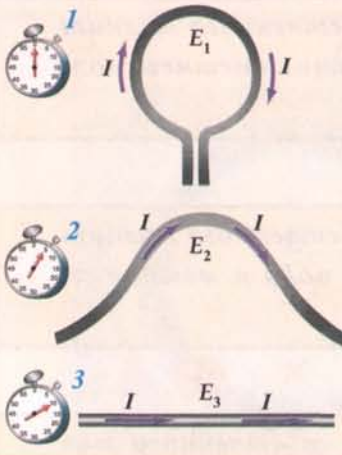
Магнитный поток (поток магнитной индукции) – *через поверхность площадью ΔS – физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади:* $\Phi = (\vec{B}\,\Delta\vec{S}) = B\,\Delta S\cos\alpha$



Единица магнитного потока – *вебер (1 Вб).*
1 Вб – *магнитный поток, созданный однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции*

③ ЭНЕРГИЯ ВИТКА С ТОКОМ

Распрямление витка с током в результате действия магнитных сил

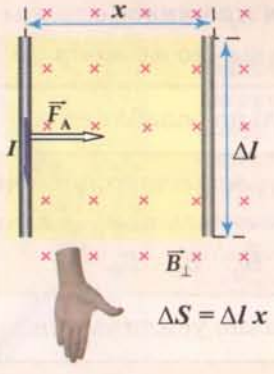


Самопроизвольный переход проводника из начального состояния 1 в конечное 3 (через промежуточное 2) означает, что его энергия E_1 в начальном состоянии больше, чем в конечном E_3

$$E_1 > E_2 > E_3$$

④ РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ СИЛОЙ АМПЕРА

Работа силы Ампера при перемещении проводника с током в магнитном поле



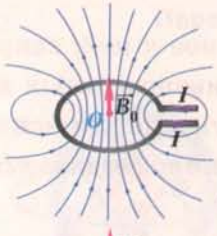
$\delta A = F_A x = IB\,\Delta l\,x$

$\delta A = IB\,\Delta S,$
$(B\,\Delta S = \Delta\Phi)$

$$\delta A = I\Delta\Phi$$

⑤ ИНДУКТИВНОСТЬ

Индуктивность контура с током



$\Phi \sim B;\ B \sim I$

$$\Phi = L\,I$$

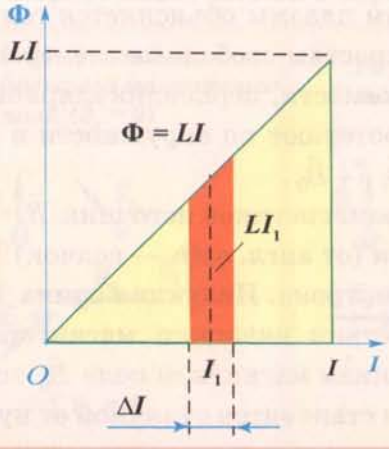
L – индуктивность витка.

Индуктивность контура – *физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника и силой тока в контуре.*

Единица индуктивности – *генри (1 Гн)*

⑥ ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Геометрическая интерпретация энергии магнитного поля контура с током



$\delta A = I\Delta\Phi,$
$(\Delta\Phi = L\Delta I)$

$\delta A = LI\Delta I$

$$A = \frac{LI^2}{2}$$

Энергия магнитного поля тока I

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

§19. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ. ДИА- И ПАРАМАГНЕТИЗМ

Магнитная индукция $\vec{B}$ в среде складывается из индукции $\vec{B}_0$ внешнего магнитного поля и собственной индукции $\vec{B}_c$ вещества, созданной микроскопическими токами ①:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c . \qquad (1)$$

Под действием внешнего магнитного поля микроскопические токи определенным образом ориентируются: чем больше индукция $\vec{B}_0$, тем больше индукция собственного магнитного поля среды: $\vec{B}_c = \chi \vec{B}_0$, где χ — магнитная восприимчивость среды. Подставляя выражение для собственной индукции в формулу (1), получаем:

$\vec{B} = (1+\chi)\vec{B}_0$, или $\vec{B} = \mu \vec{B}_0$, где $\mu = 1 + \chi$ — магнитная проницаемость среды.

Магнитная проницаемость среды — физическая величина, показывающая во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме: $\mu = B / B_0$.

Разная магнитная проницаемость веществ определяет различие их магнитных свойств. Существует три основных класса веществ с резко отличающимися магнитными свойствами: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетик — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля и значительно меньше его по модулю ②: $\vec{B}_c \uparrow\downarrow \vec{B}_0$, $B_c \ll B_0$ —

внешнее поле незначительно ослабляется.

Парамагнетик — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля сонаправлен вектору магнитной индукции внешнего поля и меньше его по модулю ③: $\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0$, $B_c < B_0$ —

внешнее поле незначительно усиливается.

Ферромагнетик — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля сонаправлен вектору магнитной индукции внешнего поля и значительно больше его по модулю ④: $\vec{B}_c \uparrow\uparrow \vec{B}_0$, $B_c \gg B_0$ —

внешнее поле значительно усиливается.

Диамагнетизм плазмы объясняется тем, что внешнее поле $\vec{B}_0$, приложенное к ней, закручивает по окружностям свободные электроны и положительные ионы в противоположных направлениях в плоскости, перпендикулярной $\vec{B}_0$ ⑤. Токи I_+ и I_-, соответствующие движению этих зарядов, протекают по окружности в одну сторону. Собственная индукция, создаваемая этими токами, $\vec{B}_c \uparrow\downarrow \vec{B}_0$.

В атомах парамагнетиков источник $\vec{B}_c$ — вращение валентного электрона вокруг собственной оси, или ***спин*** (от англ. spin — волчок) ⑥. Микроток I_s направлен противоположно скорости вращения электрона. Индукция спина $\vec{B}_s$ направлена по правилу буравчика вдоль оси вращения. В отсутствии внешнего магнитного поля расположение осей спинов хаотично ⑦: $\sum \vec{B}_s = 0$. Во внешнем магнитном поле $\vec{B}_0$ спины выстраиваются вдоль него ⑧: $\sum \vec{B}_s \neq 0$. Собственная индукция становится отличной от нуля и сонаправленной с внешней.

Магнитное поле в веществе. Диа- и парамагнетизм

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ СРЕДЫ

① *Магнитная индукция в среде*

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c,$$

где $\vec{B}_0$ – *индукция внешнего магнитного поля,*
$\vec{B}_c$ – *собственное магнитное поле среды*

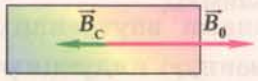
$\vec{B}_c = \chi \vec{B}_0$ (χ – *магнитная восприимчивость среды*)

$\vec{B} = \mu \vec{B}_0$ ($\mu = 1 + \chi$ – *магнитная проницаемость среды*)

Магнитная проницаемость среды – *физическая величина, показывающая во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме*

ТИПЫ МАГНЕТИКОВ

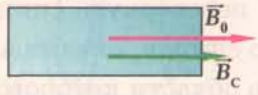
② *Диамагнетик*



$\chi < 0; |\chi| << 1, \mu \leq 1$

Газы: H_2, CO_2, He, N.
Металлы: Au, Ag, Cu, Bi.
Стекло, вода, соль, резина, алмаз, дерево, плазма

③ *Парамагнетик*



$\chi > 0; |\chi| \approx 1, \mu \approx 2$

Газы: O_2.
Металлы: Al, Pt, U.
Щелочные и щелочноземельные

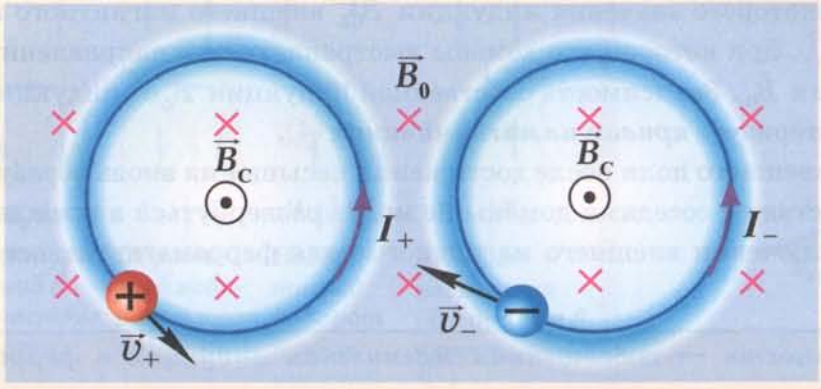
④ *Ферромагнетик*

$\chi > 0; |\chi| >> 1, \mu >> 1$

Металлы: Fe, Co, Ni, *их сплавы, редкоземельные элементы*

ДИАМАГНЕТИЗМ

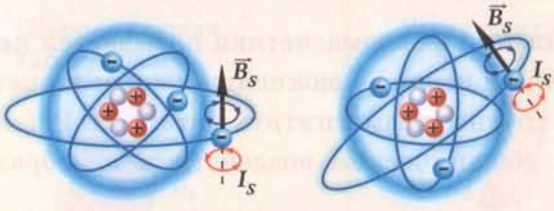
⑤ **Диамагнетизм плазмы**



Внешнее магнитное поле $\vec{B}_0$ *закручивает электроны и ионы, создавая электрические токи. Собственная индукция* $\vec{B}_c$, *создаваемая этими токами, будет ослаблять внешнее магнитное поле* $\vec{B}_0$

ПАРАМАГНЕТИЗМ

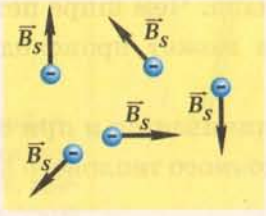
⑥ **Парамагнетизм лития**



В силу хаотичности расположения атомов результирующая собственная индукция в парамагнетике в отсутствие внешнего поля равна нулю

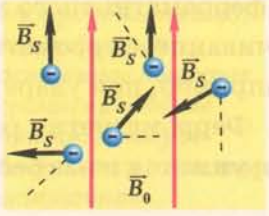
Ориентация спинов в парамагнетике

⑦ *В отсутствие внешнего магнитного поля* ($\vec{B}_0 = 0$)



$\sum \vec{B}_s = 0$

⑧ *Во внешнем магнитном поле* $\vec{B}_0$



$\sum \vec{B}_s \neq 0$

§20. ФЕРРОМАГНЕТИКИ

В атомах ферромагнетиков собственная индукция создается не только валентными электронами, но и электронами внутренних электронных оболочек. Это заметно увеличивает результирующую собственную индукцию атома. В результате взаимодействия атомов ферромагнетика энергетически выгодна параллельная ориентация спинов всех атомов. Однако ей препятствует магнитное взаимодействие спинов соседних атомов ①. Спин электрона атома 1 создает в области атома 2 магнитную индукцию $\vec{B}_1$, направленную против собственной индукции $\vec{B}_2$ и стремящуюся перевернуть спин 2. Однако взаимодействие атомов, вызывающее параллельную ориентацию спинов, оказывается сильнее. Переворот спина происходит, начиная с некоторого $N+1$ атома, в области которого N соседних атомов создали достаточную суммарную индукцию. Поэтому ***ферромагнетик состоит из хаотически ориентированных доменов*** (от франц. domaine — владение) — ***областей размером порядка 0,5 мкм, в пределах которых спины всех атомов параллельны.***

В отсутствие внешнего магнитного поля собственная индукция в ферромагнетике равна нулю ②.

Если индукция B_{01} внешнего магнитного поля, приложенного к ферромагнетику, невелика, происходит обратимый поворот доменов в направлении $\vec{B}_{01}$ и их рост. При выключении поля доменная структура восстанавливается. В более сильном поле $B_{02} > B_{01}$ поворот и рост доменов становится необратимым: начальная доменная структура не восстанавливается при выключении поля. Начиная с некоторого значения индукции B_{03} внешнего магнитного поля, возникает ***явление насыщения*** ③, при котором все домены выстраиваются в направлении индукции внешнего магнитного поля $\vec{B}_0$. Зависимость собственной индукции $\vec{B}_c$ от индукции $\vec{B}_0$ внешнего магнитного поля характеризует ***кривая намагничивания*** ④.

При уменьшении индукции внешнего поля после достижения насыщения вновь образуются домены. Однако из-за взаимодействия с соседями домены не могут развернуться в прежнее положение. Даже при полном выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным.

Остаточная намагниченность — собственная магнитная индукция в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля.

Магнито-жесткие ферромагнетики — ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность велика ⑤.

Магнито-мягкие ферромагнетики — ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность мала ⑥.

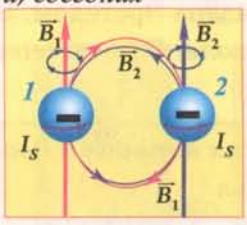
Замкнутая кривая намагничивания и размагничивания ферромагнетика называется ***петлей гистерезиса*** (от греч. hysteresis — отставание). Форма петли — важнейшая характеристика ферромагнитного материала. Чем шире петля, тем труднее размагнитить материал. Размагничивание ферромагнетика может происходить при механическом воздействии на образец (например, при ударе).

Ферромагнетик размагничивается и при сильном нагревании образца: доменная структура разрушается из-за беспорядочного теплового движения атомов.

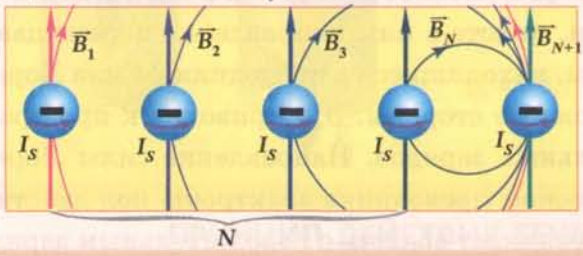
ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

① *Магнитное взаимодействие спинов*

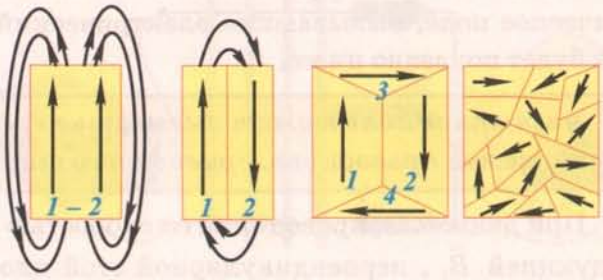
а) соседних



б) на значительных расстояниях



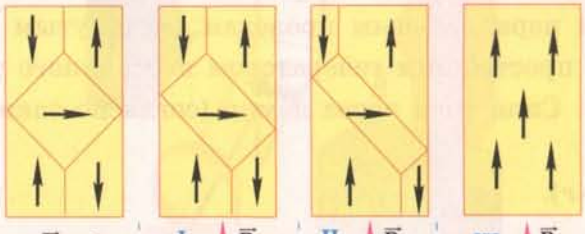
② *Деление доменов*



Собственная индукция в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля равна нулю

ФЕРРОМАГНЕТИК ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

③ *Изменение доменной структуры*



Структура доменов в отсутствие внешнего поля

Обратимый поворот и рост доменов

Необратимый поворот и рост доменов

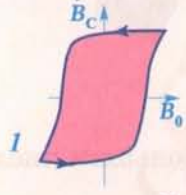
Явление насыщения (все домены в направлении $\vec{B}_0$)

④ *Кривая намагничивания*

ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА

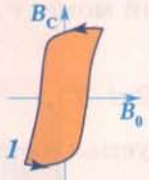
⑤ МАГНИТО-ЖЕСТКИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Широкая петля гистерезиса



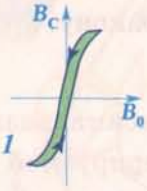
Применяются для изготовления постоянных магнитов из-за большой остаточной намагниченности

Узкая петля гистерезиса



Применяются для изготовления элементов памяти компьютеров, магнитных лент, кредитных карточек из-за высокой остаточной намагниченности и легкого перемагничивания

⑥ МАГНИТО-МЯГКИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ



Используются в устройствах (трансформаторах, электродвигателях), где требуется постоянное быстрое перемагничивание образца, которое облегчается из-за малой остаточной намагниченности

§21. ЭДС ИНДУКЦИИ В ПРОВОДНИКЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Взаимосвязь электрических и магнитных явлений впервые была доказана Эрстедом. Электрическое поле, вызывающее электрический ток, порождает магнитное поле. В свою очередь, как будет показано ниже,

магнитное поле может вызывать перераспределение электрических зарядов в движущемся проводнике, приводя к возникновению электрического поля ①.

При движении проводника со скоростью $\vec{v}$ вправо в плоскости чертежа в магнитном поле с индукцией $\vec{B}_\perp$, перпендикулярной этой плоскости, вместе с ним направленно перемещаются свободные положительные и отрицательные заряды, находящиеся в проводнике. Сила Лоренца действует на разноименные заряды в противоположные стороны. Это приводит к пространственному разделению положительных и отрицательных зарядов. Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки. В металлическом проводнике электроны под действием силы Лоренца смещаются вниз. При этом сверху возникает область с положительным зарядом. Напряженность электрического поля $\vec{E}$ направлена от плюса к минусу. Разделение зарядов заканчивается, когда кулоновская сила $F_K = qE$ притяжения разноименных зарядов становится равной силе Лоренца $F_Л = qvB_\perp$: $qE = qvB_\perp$. Напряженности $E = vB_\perp$, на концах проводника соответствует разность потенциалов U, или ***ЭДС индукции*** $\mathscr{E}_i = U = El = vB_\perp l$.

Проводящая перемычка, движущаяся по двум параллельным проводам, замкнутым на лампу и помещенным в магнитное поле, является простейшим генератором постоянного тока ②. Вольтметр фиксирует разность потенциалов. Сила тока через лампу (согласно закону Ома для замкнутой цепи) равна:

$$I = vB_\perp l/(R+r).$$

В проводнике, движущемся в магнитном поле, происходит преобразование механической энергии проводника в энергию электрического поля. Для большей компактности основным элементом ***генератора переменного электрического тока*** является проводящая рамка, вращающаяся в магнитном поле постоянного магнита ③. Во вращение рамку может приводить паровая машина, двигатель внутреннего сгорания, гидротурбина и т.д. Противоположные стороны рамки присоединены к кольцам, с которых с помощью гибких контактов (щеток) снимается индуцированный заряд. Возникающий ток I_i фиксируется осциллографом. Положения рамки показаны через каждую четверть периода T ее вращения. При $t = 0$ и $t = T/2$ заряды не разделяются, так как линейные скорости сторон параллельны вектору магнитной индукции $\vec{B}$ и $F_Л = 0$. Когда $t = T/4$ и $t = 3T/4$, значения ЭДС индукции в сторонах рамки будут одинаковы, а их знак противоположен. В произвольный момент времени t ЭДС генератора изменяется по гармоническому закону:

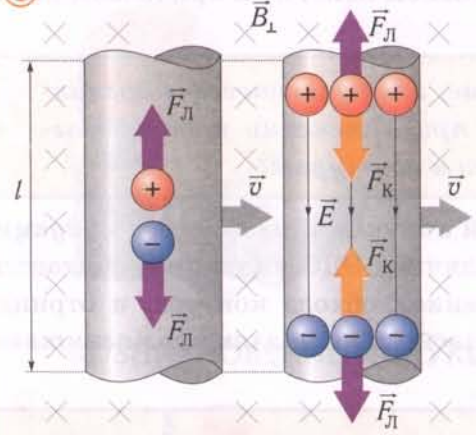
$$\mathscr{E}_i = \mathscr{E}_{i\,\max}\sin(2\pi t/T),$$

где $\mathscr{E}_{i\,\max} = 2\pi BS/T$ — максимальная ЭДС, индуцируемая в рамке площадью S.

Для увеличения генерируемой ЭДС вместо рамки используют катушку с большим числом витков, называемую ***ротором***.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЗАРЯДОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

①



$F_К = F_Л$

$F_К = qE$

$F_Л = q v B_\perp$

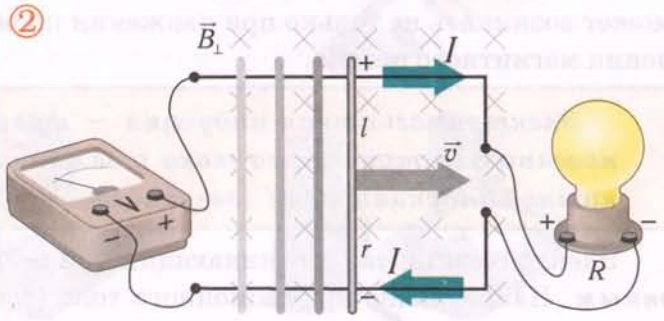
$E = v B_\perp$

$\mathcal{E}_i = U$

$\mathcal{E}_i = v B_\perp l$

ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩЕМСЯ ПРОВОДНИКЕ

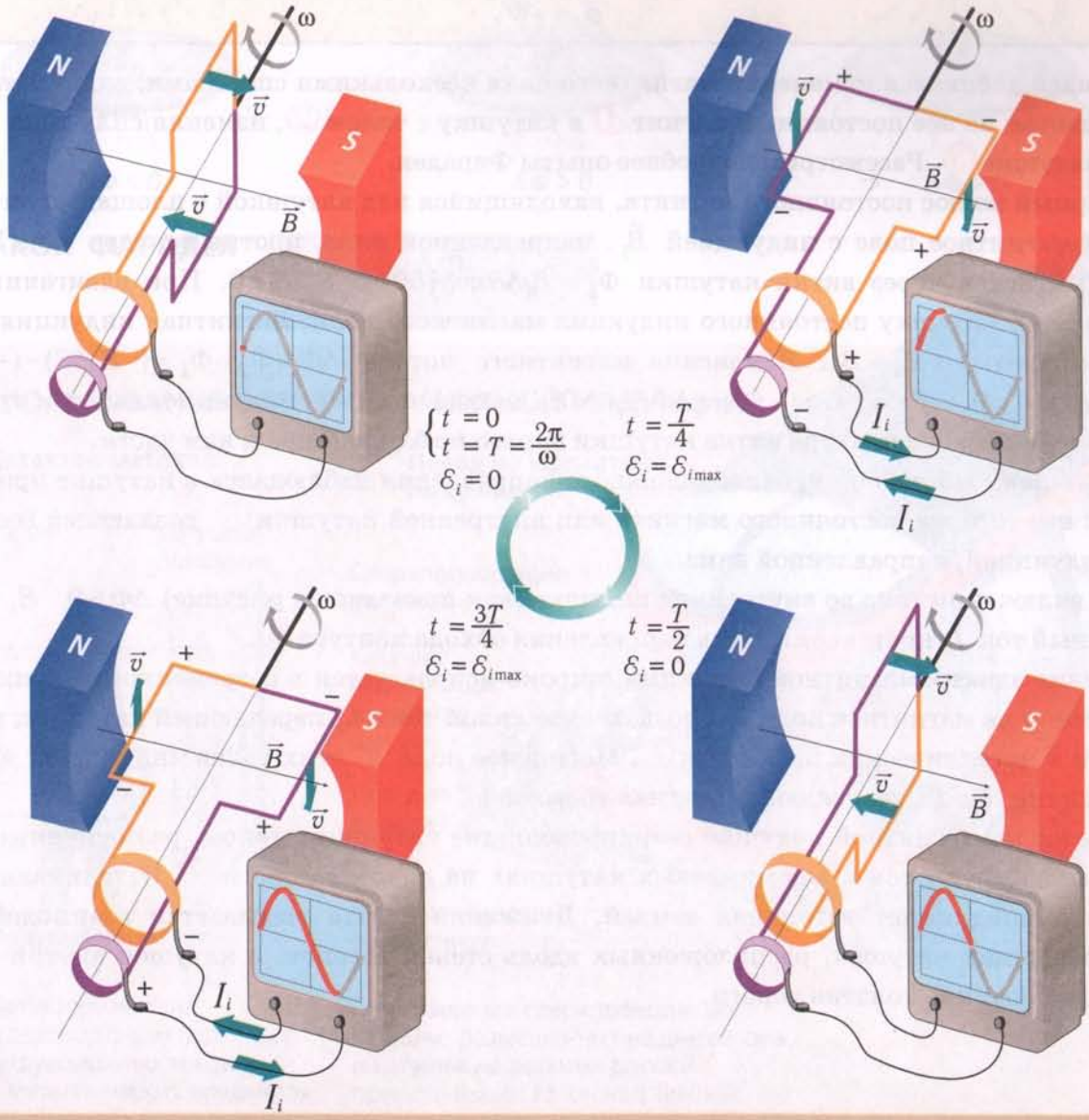
②



$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R+r} = \frac{v B_\perp l}{R+r}$$

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

③



§22. ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ С КАТУШКАМИ

В 1831 г. английский физик ***Майкл Фарадей*** установил, что электрический ток в контуре может возникать не только при движении проводника в магнитном поле, но и при любом изменении магнитного потока.

> ***Электромагнитная индукция — физическое явление, заключающееся в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.***

Электрический ток, возникающий при электромагнитной индукции, называется ***индукционным***. Направление индукционного тока (так же как и величина ЭДС индукции) считается положительным, если оно совпадает с выбранным направлением обхода контура, и отрицательным, если оно противоположно этому направлению. Согласно ***закону электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла***:

> ***ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.***
>
> $$\mathscr{E}_i = -\Phi'.$$

Фарадей добивался изменения магнитного поля несколькими способами: вдвигая в катушку и выдвигая из нее постоянный магнит ① и катушку с током ②, изменяя силу тока во внутренней катушке ③. Рассмотрим подробнее опыты Фарадея.

Северный полюс постоянного магнита, находящийся над катушкой с площадью витка ΔS, создавал магнитное поле с индукцией $\vec{B}_1$, направленной вниз, против вектора $\Delta\vec{S}$. Поэтому магнитный поток через витки катушки $\Phi_1 = B_1 \Delta S \cos 180° = -B_1 \Delta S < 0$. При вдвигании северного полюса в катушку постоянного индукция магнитного поля, магнитная индукция возрастает по модулю ④: $B_2 > B_1$. Изменение магнитного потока $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (-B_2\Delta S) - (-B_1\Delta S) = -(B_2 - B_1)\Delta S < 0$, поэтому $\mathscr{E}_i = -\Phi' = -\Delta\Phi / \Delta t > 0$. Это означает, что индукционный ток протекает в направлении обхода контура витка катушки вправо по ближайшей к нам части.

Индукционный ток I_i противоположного направления наблюдался в катушке при выдвигании из нее того же постоянного магнита или внутренней катушки ⑤, создающей магнитное поле с индукцией, направленной вниз.

При включении тока во внутренней катушке (как показано на рисунке) $\Delta\Phi > 0$, $\mathscr{E}_i < 0$. Индукционный ток I_i протекает против направления обхода контура ⑥.

Явление электромагнитной индукции широко используется в современной технике. В детекторе металла магнитное поле $\vec{B}_0$, создаваемое силой тока I_0 передающей катушки, индуцирует токи в металлических предметах ⑦. Магнитное поле $\vec{B}'$ этих токов индуцирует в катушке-приемнике ток I', запускающий сигнал тревоги.

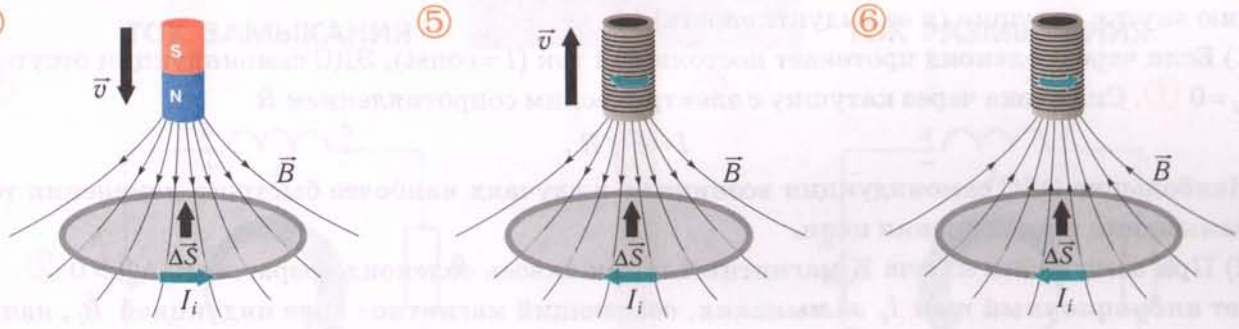
В поезде на магнитной подушке сверхпроводящие катушки с током, размещенные на дне вагона, индуцируют ток в алюминиевых катушках на полотне дороги ⑧. Отталкивание этих катушек приподнимает вагон над землей. Движение поезда вызывается взаимодействием сверхпроводящих катушек, расположенных вдоль стенок вагонов, и катушек внутри ограничительных бортиков полотна дороги.

СПОСОБЫ ИНДУЦИРОВАНИЯ ТОКА В КАТУШКЕ

① ② ③

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА

④ ⑤ ⑥



$\Delta\Phi < 0$ $\Delta\Phi > 0$ $\Delta\Phi > 0$

ЗАКОН ФАРАДЕЯ

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'$$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

⑦ Детектор металла

Детектор металла в аэропорте фиксирует поля индукционных токов в металлических предметах

⑧ Поезд на магнитной подушке

Отталкивание сверхпроводящих катушек, размещенных на дне вагона, и катушек на полотне дороги приподнимает вагон над землей

§23. ОПЫТЫ ГЕНРИ

В опытах Фарадея индукционный ток в катушке возникал вследствие изменения индукции внешнего магнитного поля. Американский ученый ***Джозеф Генри*** в 1832 г. впервые наблюдал возникновение индукционного тока при изменении тока, протекающего в самой катушке.

> ***Самоиндукция — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.***

Собственный ток вызывает изменение магнитного потока и возникновение ЭДС самоиндукции:

$$\mathscr{E}_{si} = -\Phi' = -LI', \qquad (1)$$

так как $\Phi = LI$, где L — индуктивность катушки. В опытах с индукционными токами используют ***соленоиды — катушки с ферромагнитным сердечником***, увеличивающим в μ раз индукцию внутри катушки (и ее индуктивность).

1) Если через соленоид протекает постоянный ток ($I = \text{const}$), ЭДС самоиндукции отсутствует $\mathscr{E}_{si} = 0$ ①. Сила тока через катушку с электрическим сопротивлением R

$$I = \mathscr{E} / R .$$

Наибольшие ЭДС самоиндукции возникают в случаях наиболее быстрого изменения тока: при замыкании и размыкании цепи.

2) При замыкании ключа К магнитный поток сквозь соленоид возрастает: $\Delta\Phi > 0$ ②. Возникает ***индукционный ток I_i замыкания***, создающий магнитное поле индукцией $\vec{B}_i$, направленной против внешнего поля $\vec{B}$. Полярность ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока через катушку: положительные заряды оказываются в точке a, а отрицательные — в точке b. Электрическая лампа, соединенная последовательно с соленоидом, загорается с запаздыванием при включении тока. Реально ЭДС самоиндукции тормозит движение электронов в проводнике, из которого сделана катушка. С течением времени, когда магнитный поток перестает изменяться ($\Phi = 0$), ЭДС самоиндукции согласно формуле (1) становится равной нулю и устанавливается сила тока $I = \mathscr{E} / \mathrm{R}$.

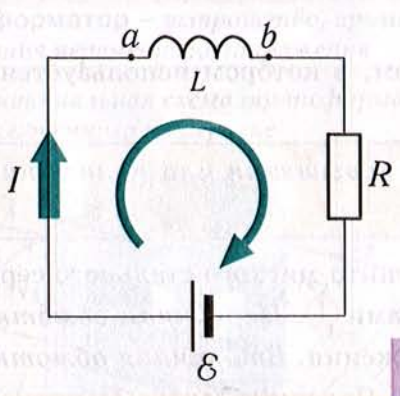
3) При размыкании ключа К ток самоиндукции протекает в ту же сторону, что и до размыкания ③. Его поддерживает ЭДС самоиндукции: отрицательные заряды оказываются в точке a, а положительные — в точке b. Оценим промежуток времени, в течение которого ток самоиндукции будет протекать в разомкнутой цепи после ее размыкания. Согласно закону Ома для L-R цепи $I_{si} = \mathscr{E}_{si} / R = -LI' / R$. Изменение тока в единицу времени

$$I' = (-I)/(LR) = (-I)/\tau_L . \qquad (2)$$

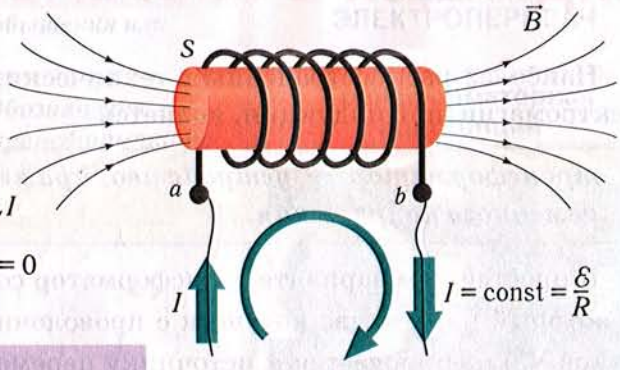
Величина $(-I)$ в числителе формулы (2) характеризует полное изменение тока при размыкании. Следовательно, промежуток времени $\tau_L = LR$ в знаменателе (1) определяет по порядку величины время протекания *тока размыкания*, или ***время релаксации L-R цепи***. Время релаксации является характеристикой инерционных свойств любой электрической цепи. В случае L-R цепи оно определяет как время протекания тока размыкания, так и время нарастания тока замыкания.

Процесс самоиндукции задерживает увеличение и уменьшение тока в электрических схемах и линиях передачи сигналов, приводя к искажению передаваемой информации.

① ПОСТОЯННЫЙ ТОК В L-R ЦЕПИ

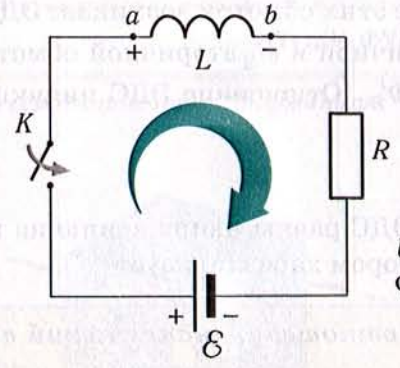


$\Phi = BSN = LI$
$\Phi = \text{const}$
$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 0$

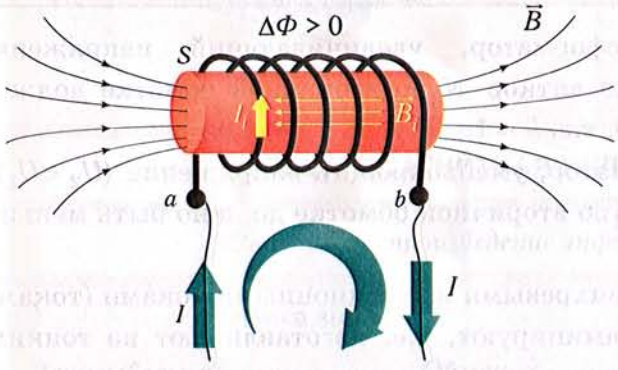


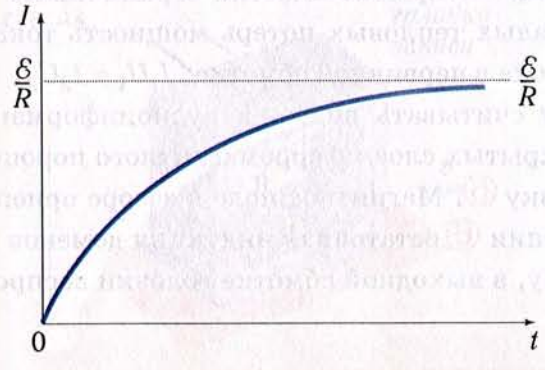
$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

② ТОК ЗАМЫКАНИЯ

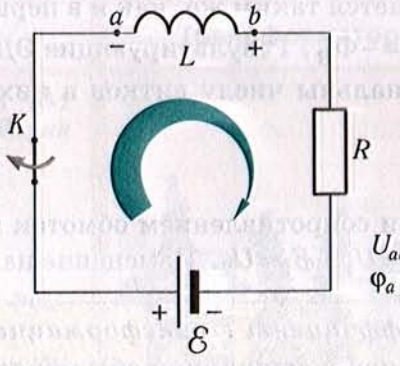


$U_{ab} > 0$
$\varphi_a > \varphi_b$

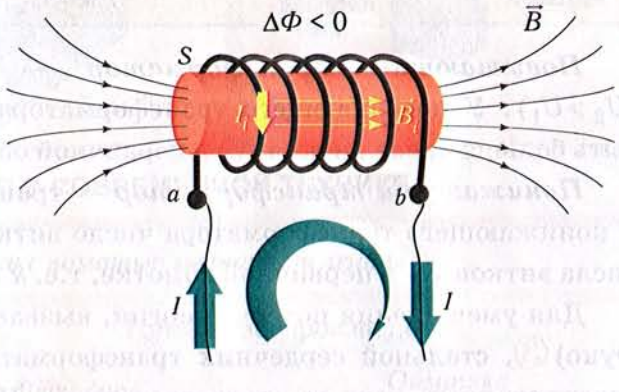


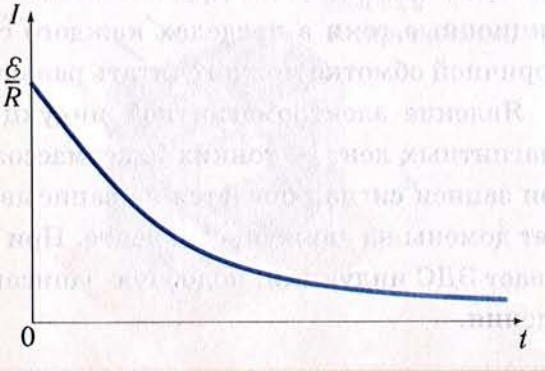


③ ТОК РАЗМЫКАНИЯ



$U_{ab} < 0$
$\varphi_a < \varphi_b$





§24. ТРАНСФОРМАТОР. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Наиболее распространенным техническим устройством, в котором используется явление электромагнитной индукции, является

трансформатор — устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения.

В простейшем варианте трансформатор состоит из магнито-мягкого стального сердечника, на который надеты две катушки с проволочными обмотками ①. ***Первичная обмотка*** (число витков N_1) подключается к источнику переменного напряжения. ***Вторичная обмотка*** (число витков N_2) подключается к нагрузке (сопротивлению $R_н$). Явление электромагнитной индукции следующим образом используется при работе трансформатора. Переменный ток I_1, протекающий в первичной обмотке, создает в сердечнике переменное магнитное поле $B(t)$, концентрирующееся внутри сердечника. Поэтому магнитный поток Φ_B во вторичной обмотке оказывается таким же, как и в первичной. В каждом витке этих обмоток возникает ЭДС индукции $\mathscr{E}_i = -\Phi'_B$. Результирующие ЭДС индукции $\mathscr{E}_1$ в первичной и $\mathscr{E}_2$ вторичной обмотках пропорциональны числу витков в них: $\mathscr{E}_1 = -N_1\Phi'_B$; $\mathscr{E}_2 = -N_2\Phi'_B$. Отношение ЭДС индукции в обмотках

$$\mathscr{E}_1 / \mathscr{E}_2 = N_1 / N_2.$$

Если сопротивлением обмоток можно пренебречь, то ЭДС равны напряжению на их зажимах: $\mathscr{E}_1 \approx U_1$; $\mathscr{E}_2 \approx U_2$. Изменение напряжения трансформатором характеризует

коэффициент трансформации — величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора ②.

$$k = U_1 / U_2 = N_1 / N_2.$$

Повышающий трансформатор — трансформатор, увеличивающий напряжение ($U_2 > U_1$). У повышающего трансформатора число витков N_2 во вторичной обмотке должно быть больше числа витков N_1 в первичной обмотке, т.е. $k < 1$.

Понижающий трансформатор — трансформатор, уменьшающий напряжение ($U_2 < U_1$). У понижающего трансформатора число витков N_2 во вторичной обмотке должно быть меньше числа витков N_1 в первичной обмотке, т.е. $k > 1$.

Для уменьшения потерь энергии, вызванных вихревыми индукционными токами (токами Фуко) ③, стальной сердечник трансформатора ламинируют, т.е. изготавливают из тонких, изолированных друг от друга пластин ④. Изолирующее покрытие пластин ограничивает индукционные токи в пределах каждого слоя. Из-за малых тепловых потерь мощность тока во вторичной обмотке можно считать равной мощности тока в первичной обмотке: $I_1U_1 = I_2U_2$.

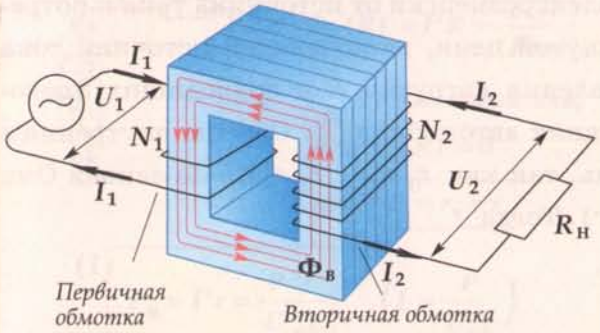
Явление электромагнитной индукции позволяет считывать видео- и аудиоинформацию с магнитных лент — тонких пластмассовых лент, покрытых слоем ферромагнитного порошка. При записи сигнал подается на записывающую головку ⑤. Магнитное поле в зазоре ориентирует домены на движущейся ленте. При воспроизведении ⑥ остаточная индукция доменов вызывает ЭДС индукции, подобную записанному сигналу, в выходной обмотке головки воспроизведения.

Трансформатор. Электромагнитная индукция в современной технике

ТРАНСФОРМАТОР

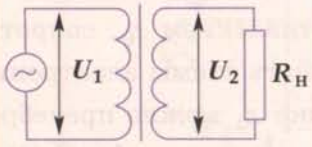
Трансформатор – *устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения*

① *Принципиальная схема трансформатора, подключенного к нагрузке*



$$I_1U_1 = I_2U_2$$

② *Обозначение трансформатора на схемах*



Коэффициент трансформации

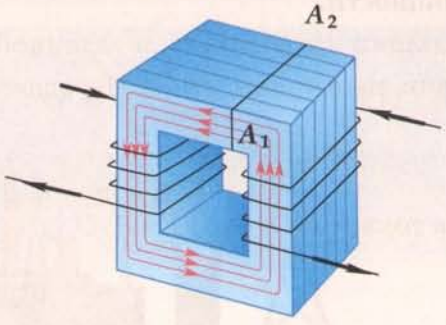
$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

ТРАНСФОРМАТОРЫ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Трансформаторная подстанция

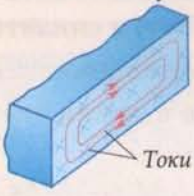
ТОКИ ФУКО

③ *В сердечнике трансформатора*



④ *В сечении $A_1 - A_2$*

а) без ламинирования



б) с ламинированием

Трансформаторы

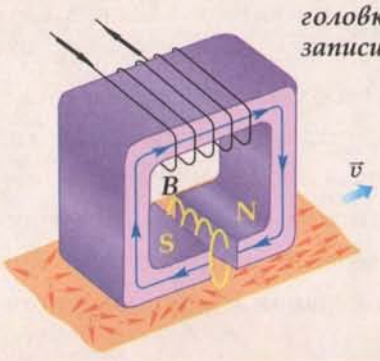
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Запись и воспроизведение информации с помощью магнитной ленты

⑤ Головка записи

Записываемый сигнал

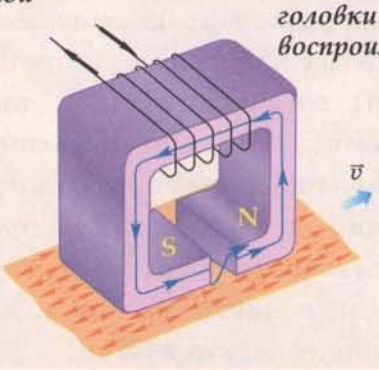
Обмотка головки записи



⑥ Головка воспроизведения

Выходной сигнал

Обмотка головки воспроизведения



§25. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Электроэнергия производится вблизи источников топлива или гидроресурсов, в то время как ее потребители находятся повсеместно. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния. Схему передачи электроэнергии от источника тока к потребителю можно представить в виде простейшей замкнутой цепи, включающей источник тока с ЭДС $\mathscr{E}$ и внутренним сопротивлением r_0, сопротивления нагрузки R и подводящих проводов r ①. Такова, например, часть схемы электропитания автомобиля ②. Обычно внутренним сопротивлением источника тока r_0 можно пренебречь, так как $r_0 \ll r$, $r_0 \ll R$. Из закона Ома для замкнутой цепи следует, что сила тока $I = \mathscr{E}/(R+r)$. Тогда

$$\mathscr{E} = I(R+r). \qquad (1)$$

Умножая обе части равенства (1) на I, получаем

$$\mathscr{E}I = I^2R + I^2r, \text{ или } P = P = P_н + P_п. \qquad (2)$$

Мощность сторонних сил $P = \mathscr{E}I$, разделяющих разноименные заряды в источнике тока, частично передается потребителю (нагрузке) $P_н = I^2R$ — ***полезная мощность***, частично идет на нагревание проводов $P_п = I^2r$ — ***потери мощности***.

При передаче электроэнергии важно доставить потребителю максимальную полезную мощность (это удается сделать при $R = r$) и снизить потери мощности.

Выясним, от чего зависят потери мощности $P_п$ в подводящих проводах. При заданной, известной мощности P источника тока в линии электропередачи сила тока $I = P/\mathscr{E}$. Передаваемое напряжение на полюсах источника тока

$$U_{ab} = \mathscr{E} - Ir_0.$$

Если пренебречь внутренним сопротивлением источника тока, то $\mathscr{E} = U_{ab}$, $I = P/U_{ab}$.

Тогда потери мощности

$$P_п = I^2r = \frac{P^2}{U_{ab}^2}r. \qquad (3)$$

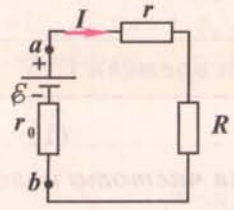
При большой длине линии электропередачи ее электрическое сопротивление r становится значительным. Ввиду того, что

> ***потери мощности в линии обратно пропорциональны квадрату передаваемого напряжения U_{ab},***

их уменьшают за счет повышения этого напряжения. Обычно генераторы переменного тока на электростанциях вырабатывают напряжение, не превышающее 20 кВ, так как при больших напряжениях резко возрастает возможность электрического пробоя изоляции в катушке (обмотке) и других частях генератора ③. Для снижения потерь мощности напряжение в ЛЭП должно быть максимальным, поэтому на крупных электростанциях ставят повышающие трансформаторы. Однако напряжение в линии электропередачи ограничено: при слишком высоком напряжении между проводами возникают разряды, приводящие к потерям энергии. Для использования электроэнергии на промышленных предприятиях, местных электросетях, индивидуальными потребителями требуется значительное снижение напряжения, осуществляемое с помощью понижающих трансформаторов. В России и странах ЕС используется переменное напряжение с частотой 50 Гц.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

① ***Потеря мощности в подводящих проводах***



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

$$P_{\text{н}}(R) = I^2R = \frac{\mathcal{E}^2R}{(R+r)^2}$$

$P_{\text{н}}(R)$ ***–максимальна,***

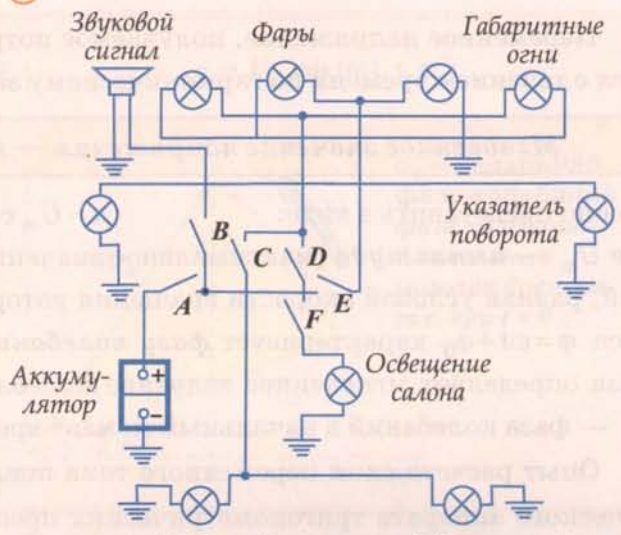
если $P'_{\text{н}}(R) = 0$

при $\boxed{R = r_0 + r}$

$$\boxed{P_{\text{п}} = I^2r = \frac{P^2r}{U^2_{ab}}} \quad \left(I = \frac{P}{U_{ab}}\right)$$

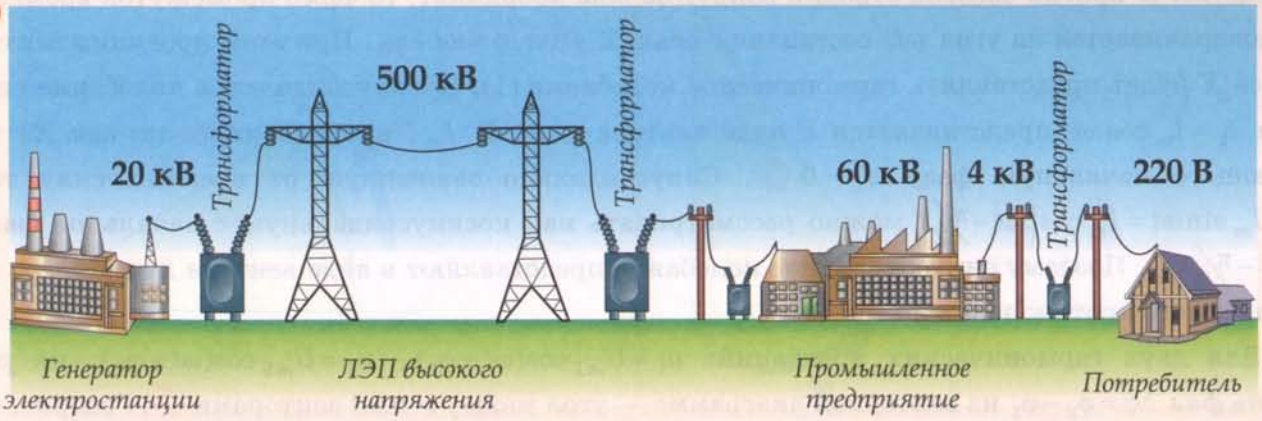
Потеря мощности в подводящих проводах обратно пропорциональна квадрату напряжения на источнике тока

② ***Схема электропитания автомобиля***



ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАССТОЯНИЕ И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

③



ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ (ЛЭП)

ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ПОДСТАНЦИЯ

§26. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Переменное напряжение, получаемое потребителем от электростанции через ЛЭП, изменяется с течением времени по гармоническому закону.

Мгновенное значение напряжения — напряжение в данный момент времени t

можно представить в виде: $u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$, (1)

где U_m — ***амплитуда*** (максимальное значение) напряжения, ω — ***круговая частота*** колебаний, равная угловой скорости вращения ротора генератора электростанции ①. Аргумент косинуса $\varphi = \omega t + \varphi_0$ характеризует ***фазу колебаний*** в момент времени t. При заданной амплитуде фаза определяет мгновенное значение колеблющейся величины. ***Начальная фаза колебаний*** φ_0 — фаза колебаний в начальный момент времени, т.е. при $t = 0$.

Опыт расчета схем переменного тока показал, что вместо достаточно громоздкого математического аппарата тригонометрических преобразований удобно использовать ***метод векторных диаграмм***, в котором гармоническое колебание (1) представляют в виде вектора ②. Модуль U_m этого вектора равен амплитуде колебаний, а угол, образуемый вектором с осью X, равен начальной фазе колебаний φ_0. Если этот вектор вращается в плоскости XY с угловой скоростью ω против часовой стрелки вокруг начала координат, то через промежуток времени t он поворачивается на угол ωt, составляя с осью X угол $\varphi = \omega t + \varphi_0$. При этом проекция вектора на ось X будет представлять гармоническое колебание (1). Косинусоидальное колебание силы тока $i_1 = I_m \cos\omega t$ представляется в виде вектора длиной I_m, направленного по оси X, т.е. имеющего начальную фазу $\varphi_0 = 0$ ③. Синусоидально зависящую от времени силу тока $i_2 = I_m \sin\omega t = I_m \cos\left(\omega t - \pi/2\right)$ можно рассматривать как косинусоидальную с начальной фазой $\varphi_0 = -\pi/2$ ④. Поэтому синусоидальное колебание представляют в виде вектора длиной I_m, направленного противоположно оси Y.

Для двух гармонических колебаний: $u_1 = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$, $u_2 = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$, их ***разность фаз*** $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ на векторной диаграмме — угол между этими векторами ⑤. Говорят, что второе колебание опережает первое по фазе на $\Delta\varphi$, или что первое колебание отстает по фазе от второго на $\Delta\varphi$.

Сложение колебаний на векторной диаграмме происходит по правилу сложения векторов,

т.е. по правилу параллелограмма или треугольника ⑥. С помощью векторной диаграммы найдем результат сложения двух колебаний одинаковой амплитуды U_m.

$u_1 = U_m \cos\omega t$ — вектор, с модулем U_m, направленный по оси X.

$u_2 = U_m \sin\omega t$ — вектор, с модулем U_m, направленный противоположно оси Y.

Сложение векторов дает вектор с модулем $U_m\sqrt{2}$ и начальной фазой $\left(-\pi/4\right)$.

Векторные диаграммы для описания переменных токов

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

① ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

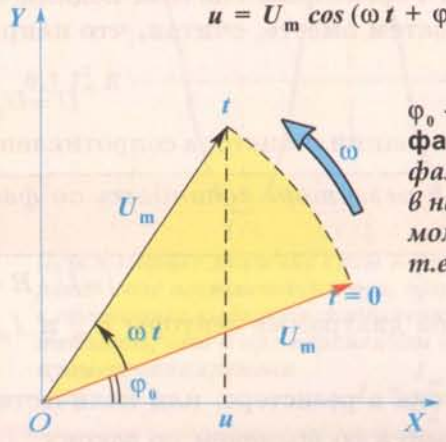
Мгновенное значение напряжения – напряжение в данный момент времени t

$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$, *где* U_m *– амплитуда напряжения,* $\varphi = \omega t + \varphi_0$ *– фаза колебаний*

Фаза колебаний – *аргумент функции, описывающей гармонические колебания*

② ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$

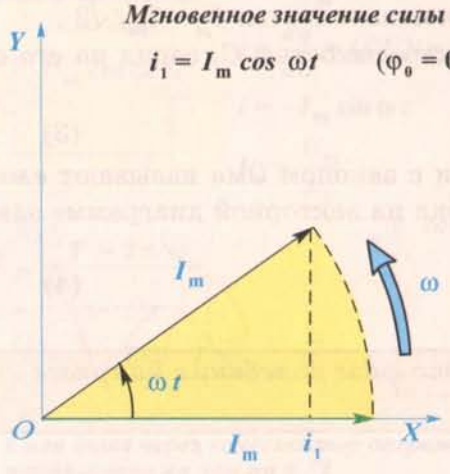


φ_0 – начальная фаза колебаний – *фаза колебаний в начальный момент времени, т.е. при* $t = 0$

③ КОСИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Мгновенное значение силы тока

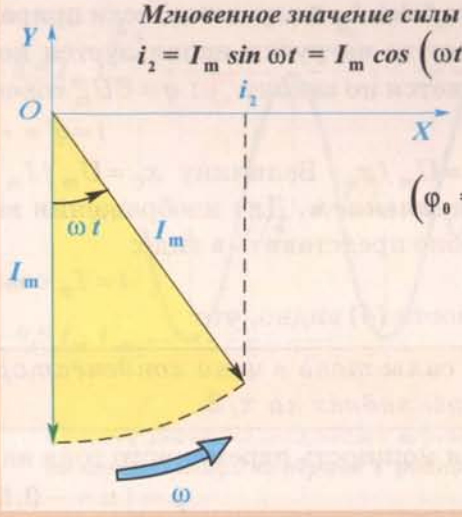
$i_1 = I_m \cos \omega t \quad (\varphi_0 = 0)$



④ СИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Мгновенное значение силы тока

$i_2 = I_m \sin \omega t = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$



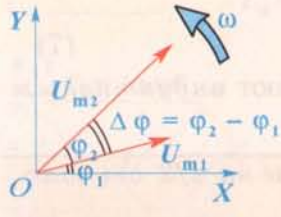
$\left(\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}\right)$

⑤ РАЗНОСТЬ ФАЗ ДВУХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Мгновенные значения напряжений

$u_1 = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$;

$u_2 = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$



$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ *– разность фаз двух колебаний*

Второе колебание опережает первое по фазе на $\Delta\varphi$

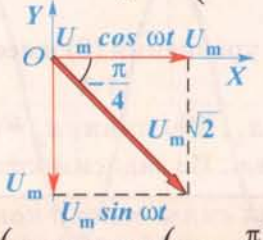
Первое колебание отстает по фазе от второго на $\Delta\varphi$

⑥ СЛОЖЕНИЕ ДВУХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Мгновенные значения напряжений

$u_1 = U_m \cos \omega t$;

$u_2 = U_m \sin \omega t = U_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$



$$u_1 + u_2 = U_m\left(\cos \omega t + \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right) =$$

$$= 2U_m \cos\frac{\pi}{4} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$$

$$u_1 + u_2 = U_m \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$$

§27. РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР, КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основными элементами цепи переменного тока являются резистор, конденсатор и катушка индуктивности. Рассмотрим сначала подключение каждого из этих элементов к генератору в отдельности, а затем вместе, считая, что напряжение на генераторе изменяется по гармоническому закону:

$$U = U_m \cos\omega t\,. \qquad (1)$$

При использовании резистора сопротивлением R в качестве нагрузки

сила тока в резисторе совпадает по фазе с напряжением в любой момент времени ①:

$$i = U/R = I_m \cos\omega t\,. \qquad (2)$$

На векторной диаграмме векторы U_m и I_m имеют нулевую начальную фазу и направлены по оси X.

Мощность тока в резисторе, или количество теплоты, выделяющееся в резисторе в единицу времени, изменяется со временем по закону ②: $P_{\sim} = I_m^2 \cos^2 \omega t$. Количество теплоты, выделяющееся в резисторе за период переменным током, $\overline{P}_{\sim} = 0{,}5 I_m^2 R$. Такое же количество теплоты выделяется в резисторе за период при протекании постоянного тока $I_Д$: $P_{=} = I_Д^2 R$. Действующее значение переменного тока $I_Д$ получается, если приравнять эти количества теплоты: $I_Д = \mathrm{I_m}/\sqrt{2}$.

Если в качестве нагрузки используется конденсатор электроемкостью C, заряд на его обкладках изменяется по закону ③: $q = CU_m \cos\omega t$, а сила тока

$$i = q' = -I_m \sin\omega t, \qquad (3)$$

где $I_m = \omega C U_m = U_m / x_C$. Величину $x_C = U_m / I_m$ в соответствии с законом Ома называют ***емкостным сопротивлением***. Для изображения вектора силы тока на векторной диаграмме зависимость (3) удобно представить в виде:

$$i = I_m \cos\left(\omega t + \pi/2\right). \qquad (4)$$

Из зависимости (4) видно, что

колебания силы тока в цепи конденсатора опережают по фазе колебания напряжения на его обкладках на $\pi/2$.

Мгновенная мощность переменного тока на конденсаторе

$$p = i\,u = -\,0{,}5\; I_m U_m \sin 2\omega t. \qquad (5)$$

Из графика зависимости (5) от времени следует, что среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период равно нулю ④.

При использовании катушки индуктивностью L в качестве нагрузки генератора переменного тока ⑤ ЭДС самоиндукции ($-Li'$) равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки, созданному генератором:

$$Li' = U_m \cos\omega t. \qquad (6)$$

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$i = I_m \sin\omega t = I_m \cos\left(\omega t - \pi/2\right), \qquad (7)$$

где $I_m = U_m / x_L$. Величину $x_L = \omega L$ в соответствии с законом Ома называют ***индуктивным сопротивлением***. Из зависимости (7) видно, что

колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на $\pi/2$ ***от колебаний напряжения на ней.***

Мгновенная мощность переменного тока на катушке ⑥

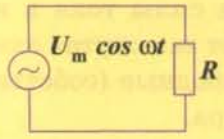
$$p = i\,u = 0{,}5\; I_m U_m \sin 2\omega t. \qquad (8)$$

Среднее значение мощности переменного тока на катушке за период равно нулю.

Резистор, конденсатор, катушка индуктивности в цепи переменного тока

① РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема включения

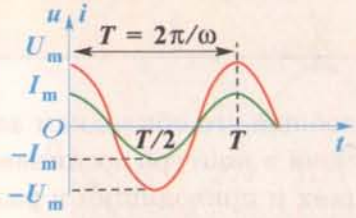


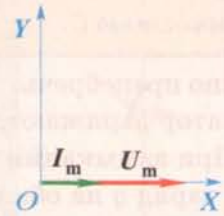
$u = U_m \cos \omega t$

$i = \frac{u}{R} = I_m \cos \omega t$

$I_m = \frac{U_m}{R}$

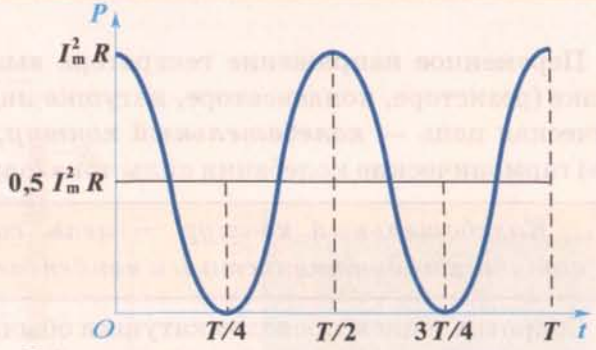
R – активное сопротивление





Напряжение и сила тока в резисторе совпадают по фазе в любой момент времени

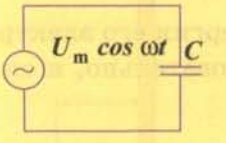
② МОЩНОСТЬ ТОКА В РЕЗИСТОРЕ



Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при котором в проводнике выделяется такое же количество теплоты, что и при переменном токе за тот же промежуток времени $I_д = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

③ КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема включения



$u = U_m \cos \omega t$

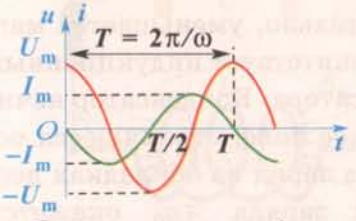
$i = \frac{dq}{dt} = (CU)' = CU_m(\cos \omega t)'$

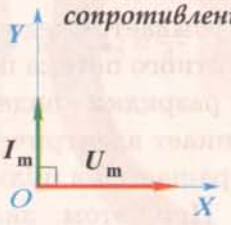
$i = -I_m \sin \omega t$

$I_m = \frac{U_m}{x_c}$

$x_c = \frac{1}{\omega C}$

емкостное сопротивление

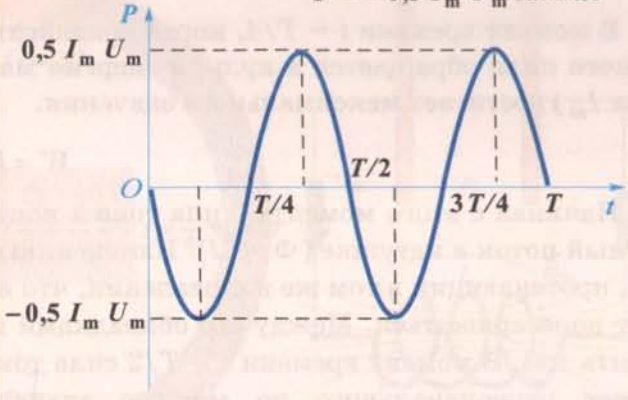




Сила тока через конденсатор опережает напряжение на нем на $\pi/2$

④ МОЩНОСТЬ ТОКА НА КОНДЕНСАТОРЕ

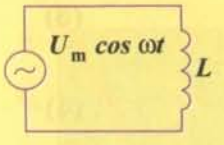
$P = -0{,}5\ I_m\ U_m \sin 2\omega t$



Среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период T равно нулю

⑤ КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема включения



$u = U_m \cos \omega t$

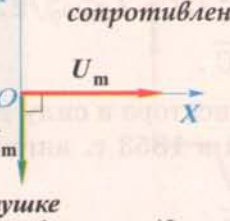
$Li' = U_m \cos \omega t$

$i = I_m \sin \omega t$

$I_m = \frac{U_m}{x_L}$

$x_L = \omega L$

индуктивное сопротивление



Колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на $\pi/2$ ***от колебаний напряжения на ней***

⑥ МОЩНОСТЬ ТОКА В КАТУШКЕ

$P = 0{,}5\ I_m\ U_m \sin 2\omega t$

Среднее значение мощности переменного тока в катушке индуктивности за период T равно нулю

§28. СВОБОДНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Переменное напряжение генератора вызывает вынужденные колебания силы тока в нагрузке (резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности). Однако существует замкнутая электрическая цепь — ***колебательный контур***, в которой могут возникать свободные (собственные) гармонические колебания силы тока (заряда) даже в отсутствие генератора.

Колебательный контур — цепь, состоящая из последовательно включенных катушки индуктивности L и конденсатора емкостью C.

Сопротивлением проводов катушки обычно можно пренебречь.

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор заряжают, сообщая его обкладкам заряды $\pm q_0$ и энергию электрического поля $q_0^2/2C$. При замыкании ключа в контуре возникает возрастающий со временем ток I, нейтрализующий заряд q на обкладках и приводящий к разрядке конденсатора. В результате

полная энергия электромагнитного поля W в любой момент времени сохраняется,

оставаясь равной энергии электрического поля конденсатора в начальный момент времени:

$$W = q^2/2C + LI^2/2 = q_0^2/2C. \qquad (1)$$

В момент времени $t = T/4$, когда конденсатор полностью разрядится, энергия его электрического поля обращается в нуль, а энергия магнитного поля катушки (следовательно, и сила тока I_m) достигает максимального значения.

$$W = LI_m^2/2 \qquad (2)$$

Начиная с этого момента, сила тока в контуре убывает. Следовательно, уменьшается магнитный поток в катушке ($\Phi = LI$). Изменению магнитного потока препятствует индукционный ток, протекающий в том же направлении, что и ток разрядки конденсатора. Конденсатор начинает перезаряжаться. Между его обкладками возникает электрическое поле, стремящееся ослабить ток. В момент времени $t = T/2$ сила тока обращается в нуль, а заряд на обкладках достигнет первоначального по модулю значения. При этом знак заряда $\mp q_0$ окажется противоположным первоначальному. Далее те же процессы начнут протекать в обратном направлении и через такой же промежуток времени $T/2$, т.е. в момент времени $t = T$, система вернется в первоначальное состояние. После этого начнется самопроизвольное повторение рассмотренного цикла. В отсутствие потерь на нагревание проводов в контуре совершаются гармонические колебания заряда на

$$q = q_0 \cos \omega_0 t \qquad (3)$$

Соответственно сила тока в катушке индуктивности изменяется по закону:

$$I = q' = -I_m \sin \omega_0 t, \qquad (4)$$

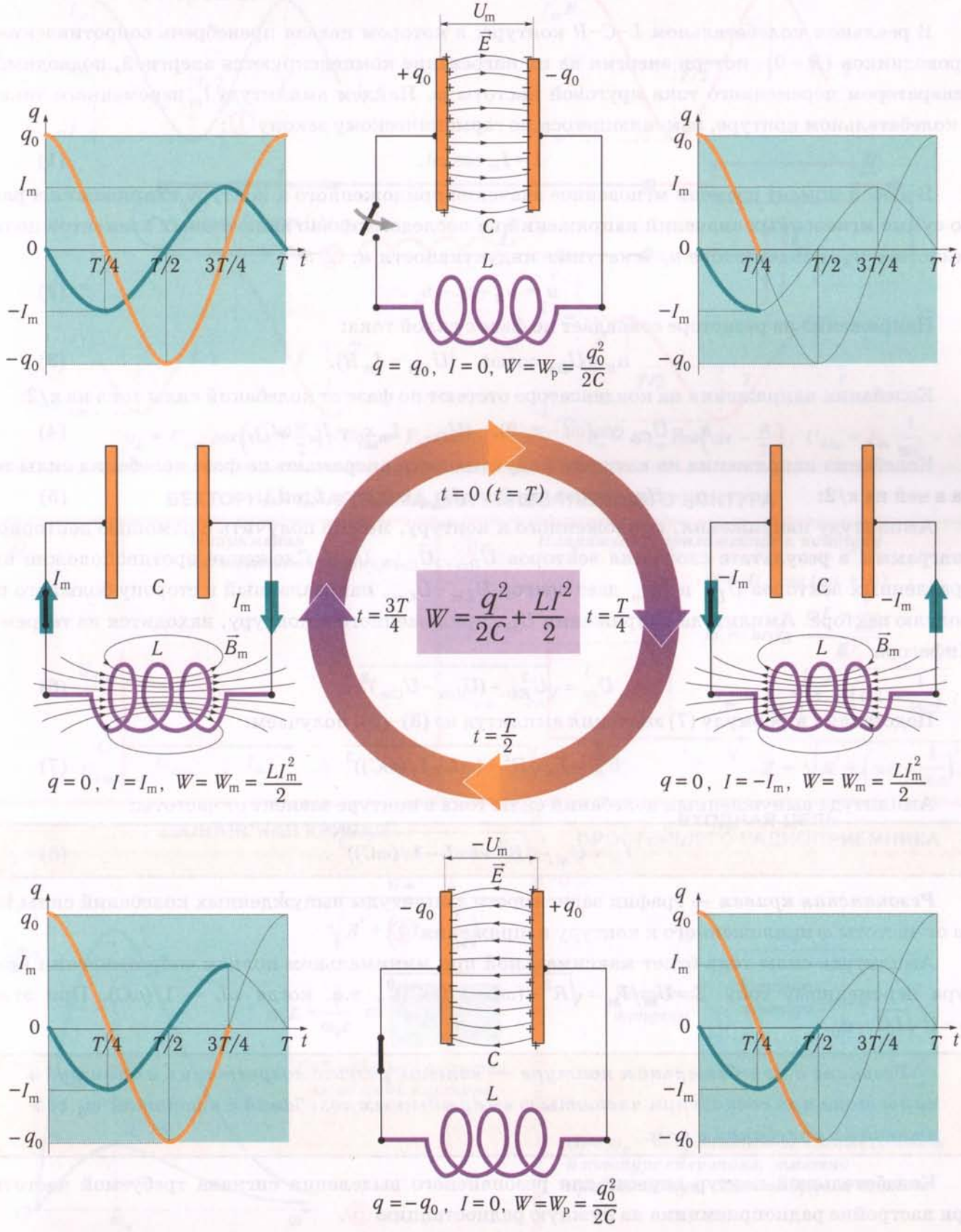
где $I_m = q_0\omega_0$. Для получения ω_0 приравняем максимальные энергии электрического поля в конденсаторе (1) и магнитного поля в катушке (2): $q_0^2/2C = Lq_0^2\omega_0^2/2$.

Тогда $$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Период собственных колебаний заряда на конденсаторе и силу тока в катушке индуктивности можно найти по формуле, впервые полученной в 1853 г. английским ученым ***Уильямом Томсоном***:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

ЭНЕРГООБМЕН МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ



§29. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В реальном колебательном L–C–R контуре, в котором нельзя пренебречь сопротивлением проводников ($R \neq 0$), потери энергии на их нагревание компенсируются энергией, подводимой генератором переменного тока круговой частоты ω. Найдем амплитуду I_m переменного тока i в колебательном контуре, изменяющегося по гармоническому закону ①:

$$i = I_m \cos \omega t. \qquad (1)$$

В любой момент времени мгновенное значение приложенного к контуру напряжения u равно сумме мгновенных значений напряжений на последовательно включенных элементов цепи: резисторе u_R, конденсаторе u_C и катушке индуктивности u_L ②:

$$u = u_R + u_C + u_L. \qquad (2)$$

Напряжение на резисторе совпадает по фазе с силой тока:

$$u_R = U_{Rm} \cos \omega t, \quad (U_{Rm} = I_m R). \qquad (3)$$

Колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$:

$$u_C = U_{Cm} \cos(\omega t - \pi/2), \quad (U_{Cm} = I_m x_C = I_m / \omega C). \qquad (4)$$

Колебания напряжения на катушке индуктивности опережают по фазе колебания силы тока в ней на $\pi/2$:

$$u_L = U_{Lm} \cos(\omega t + \pi/2), \quad (U_{Lm} = I_m x_L = I_m \omega L). \qquad (5)$$

Амплитуду напряжения, приложенного к контуру, можно получить с помощью векторной диаграммы в результате сложения векторов $\vec{U}_{Rm}$, $\vec{U}_{Cm}$, $\vec{U}_{Lm}$. Сложение противоположно направленных векторов $\vec{U}_{Lm}$ и $\vec{U}_{Cm}$ дает вектор $\vec{U}_{Lm} - \vec{U}_{Cm}$, направленный в сторону большего по модулю вектора. Амплитуда напряжения U_m, приложенного к контуру, находится из теоремы Пифагора ③:

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}. \qquad (6)$$

Подставляя в формулу (7) значения амплитуд из (3)–(5), получаем:

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2} \qquad (7)$$

Амплитуда вынужденных колебаний силы тока в контуре зависит от частоты:

$$\boldsymbol{I_m = U_m \Big/ \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}}. \qquad (8)$$

Резонансная кривая — график зависимости амплитуды вынужденных колебаний силы тока от частоты ω приложенного к контуру напряжения ④.

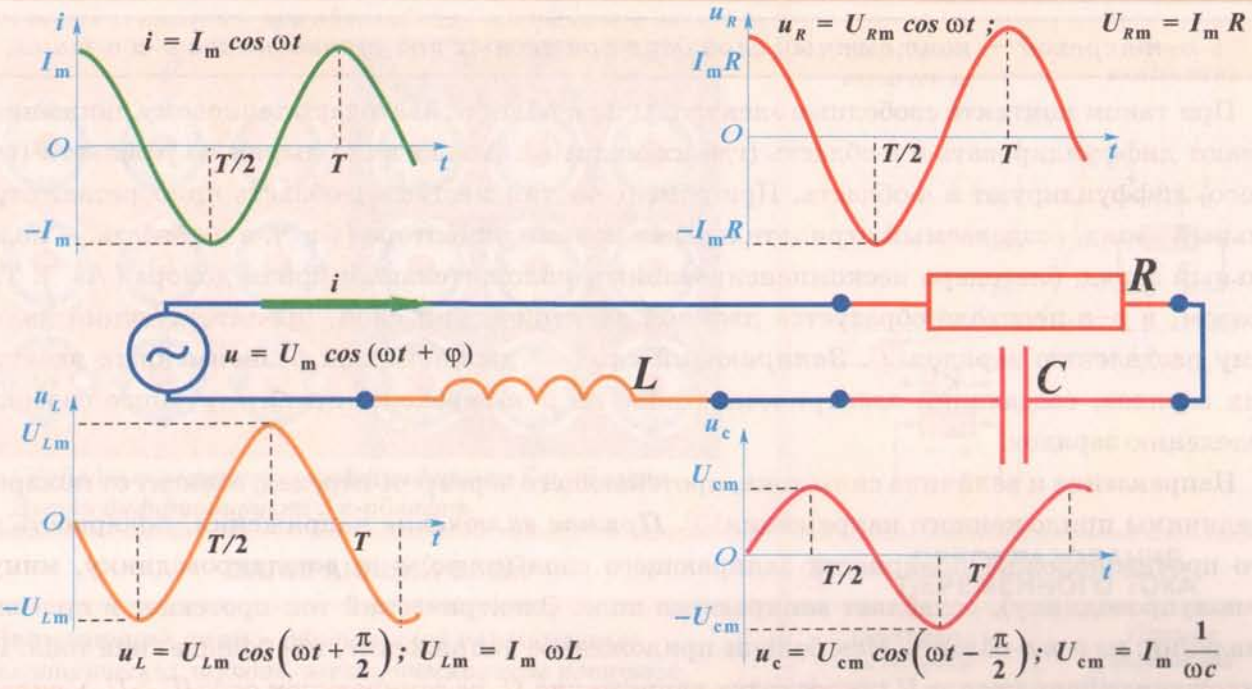
Амплитуда силы тока будет максимальной при минимальном полном сопротивлении контура переменному току $Z = U_m / I_m = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}$, т.е. когда $\omega L = 1/(\omega C)$. При этом $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$.

Резонанс в колебательном контуре — явление резкого возрастания амплитуды силы тока при совпадении частоты ω вынужденных колебаний с частотой ω_0 собственных колебаний в нем.

Колебательный контур служит для резонансного выделения сигнала требуемой частоты при настройке радиоприемника на нужную радиостанцию ⑤.

ГРАФИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

①



$$u_L = U_{Lm} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);\ U_{Lm} = I_m \omega L$$

$$u_c = U_{cm} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);\ U_{cm} = I_m \frac{1}{\omega c}$$

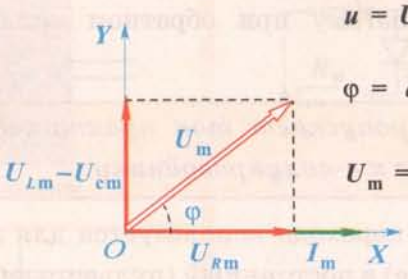
ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

②

Напряжения на элементах контура

③

Напряжение, приложенное к контуру



$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

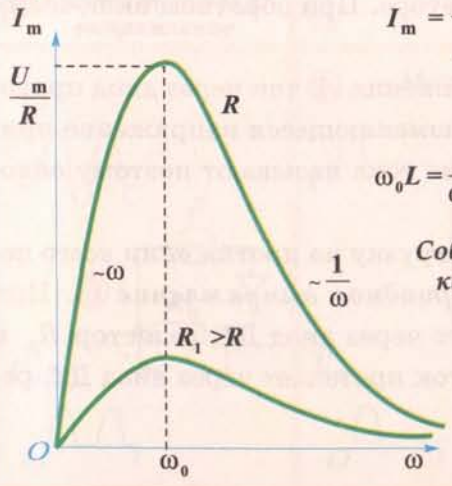
$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega c}}{R}$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega c}\right)^2};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega c}\right)^2}$$

РЕЗОНАНСНАЯ КРИВАЯ

④



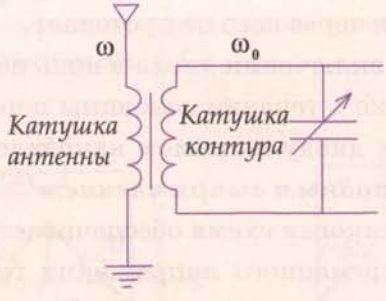
$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega c}\right)^2}}$$

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 c} \Rightarrow \boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

Собственная частота колебаний контура

ВХОДНАЯ ЦЕПЬ ПРОСТЕЙШЕГО РАДИОПРИЕМНИКА

⑤



При $\omega_0 = \omega$ принимаемый сигнал создает в контуре силу тока, заметно превышающую сигналы других частот

§30. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

***p–n*-переход — контактный слой двух примесных полупроводников *p*- и *n*-типа.**

При таком контакте свободные электроны из *n*-области благодаря тепловому движению начинают диффундировать в *p*-область (где их мало) ①. Аналогично дырки из *p*-области (где их много) диффундируют в *n*-область. При обмене частиц местами *p*-область приобретает отрицательный заряд, создаваемый отрицательными ионами акцептора (Ga^-), а *n*-область — положительный заряд, благодаря нескомпенсированным положительным ионам донора (As^+). Таким образом, в *p–n*-переходе образуется двойной электрический слой, препятствующий дальнейшему разделению зарядов ②. ***Запирающий слой*** — двойной слой разноименных электрических зарядов, создающий электрическое поле на *p–n*-переходе, препятствующее свободному разделению зарядов.

Направление и величина силы тока, протекающего через *p–n*-переход, зависит от полярности и величины приложенного напряжения ③. ***Прямое включение*** напряжения, полярность которого противоположна полярности запирающего слоя (плюс — к *p*-полупроводнику, минус — к *n*-полупроводнику), ослабляет запирающее поле. Электрический ток протекает в прямом направлении: из *p*- в *n*-область. Чем больше приложенное напряжение, тем больше сила тока. Когда приложенное напряжение U превосходит напряжение $U_з$ на запирающем слое ($U > U_з$), сила тока через *p–n*-переход резко возрастает. ***Обратное включение*** *p–n*-перехода (плюс внешнего источника напряжения подсоединяется к *n*-полупроводнику, а минус — к *p*-полупроводнику) увеличивает запирающее напряжение. При этом блокируется движение электронов из *n*-области и дырок из *p*-области. Поэтому при обратном включении ток через *p–n*-переход оказывается пренебрежимо малым.

***p–n*-переход пропускает ток практически только в одном направлении: от *p*-полупроводника к *n*-полупроводнику.**

Это свойство *p–n*-перехода используется для преобразования переменного тока (изменяющего свое направление) в постоянный (пульсирующий) ток одного направления.

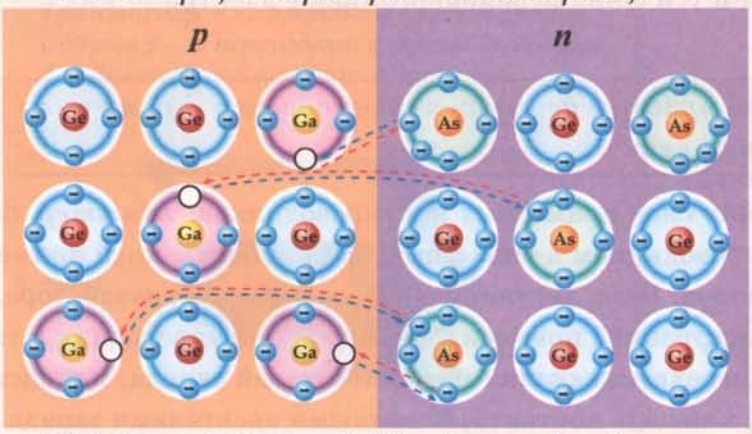
Полупроводниковый диод — элемент электрической схемы, содержащий *p–n*-переход и два вывода для включения в электрическую цепь. При прямом подключении к диоду переменного импульсного напряжения через диод протекает ток, а напряжение на сопротивлении нагрузки изменяется со временем подобно напряжению на генераторе. При обратном включении диода ток через него не протекает.

При включении диода в цепь источника переменного напряжения ④ ток через диод проходит только в течение половины периода, когда гармонически изменяющееся напряжение приложено к диоду в прямом направлении. Подобное выпрямление тока называют поэтому ***однополупериодным выпрямлением*** ⑤.

Мостиковая схема обеспечивает прохождение тока через нагрузку на протяжении всего периода переменного напряжения генератора, или ***двухполупериодное выпрямление*** ⑥. При подключении мостика к импульсному источнику ток протекает через диод Д1, резистор $R_н$ и диод Д3. При изменении полярности импульсного источника ток протекает через диод Д2, резистор $R_н$ и диод Д4.

① p – n ПЕРЕХОД

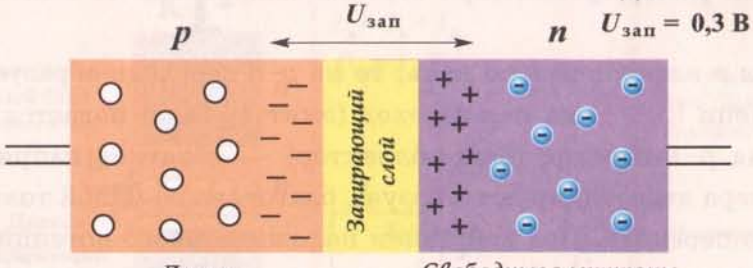
Физические процессы при образовании запирающего слоя



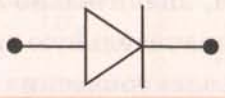
Свободные электроны диффундируют в p-область
Дырки диффундируют в n-область

② ЗАПИРАЮЩИЙ СЛОЙ

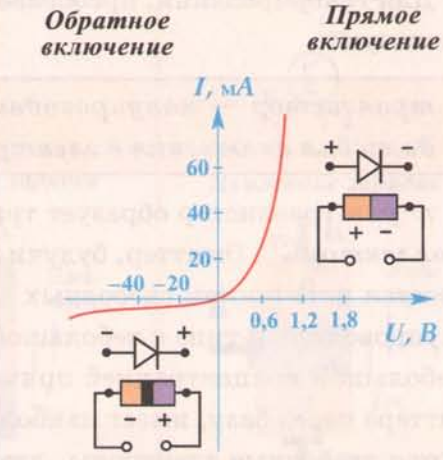
Запирающий слой – *двойной слой разноименных электрических зарядов, электрическое поле которого препятствует свободному разделению зарядов*



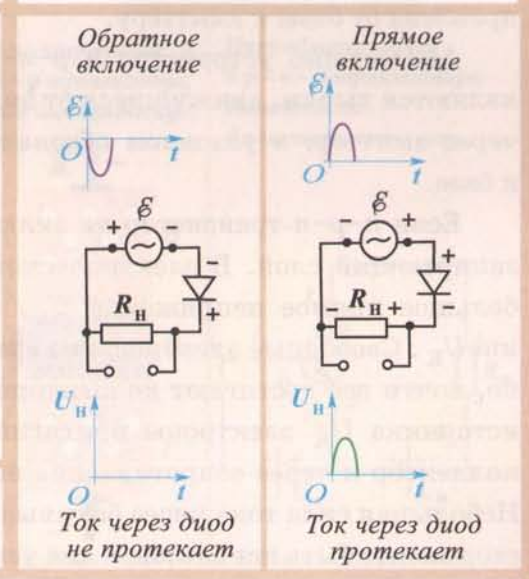
Условное обозначение полупроводникового диода



③ Вольт-амперная характеристика p – n перехода



④ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

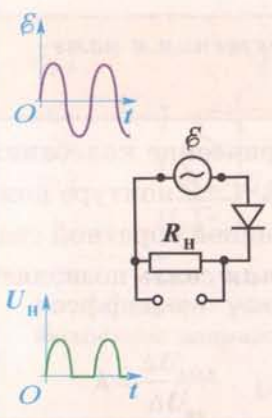


Ток через диод не протекает

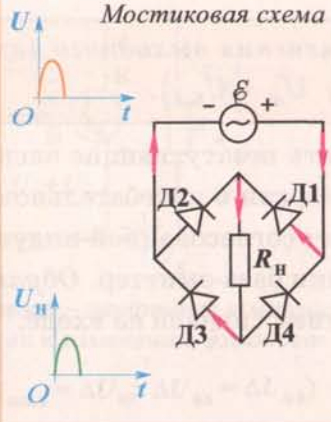
Ток через диод протекает

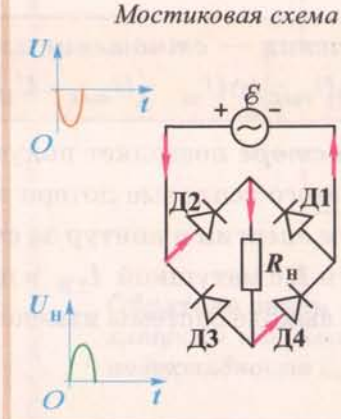
ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

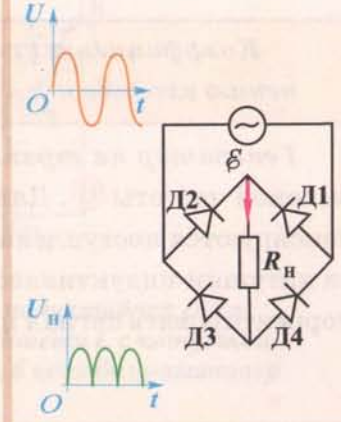
⑤ Однополупериодное выпрямление



⑥ Двухполупериодное выпрямление







§31. ТРАНЗИСТОР

Для генерирования, преобразования и усиления переменного тока в электрических схемах используют

транзистор — полупроводниковый прибор с двумя p–n-переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь ①.

n–p–n-транзистор образует три тонких слоя примесных полупроводников: ***эмиттер, базу*** и ***коллектор*** ②. Эмиттер, будучи полупроводником *n*-типа с высокой концентрацией примеси, является источником свободных электронов. База, регулирующая силу тока в транзисторе, — полупроводник *p*-типа с небольшой концентрацией примеси. Коллектор (полупроводник *n*-типа с небольшой концентрацией примеси), перехватывающий поток носителей заряда, идущих от эмиттера через базу, имеет наибольшую площадь контакта. Основными носителями заряда являются свободные электроны, движущиеся от эмиттера к коллектору. Соответственно ток, за направление которого принимается направленное движение положительных зарядов, протекает от коллектора к эмиттеру. Поэтому на условном обозначении *n–p–n*-транзистора стрелка направлена от базы к эмиттеру.

Аналогично устройство и *p–n–p*-транзистора, в котором основными носителями заряда являются дырки, движущиеся от эмиттера к коллектору. В этом же направлении протекает ток через эмиттер: в условном обозначении *p–n–p*-транзистора стрелка направлена от эмиттера к базе.

Если *n–p–n*-транзистор не включен в электрическую цепь, то на *p–n*-переходе образуется запирающий слой. В электрической цепи ③, ④ на *n–p*-переход (эмиттер-база) подается небольшое прямое напряжение $U_Б$, а на *p–n*-переход (база-коллектор) — обратное напряжение $U_К$. Свободные электроны из эмиттера диффундируют в базу и, благодаря ее малой толщине, почти все достигают коллекторного перехода. Под действием положительного потенциала источника $U_К$ электроны притягиваются к коллектору. Сила тока $I_К$, протекающего через коллектор и через сопротивление нагрузки, значительно превышает силу тока $I_Б$ через базу. Небольшая сила тока через базу вызывает значительную силу тока в нагрузке, поэтому транзистор может быть использован для усиления электрических сигналов.

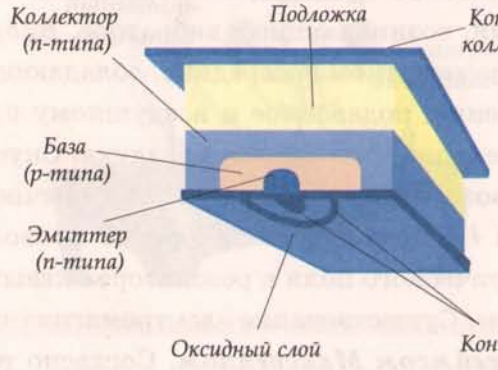
Одной из схем ***усилителя на транзисторе*** является схема с общим эмиттером, в которой в цепь база-эмиттер включен источник слабого переменного напряжения: $u_c = U_{c0} \sin \omega t$ ⑤. Разность потенциалов между базой и эмиттером $u_{БЭ} = U_Б + u_c$ всегда положительна ($U_{c0} \ll U_Б$), поэтому через переход все время протекает ток.

Коэффициент усиления — отношение изменения выходного напряжения к изменению входного: $k = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$ $\left(U_{вых} = U_Н;\ U_{вх} = U_{БЭ}\right)$.

Генератор на транзисторе позволяет получать незатухающие электрические колебания высокой частоты ⑥. Для этого тепловые потери энергии в колебательном *L–C–R* контуре компенсируются поступлением энергии в контур за счет согласованной индуктивной обратной связи катушки индуктивности *L* с катушкой $L_{СВ}$ в цепи база-эмиттер. ***Обратная связь*** позволяет корректировать сигнал на выходе системы изменением сигнала на входе.

УСТРОЙСТВО ТРАНЗИСТОРА

① **Транзистор** – *полупроводниковый прибор с двумя p – n переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь*



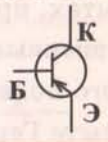
n – p – n ТРАНЗИСТОР

② *Обозначение*

Движение зарядов

p – n – p ТРАНЗИСТОР

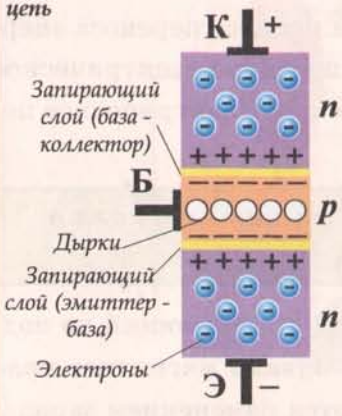
Обозначение



Движение зарядов

③ n – p – n ТРАНЗИСТОР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

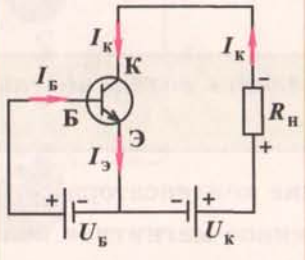
Распределение электрических зарядов в n – p – n транзисторе, не включенном в электрическую цепь



Направление токов в n – p – n транзисторе, включенном в электрическую цепь

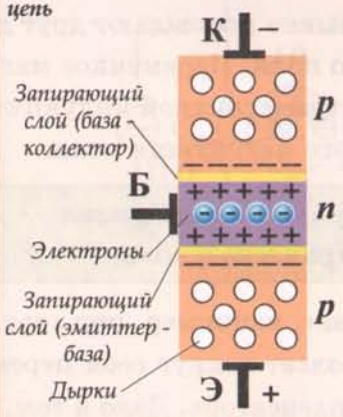
$I_э = I_к + I_б$

$U_э = I_к R_н$

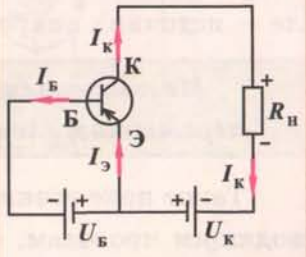


④ p – n – p ТРАНЗИСТОР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Распределение электрических зарядов в p – n – p транзисторе, не включенном в электрическую цепь



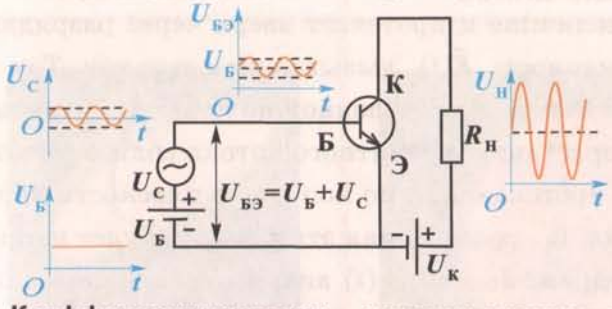
Направление токов в p – n – p транзисторе, включенном в электрическую цепь



⑤ УСИЛИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Схема с общим эмиттером

$U_с = U_{с0} \sin \omega t$; $U_{бэ} = U_б + U_с$

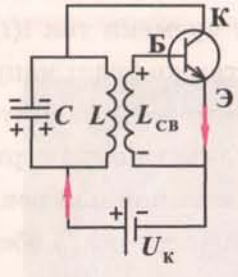


Коэффициент усиления – *отношение изменения выходного напряжения к изменению входного:*

$$k = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} \quad (\Delta U_{вых} = \Delta U_н;\ \Delta U_{вх} = \Delta U_{бэ})$$

⑥ ГЕНЕРАТОР НА ТРАНЗИСТОРЕ

Генерация автоколебаний



Обратная связь – *индуктивная связь катушки индуктивности L с катушкой индуктивности $L_{св}$ в цепи база-эмиттер*

§32. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В опытах, проведенных в 1887 г. в Берлинском университете немецким физиком ***Генрихом Герцем***, впервые наблюдалось распространение в пространстве переменного электрического и магнитного полей, или электромагнитного поля. Источником возмущения электромагнитного поля в опыте Герца являлись электромагнитные колебания, возникающие в вибраторе. ***Вибратор Герца*** — прямолинейный проводник с воздушным промежутком посередине, обладающий свойствами колебательного контура ①. Высокое напряжение, подаваемое к воздушному промежутку, вызывало в нем искровой разряд вследствие электрического пробоя воздуха. Спустя промежуток времени $t = l/c$ искровой разряд возникал в воздушном промежутке аналогичного вибратора (***резонатора***), расположенного на расстоянии l и замкнутого накоротко проволокой ②. Это означало, что значение напряженности электрического поля в резонаторе оказывалось достаточным для электрического пробоя воздуха в нем. Существование электромагнитных волн было предсказано в 1864 г. английским ученым ***Джеймсом Максвеллом***. Согласно теории Максвелла,

электромагнитная волна — переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве.

Между переменными во времени электрическим и магнитным полем существует взаимосвязь: эти поля непрерывно порождают друг друга, вызывая волновой процесс переноса энергии электромагнитного поля. Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле в результате электромагнитной индукции. В свою очередь переменное электрическое поле — источник вихревого магнитного поля.

Магнитоэлектрическая индукция — явление возникновения магнитного поля в переменном электрическом поле.

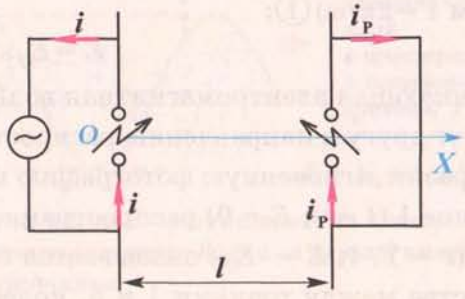
Такое поле возникает, например, при зарядке конденсатора ③. Ток, протекающий по подводящим проводам, создает вокруг себя переменное магнитное поле. Однако магнитное поле возникает и внутри конденсатора. Дело в том, что сила тока определяется изменением заряда: $i = q'$, величина которого связана с напряженностью E электрического поля в конденсаторе $E \sim q$. Поэтому сила ***тока смещения*** $I_{см}$ внутри конденсатора связана с изменением во времени напряженности электрического поля в этой области: $I_{см} \sim E'$.

Результаты опыта Герца можно объяснить с помощью теории Максвелла ④. Если в начальный момент времени ток $i(t)$ возрастает по величине и протекает вверх через разрядный промежуток, то также будет направлена и напряженность $\vec{E}(t)$, вызывающая этот ток. Ток $i(t)$ создает в области точки 1 магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, направленной по правилу буравчика перпендикулярно плоскости чертежа (от нас). Возрастанию магнитного потока вблизи точки 1 препятствует индукционный ток смещения $i_1(t)$, протекающий по контуру в плоскости чертежа против часовой стрелки. Собственная индукция $\vec{B}_1$, создаваемая этим током, будет направлена против $\vec{B}$. Подобно $i_1(t)$ будет направлена напряженность $\vec{E}_1(t)$ вихревого электрического поля, создающего этот ток. Далее распространение электромагнитной волны в направлении резонатора продолжается аналогично.

ОПЫТ ГЕРЦА

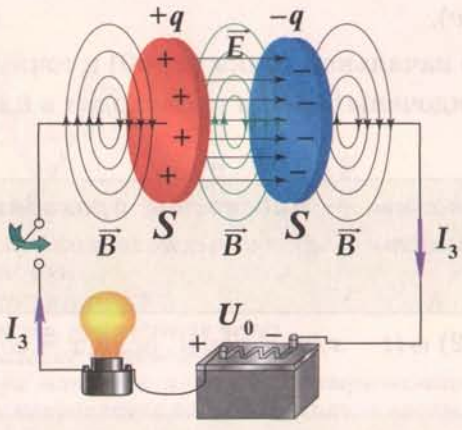
① ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

② ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

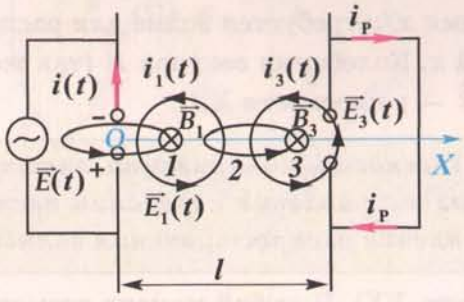


ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА

③ ТОК СМЕЩЕНИЯ



④ ПРИНЦИП РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ



ИЗЛУЧАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

РАДИОЛОКАТОР

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛАМПА

§33. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Рассмотрим важнейшие характеристики электромагнитной волны на значительном расстоянии от вибратора Герца. Будем считать, что напряженность электрического поля и индукция магнитного поля изменяются в вибраторе по гармоническому закону с круговой частотой ω (периодом $T = 2\pi/\omega$) ①:

$$E = E_0 \sin \omega t; \quad B = B_0 \sin \omega t. \qquad (1)$$

Возникающая электромагнитная волна является поперечной: векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны (ось X).

Изобразим мгновенную фотографию волны (зависимость $E(x)$) через время τ ②. Начальное возмущение 1 ($t = 0$; $E = 0$) распространяется со скоростью v на расстояние $v\tau$ по оси X. Возмущение 2 ($t = T/4$; $E = E_0$) оказывается ближе к вибратору на расстояние $vT/4$. Расстояние в пространстве между точками 1 и 5, колеблющимися в одинаковой фазе, оказывается равным vT и характеризует длину электромагнитной волны.

Длина волны — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника: $\lambda = vT$.

Уравнение бегущей гармонической волны напряженности электрического поля, распространяющейся в положительном направлении оси X, имеет вид:

$$E = E_0 \sin\omega (t - x/v). \qquad (2)$$

Время x/v требуется волне для распространения из начальной точки ($x = 0$) в точку с координатой x. Колебания вектора $\vec{E}$ (так же как и $\vec{B}$) упорядочены ③: они происходят в плоскости XY (а $\vec{B}$ — в плоскости XZ).

Плоскость поляризации электромагнитной волны — плоскость, проходящая через направление колебаний вектора напряженности электрического поля и направление распространения волны

(плоскость XY). В любой момент времени фаза волны (2) $\omega (t - x/v) = const$, если $x = const$, т.е. в плоскости YZ, называемой фронтом волны.

Фронт электромагнитной волны — поверхность постоянной фазы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Волна — плоская, если ее фронт волны — плоскость ④.

Перенос мощности $P_{эм}$ электромагнитного излучения сквозь единицу площади S поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны, характеризует величина, усредненная по времени, — ***интенсивность волны*** ⑤:

$$I = \overline{P_{эм}}/S = \overline{w_{эм}} \cdot c \sim \overline{E^2}. \qquad (3)$$

В отсутствие поглощения средняя мощность P_u электромагнитного излучения источника проходит в пространстве сквозь сферическую поверхность радиусом r ($S = 4\pi r^2$) ⑥:

$$P_u = I 4\pi r^2. \qquad (4)$$

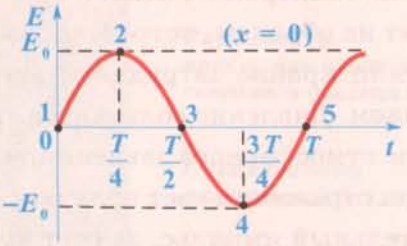
Из формулы (4) следует, что интенсивность I излучения источника на расстоянии r от него

$$I = P_u / 4\pi r^2. \qquad (5)$$

Интенсивность излучения точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.

БЕГУЩАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ ВОЛНА

① Напряженность электрического поля в вибраторе Герца

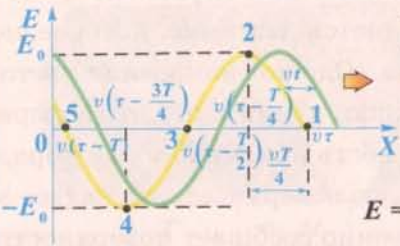


$$E = E_0 \sin \omega t$$

Индукция магнитного поля

$$B = B_0 \sin \omega t$$

② ДЛИНА ВОЛНЫ



Напряженность электрического поля в пространстве в моменты времени t и $t + \tau$

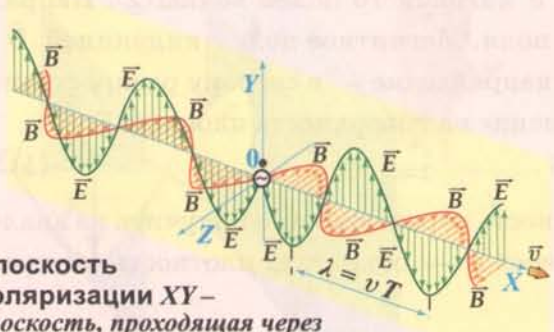
$$E = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)$$

Длина волны – *расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника*

$\lambda = \upsilon T$, *где* T – *период колебаний вибратора,* υ – *скорость распространения волны*

③ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВОЛНЫ

Напряженность электрического поля и индукция магнитного поля излучающего гармонического вибратора в пространстве вблизи оси X

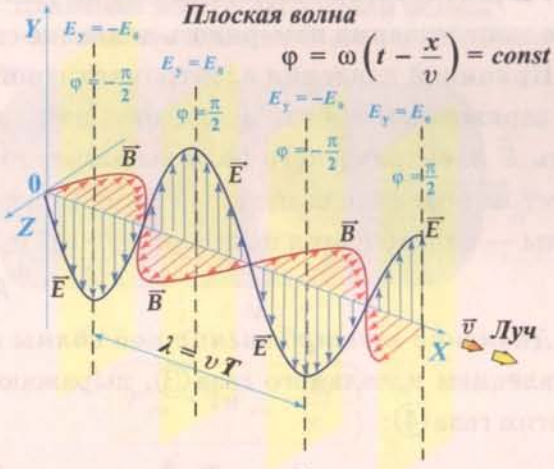


Плоскость поляризации XY – *плоскость, проходящая через направление колебаний (ось OX) вектора напряженности* $\vec{E}$ *электрического поля и направление распространения волны (ось OX)*

④ ФРОНТ ВОЛНЫ

Плоская волна

$$\varphi = \omega \left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) = const$$

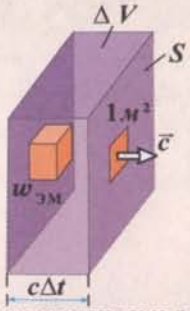


Фронт электромагнитной волны – *поверхность постоянной фазы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля*

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Связь интенсивности гармонической волны с напряженностью электрического поля

⑤ Интенсивность электромагнитной волны – *среднее значение плотности потока энергии волны*



Энергия электромагнитной волны внутри параллелепипеда

$$\Delta W = w_{эм} \cdot \Delta V = w_{эм} \cdot c \Delta t S$$

Мощность

$$P_{эм} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = w_{эм} \cdot c \cdot S$$

Плотность потока

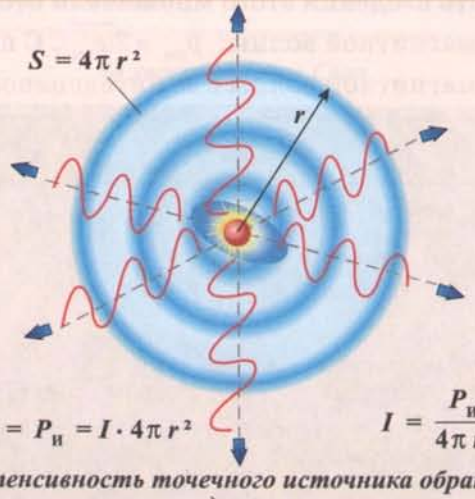
$$\frac{P_{эм}}{S} = w_{эм} \cdot c$$

Интенсивность электромагнитной волны

$$I = \frac{\overline{P}_{эм}}{S} = \overline{w}_{эм} \cdot c = c\, \varepsilon_0 \overline{E^2} \qquad I = 0{,}5 c\, \varepsilon_0 E_0^2$$

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА

⑥



$$P_{эм} = P_и = I \cdot 4\pi r^2 \qquad I = \frac{P_и}{4\pi r^2}$$

Интенсивность точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника

§34. ИМПУЛЬС, ДАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Электромагнитная волна переносит не только энергию электромагнитного поля, но и импульс. Этим объясняется давление, которое она оказывает на объекты, встречающиеся на пути ее распространения. Однако измерение светового давления крайне затруднительно из-за его малости по сравнению, например, с атмосферным давлением. Давление солнечного света на отражающую поверхность примерно на 10 порядков меньше атмосферного давления, а его давление на поглощающую поверхность еще вдвое меньше. При отражении свет получает от поверхности (и соответственно сообщает поверхности) дополнительный импульс, за счет которого изменяет направление распространения на противоположное. Различие давления света на отражающую и поглощающую поверхности учитывал российский физик ***Петр Николаевич Лебедев*** при измерении давления света. В ***опыте Лебедева*** внутри откачанного стеклянного сосуда на тонкой стеклянной нити подвешивался стержень с крылышками, освещаемыми светом ①. Одна сторона крылышек была зачернена и поглощала свет, другая зеркальная — отражала свет. В результате большего давления света на зеркальную сторону нить закручивалась. По углу ее закручивания измерялось давление света.

Причиной давления электромагнитной волны является совместное действие на электрически заряженные частицы вещества электрического и магнитного полей волны ②. Напряженность $\vec{E}$ электрического поля вызывает ток I вдоль поля. Магнитное поле с индукцией $\vec{B}$ действует на возникающий ток с силой Ампера $\vec{F}_A$. Ее направление — в сторону распространения волны — определяется по правилу левой руки, а давление на поверхность площади S:

$$p_{эм} = F_A / S. \qquad (1)$$

Давление электромагнитной волны на поверхность образца можно получить из аналогии с давлением идеального газа ③, выражающегося через w — объемную плотность внутренней энергии газа ④:

$$p_{иг} = 2w/3. \qquad (2)$$

Формула (1) получена в предположении, что частицы могут равновероятно двигаться по трем координатным осям, поэтому в направлении одной из осей двигается лишь 1/3 частиц (отсюда появился множитель 1/3). Волна распространяется в одном направлении, и поэтому необходимость введения этого множителя отсутствует при получении выражения для давления $p_{эм}$ электромагнитной волны: $p_{эм} = 2\overline{w_{эм}}$. С помощью формулы (3) §33 можно найти связь давления электромагнитной волны с ее интенсивностью:

$$p_{эм} = 2I/c. \qquad (3)$$

При абсолютно упругом отражении электромагнитной волны изменение ее импульса за промежуток времени Δt: $\Delta p = 2p$, где p — импульс падающей волны. Согласно второму закону Ньютона,

$$F_A = \Delta p / \Delta t = 2p/\Delta t. \qquad (4)$$

Тогда из формулы (4) с учетом (3) и (1) получаем

взаимосвязь импульса электромагнитной волны с переносимой ею энергией W:

$$p = IS\Delta t/c = W/c.$$

① ОПЫТ ЛЕБЕДЕВА

Давление света

Радиометр – *прибор для измерения светового давления*

1. Откачанный стеклянный баллон

2. Нить подвеса

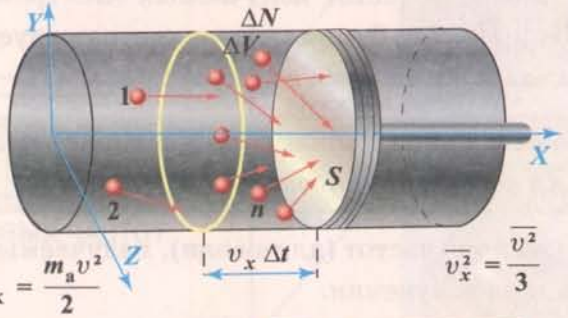
3. Зеркальное крылышко

4. Зачерненное крылышко

5. Подставка

② АНАЛОГИЯ ДАВЛЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Давление идеального газа

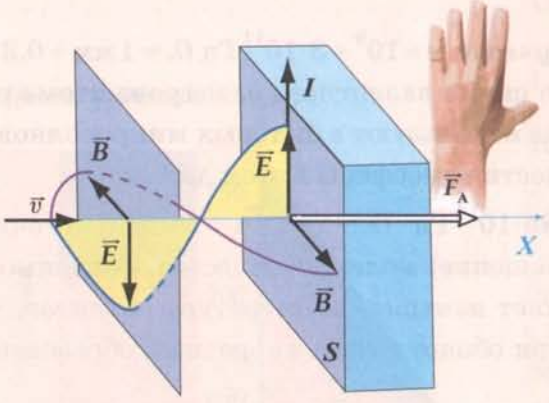


$$E_к = \frac{m_а v^2}{2} \qquad \overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$$

$$p = n m_а \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} n m_а \overline{v^2}, \qquad p = \frac{2}{3} n \overline{E}_к = \frac{2}{3} w,$$

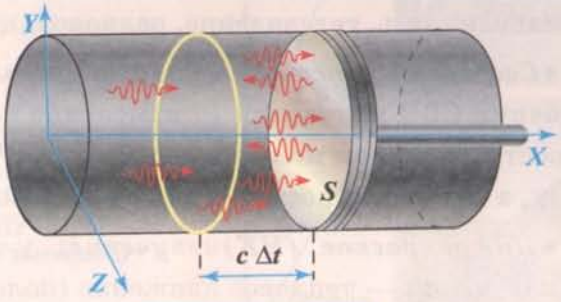
где $w = n\overline{E}_к$ *– объемная плотность энергии идеального газа*

③ Действие силы Ампера на вещество

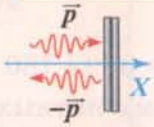


$$P_{эм} = \frac{F_A}{S}$$

④ Давление электромагнитной волны



$$P_{эм} = 2w_{эм} = \frac{2I}{c}$$



$$|\Delta\vec{p}| = 2p$$

РАДИАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ СОЛНЦА

на панели солнечных батарей космического аппарата

на хвост кометы Сван

§35. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Диапазон частот излучаемых электромагнитных волн, фиксируемых в настоящее время: $\nu = 0 \div 3 \cdot 10^{22}$ Гц. Этот диапазон соответствует ***спектру*** (от лат. spectrum — видение, образ) ***электромагнитных волн*** с длиной волны λ ($\lambda = c/\nu$) от 10^{-14} м до бесконечности.

По длине волны (или частоте) спектр электромагнитных волн условно делят на восемь диапазонов.

Отличие частот (длин волн), излучаемых в различных диапазонах, связано с различием источников излучения.

• ***Электромагнитные волны звуковых частот***: $\nu = 0 \div 2 \cdot 10^4$ Гц ($\lambda = 1{,}5 \cdot 10^4$ м $\div \infty$). Источник волн звуковых частот — переменный ток соответствующей частоты. Излучение таких волн в пространство невелико из-за малости их частот.

• ***Радиоволны***: $\nu = 2 \cdot 10^4 \div 10^9$ Гц ($\lambda = 0{,}3 \div 1{,}5 \cdot 10^4$ м). Источник радиоволн — переменный ток высокой частоты, вызывающий заметное излучение радиоволн в пространство. Это позволяет использовать их для передачи информации на значительное расстояние (радиовещание, мобильная связь, телевидение, радиолокация).

• ***Сверхвысокочастотное, или микроволновое, излучение*** $\nu = 10^9 \div 3 \cdot 10^{11}$ Гц ($\lambda = 1$ мм $\div$ 0,3 м). Источник СВЧ-излучения — изменение направления спина валентного электрона атома или скорости вращения молекул вещества. СВЧ-излучение используют в бытовых микроволновых печах, а также для космической связи из-за прозрачности атмосферы в этом диапазоне.

• ***Инфракрасное (ИК) излучение***: $\nu = 3 \cdot 10^{11} \div 3{,}85 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 780$ нм $\div$ 1 мм). Источник ИК-излучения — тепловое движение (колебание и вращение) молекул вещества. Зависимость интенсивности ИК-излучения от температуры позволяет измерять температуру объектов, что используется в биноклях ночного видения, а также при обнаружении инородных образований в медицине.

• ***Видимый свет***: $\lambda = 380 \div 780$ нм ($\nu = 3{,}85 \cdot 10^{14} \div 7{,}89 \cdot 10^{14}$ Гц) — единственный, достаточно узкий диапазон электромагнитных волн, воспринимаемый человеческим глазом. Источник видимого света — электроны в атомах и молекулах, изменяющие свое положение в пространстве, а также свободные электроны, движущиеся ускоренно. Максимум чувствительности человеческого глаза приходится на длину волны $\lambda = 560$ нм, соответствующую максимальной интенсивности Солнца и максимальной прозрачности атмосферы Земли.

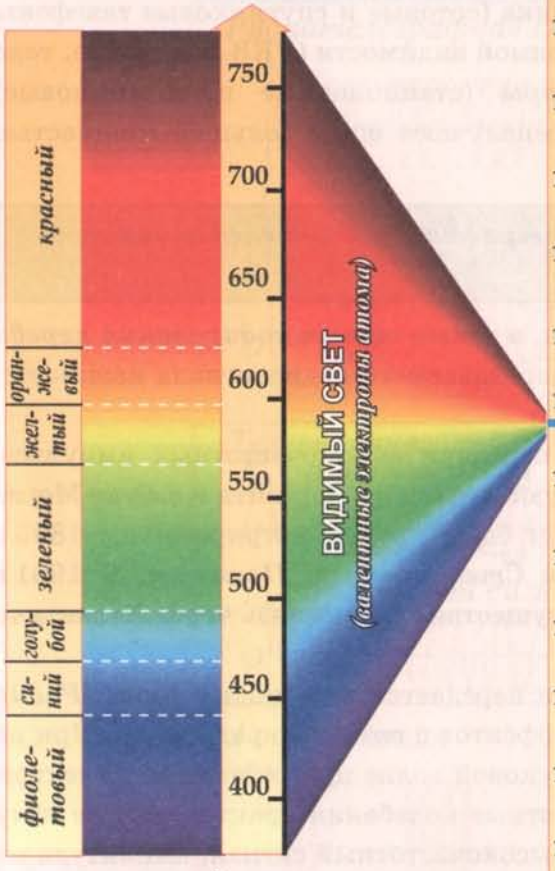
• ***Ультрафиолетовое (УФ) излучение*** $\nu = 7{,}89 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$ Гц ($\lambda = 10 \div 380$ нм). Источник УФ излучения — валентные электроны атомов и молекул, а также заряды, движущиеся ускоренно. УФ излучение обладает бактерицидным действием.

• ***Рентгеновское излучение***: $\nu = 3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda = 10^{-12} \div 10^{-8}$ м). Источник излучения — изменение состояния электронов внутренних оболочек атомов (молекул) или ускоренно движущиеся электроны. Излучение обладает высокой проникающей способностью, широко используемой в рентгеновской диагностике.

• ***γ-излучение***: $\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda < 10^{-12}$ м). Источник излучения — изменение энергетического состояния атомного ядра или ускорение заряженных частиц. Проникающая способность γ-излучения больше, чем рентгеновского.

Солнечный ветер (шторм)

Цвета видимого спектра



§36. ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ

Передача информации на расстояние с помощью электромагнитных сигналов часто осуществляется по проводам (радиотрансляционная, телеграфная, телефонная связь). Это оказывается энергетически выгодным. Кроме того такой способ связи обеспечивает высокое качество передачи информации. Однако значительные затраты на прокладку линий связи (особенно под водой или в условиях сложного рельефа местности) заставляют отдавать предпочтение беспроводной связи. Такая связь оказывается единственно возможной при информационном обмене между космическими и военными объектами, самолетами, кораблями, альпинистами, спасателями и т.д.

Для передачи и приема информации с помощью электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве, используют радиоволны.

Радиосвязь — передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Гармонический сигнал радиочастоты, излучаемый в окружающее пространство, не содержит полезной информации (кроме факта существования радиоизлучателя) ①. Поэтому передаваемая информация кодируется в радиосигнале. Для радиосвязи требуется ***радиопередатчик***, излучающий радиоволны, переносящие необходимую кодированную информацию, и ***радиоприемник***, улавливающий и декодирующий (расшифровывающий) сигнал, излучаемый передатчиком. В случае, если мощность передатчика невелика (сотовые и спутниковые телефоны) или если его излучение распространяется в пределах прямой видимости (УКВ-излучение, телевещание), дополнительно используют ***ретрансляторы*** (стационарные и спутниковые). Ретрансляторы принимают сигнал передатчика и переизлучают его с большей мощностью, обеспечивая передачу сигнала на большие расстояния.

Различают четыре вида радиосвязи: радиотелеграфная, радиотелефонная и радиовещание, телевидение, радиолокация ②.

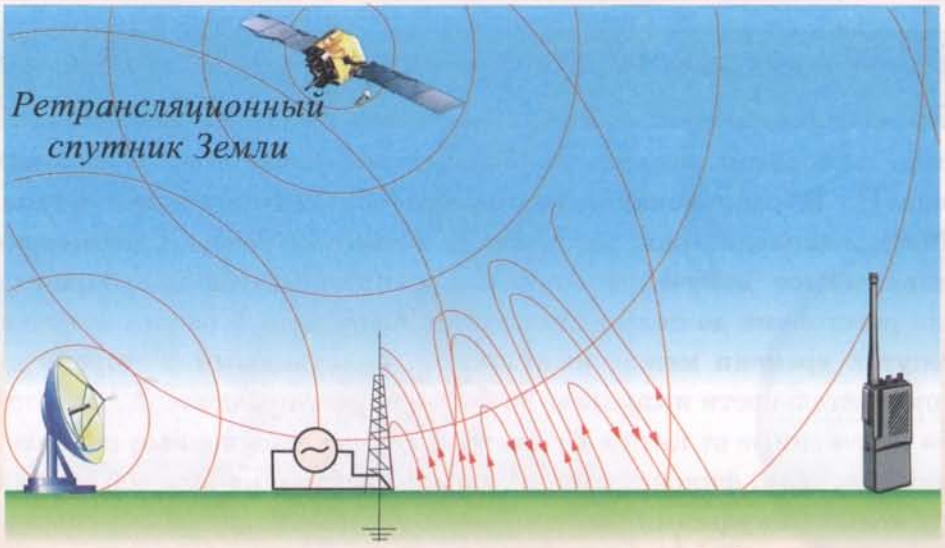
Виды связи отличаются величиной средней частоты, а также ***типом кодирования передаваемого сигнала, или модуляцией***. Средняя частота передаваемого радиосигнала называется ***несущей частотой***.

Радиотелеграфная связь осуществляется путем передачи высокочастотных импульсов разной длительности — сочетания точек и тире, кодирующего букву алфавита в азбуке Морзе. Впервые радиотелеграфная связь на расстоянии 250 м была продемонстрирована в 1895 г. в Санкт-Петербурге российским ученым ***Александром Степановичем Поповым***. В 1901 г. итальянский инженер ***Гульельмо Маркони*** впервые осуществил радиосвязь через Атлантический океан.

В настоящее время значительная доля информации передается в радиодиапазоне. ***Радиовещание*** — передача в эфир речи, музыки, звуковых эффектов с помощью радиоволн. При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются в электрические колебания той же формы. Подобные низкочастотные колебания практически не излучаются. Для их передачи в эфир передатчик излучает высокочастотный сигнал, амплитуда которого изменяется со временем синхронно с колебаниями давления воздуха в звуковой волне. При ***телевещании*** формируется не только звуковой сигнал, но и сигнал изображения в метровом и дециметровом диапазоне длин волн.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАДИОСВЯЗИ

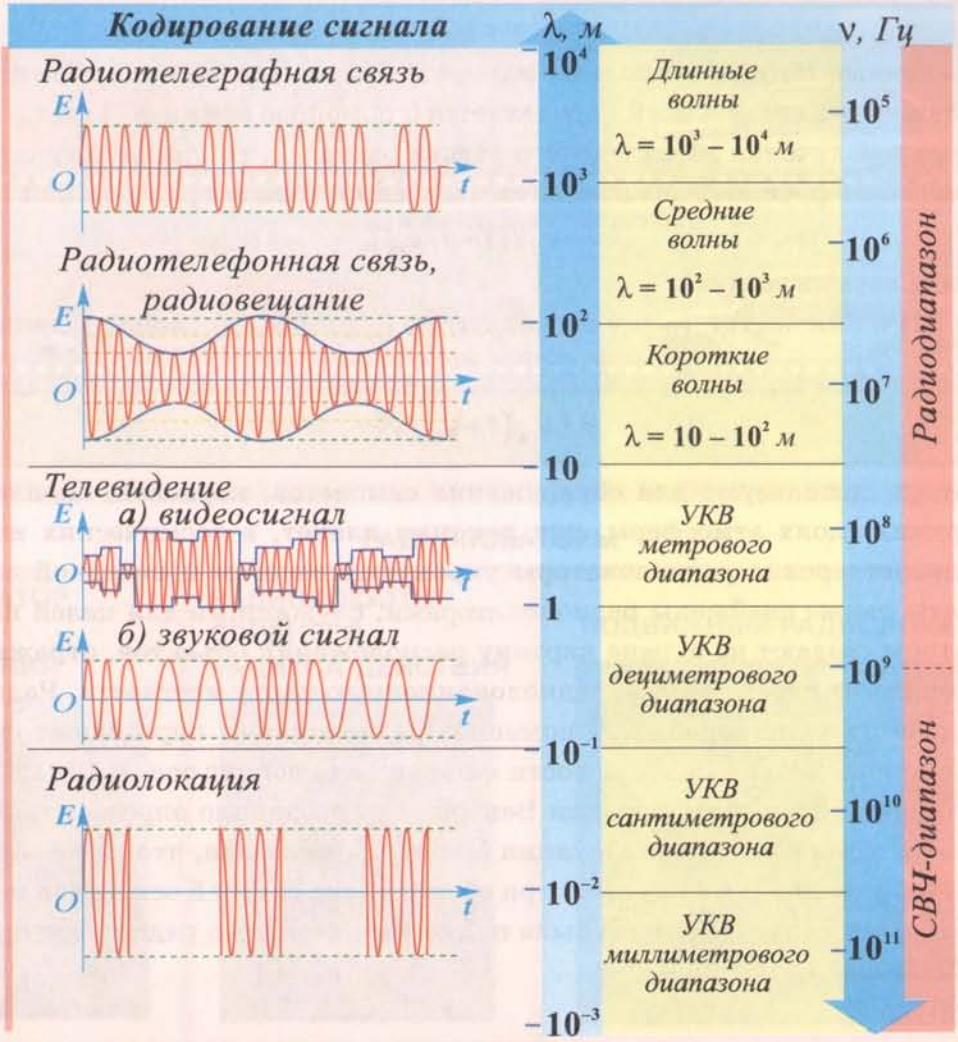
①



Радиопередатчик *Ретранслятор* *Радиоприемник*

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ

②



§37. РАДИОЛОКАЦИЯ

Радиолокация — обнаружение объектов и определение их координат с помощью радиоволн.

Радиолокатор, или радар, состоит из передатчика импульсов электромагнитного поля и их приемника ①. В радиолокации используются СВЧ-колебания в диапазоне частот $\nu = 10^8 - 10^{11}$ Гц. В радиолокаторах, работающих в сантиметровом и дециметровом диапазоне длин волн, направленное излучение создается и принимается параболической антенной. Для определения расстояния до цели используется импульсный режим излучения радиолокатора ②. Промежуток времени между импульсами, излучаемыми в сторону цели, примерно в 1000 раз больше длительности импульса. Во время пауз направленной антенной радиолокатора принимаются отраженные от цели импульсы. Импульс, излученный радиолокатором, и импульс, отраженный от цели, фиксируются на экране электронно-лучевой трубки. Промежуток времени τ между этими импульсами равен времени распространения импульса электромагнитного поля от радиолокатора к объекту и обратно, т.е. времени прохождения импульсом, распространяющимся со скоростью света c, двойного расстояния l от радиолокатора до объекта:

$$\tau = 2\,l\,/\,c.$$

Тогда расстояние объекта от радиолокатора находится по формуле:

$$l = c\,\tau/2. \qquad (1)$$

Радиолокационные методы позволяют измерять скорость движения объектов ③. Например, скорость движения автомобилей определяется с помощью эффекта Доплера. Если частота электромагнитного излучения милицейского радара равна ν_0, то при отражении от автомобиля, движущегося со скоростью v, она изменяется и воспринимается радаром как

$$\nu = \nu_0\,/\,(1 - v\,/\,v_{зв}), \qquad (2)$$

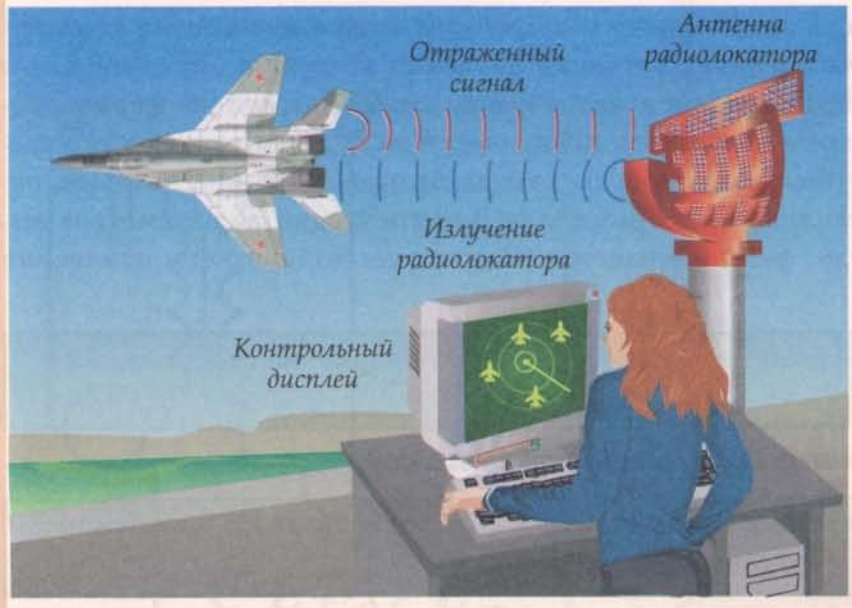
где $v_{зв}$ — скорость звука в воздухе.

Известные значения частот ν_0 и ν позволяют из формулы (2) скорость движения автомобиля:

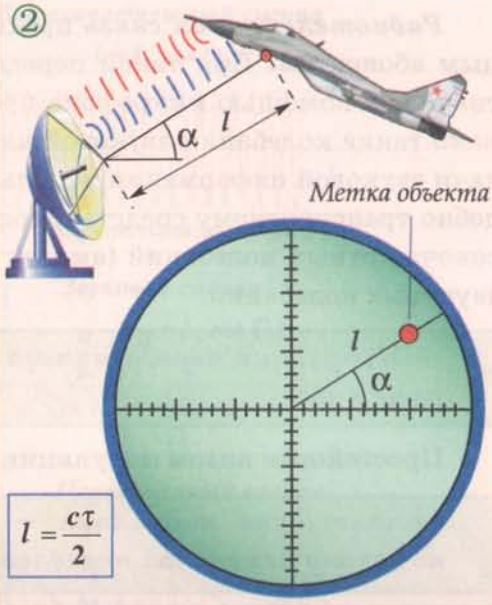
$$v = v_{зв}\,(1 - \nu_0\,/\,\nu). \qquad (3)$$

Радиолокаторы используют для обнаружения самолетов, кораблей, скопления облаков, метеоров в верхних слоях атмосферы, для локации планет, в космических исследованиях. В аэропортах диспетчерские радиолокаторы управляют взлетом и посадкой самолетов. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для целей навигации. Такие радиолокаторы создают на экране картину расположения объектов, отражающих радиоволны. Оператор имеет перед глазами радиолокационную карту местности. Радиолокаторами снабжены все космические корабли. С помощью радиолокации определяют скорости орбитального движения планет, а также скорости их вращения вокруг оси. В 1961 г. российскими учеными была произведена радиолокация Венеры, что позволило определить период вращения планеты вокруг своей оси. Радиолокация Меркурия показала, что он не обращен к Солнцу все время одной стороной, а совершает три оборота вокруг своей оси за два меркурианских года. Детальная карта рельефа Венеры была получена с помощью радиолокатора межпланетной станции «Магеллан».

① ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РАДИОЛОКАЦИИ

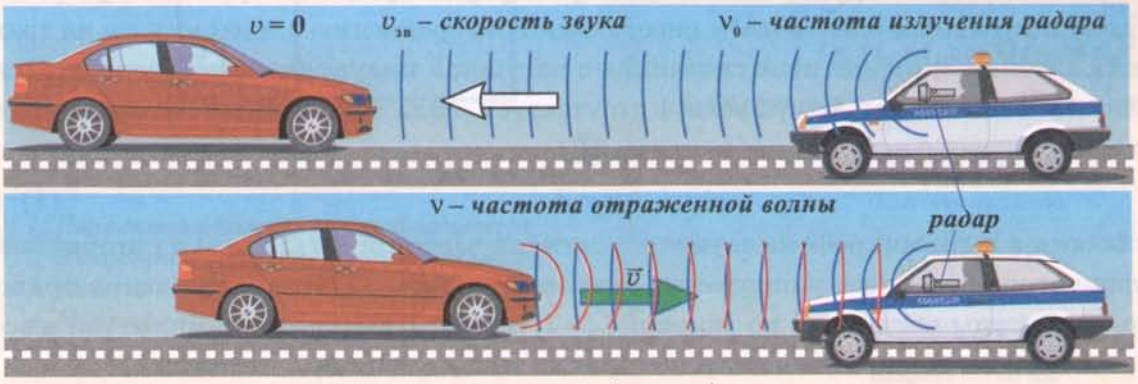


ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

② 

$$l = \frac{c\tau}{2}$$

③ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА



$$\nu = \frac{\nu_0}{1 - \frac{\upsilon}{\upsilon_{зв}}}$$

$$\upsilon = \upsilon_{зв} \cdot \left(1 - \frac{\nu_0}{\nu}\right)$$

РАДИОЛОКАТОРЫ

РАДИОЛОКАТОР ДАЛЬНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ

РАДИОЛОКАТОР СРЕДНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ

ПОДВИЖНЫЙ РАДИОЛОКАТОР

§38. РАДИОПЕРЕДАЧА

Радиотелефонная связь предполагает передачу информации только для приема конкретным абонентом. При такой передаче сигнала колебания давления воздуха в звуковой волне сначала с помощью микрофона превращаются в электрические колебания той же формы. Однако такие колебания звуковой частоты излучаться практически не будут. Поэтому для передачи звуковой информации используется излучение высокочастотных колебаний, которые, подобно транспортному средству, доставляют ее потребителю. Для этого один из параметров высокочастотных колебаний (амплитуда, фаза) изменяется (модулируется) по закону изменения звуковых колебаний.

Модуляция передаваемого сигнала — кодированное изменение одного из его параметров.

Простейшим видом модуляции высокочастотного сигнала является

амплитудная модуляция — изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.

Для амплитудной модуляции звуковой сигнал подается на первичную обмотку 1 трансформатора T ①. В цепь эмиттера генератора на транзисторе последовательно с LC — колебательным контуром включается вторичная обмотка 2 трансформатора модулирующего устройства. Кроме того, дополнительным элементом в передатчике (по сравнению с генератором на транзисторе) является антенна 3, индуктивно связанная с катушкой индуктивности L колебательного контура. Если звуковой сигнал микрофона 4 отсутствует, сила тока в колебательном контуре изменяется гармонически с несущей частотой ω_0 ②:

$$i = I_0 \cos \omega_0 t . \qquad (1)$$

При появлении в цепи микрофона звукового сигнала частотой $\Omega\,(\Omega \ll \omega_0)$ на вторичной обмотке трансформатора возникает напряжение звуковой частоты Ω. Это напряжение приводит к изменению амплитуды силы тока по закону: $i_\Omega = I_1 \cos \Omega t$. В результате амплитуда высокочастотных колебаний начинает изменяться по гармоническому закону с частотой Ω:

$$i = (I_0 + i_\Omega)\cos \omega_0 t = (I_0 + I_1 \cos \Omega t)\cos \omega_0 t.$$

Такой сигнал можно рассматривать как гармонические колебания с медленно изменяющейся амплитудой, так как $\Omega \ll \omega_0$. Раскрывая скобки в этом выражении и учитывая, что $\cos \Omega t \cos \omega_0 t = 1/2\left[\cos(\omega_0 - \Omega)t + \cos(\omega_0 + \Omega)t\right]$, получаем:

$$i = I_0 \cos \omega_0 t + \frac{I_1}{2}\cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{I_1}{2}\cos(\omega_0 + \Omega)t. \qquad (2)$$

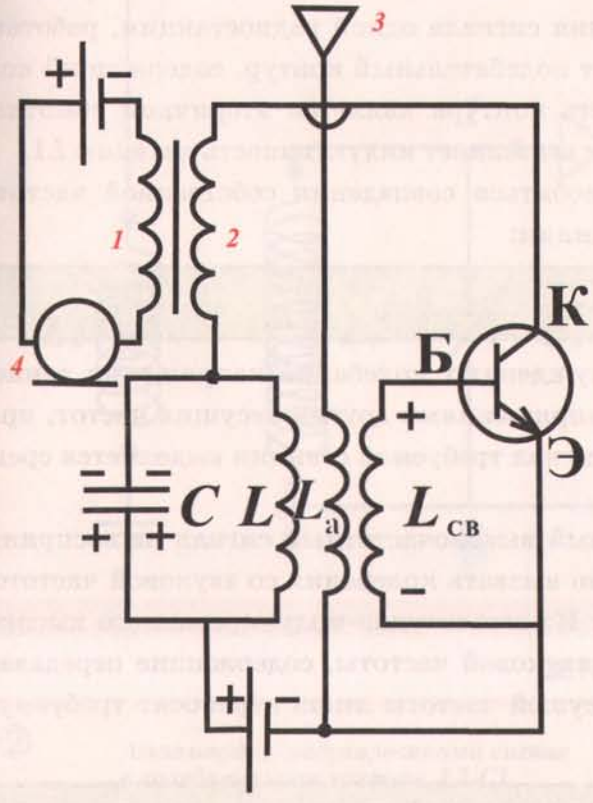
Последнее выражение показывает, что амплитудно-модулированный сигнал можно рассматривать как сумму трех гармонических колебаний с частотой ω_0, $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$. Структуру частот амплитудно-модулированного колебания можно представить в виде ***спектрограммы сигнала***, в которой по горизонтальной оси — частота, а по вертикальной оси — амплитуда колебаний.

Частотная модуляция — изменение несущей частоты по закону изменения звукового сигнала: $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cdot \cos \Omega t$ ③.

Частотная модуляция используется при передаче звуковых сигналов телевидения и УКВ-радиостанций.

РАДИОПЕРЕДАТЧИК АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

① *Схема передатчика*

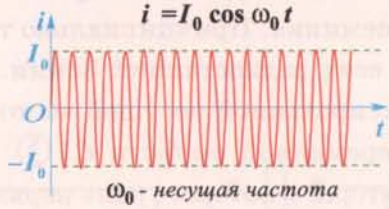


1. Первичная обмотка трансформатора
2. Вторичная обмотка трансформатора
3. Антенна
4. Микрофон

ФОРМИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

② *Высокочастотный сигнал*

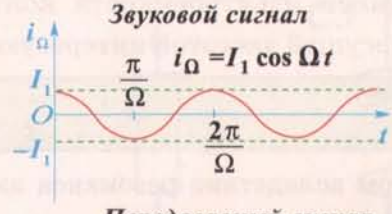
$i = I_0 \cos \omega_0 t$



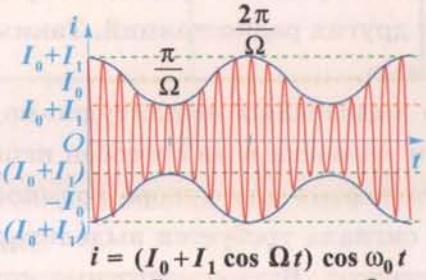
ω_0 - *несущая частота*

Звуковой сигнал

$i_\Omega = I_1 \cos \Omega t$



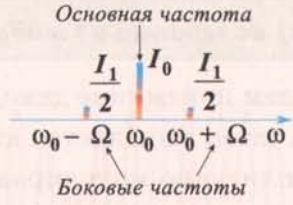
Передаваемый сигнал



$$i = (I_0 + I_1 \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$$

$$i = I_0 \cos \omega_0 t + \frac{I_1}{2} \cos (\omega_0 - \Omega)t + \frac{I_1}{2} \cos (\omega_0 + \Omega)t$$

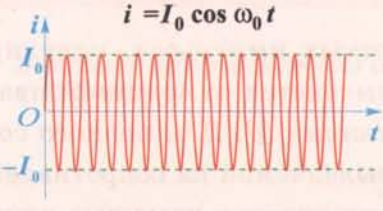
Спектрограмма



ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ (ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕДАВАЕМОГО СИГНАЛА)

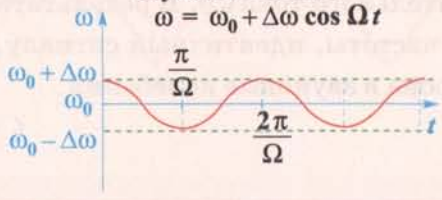
③ *Высокочастотный сигнал*

$i = I_0 \cos \omega_0 t$



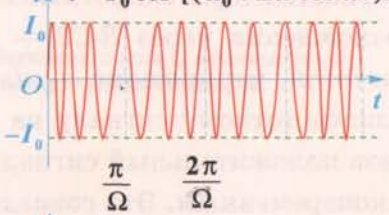
Звуковой сигнал

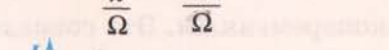
$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$



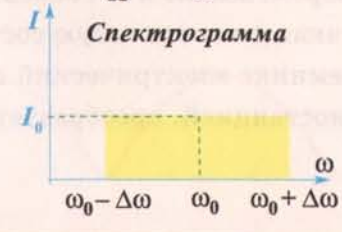
Передаваемый сигнал

$i = I_0 \cos [(\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t)t]$





Спектрограмма



§39. РАДИОПРИЕМ

Радиоволны, излучаемые передатчиком, вызывают вынужденные колебания электронов в антенне приемника. Принципиально такие высокочастотные колебания возникают в приемной антенне от всех радиостанций Земли. Для выделения сигнала одной радиостанции, работающей на фиксированной несущей частоте ω_0, служит колебательный контур, содержащий конденсатор переменной емкости $C1$ ①. Индуктивность контура является вторичной обмоткой трансформатора, у которого роль первичной обмотки выполняет индуктивность антенны $L1$.

Изменением электроемкости контура можно добиться совпадения собственной частоты контура с несущей частотой интересующей радиостанции:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_2 C_1}.$$

При этом вследствие резонанса амплитуда вынужденных колебаний напряжения данной несущей частоты резко возрастет по сравнению с напряжениями других несущих частот, приходящих от других радиостанций. Таким образом, сигнал требуемой станции выделяется среди всех остальных.

Однако выделенный амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал не воспринимается ухом человека и не способен непосредственно вызвать колебания со звуковой частотой мембраны телефона или рупора громкоговорителя. Из амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала требуется выделить колебания звуковой частоты, содержащие передаваемую информацию. Высокочастотные колебания несущей частоты лишь переносят требуемую информацию, но не содержат ее.

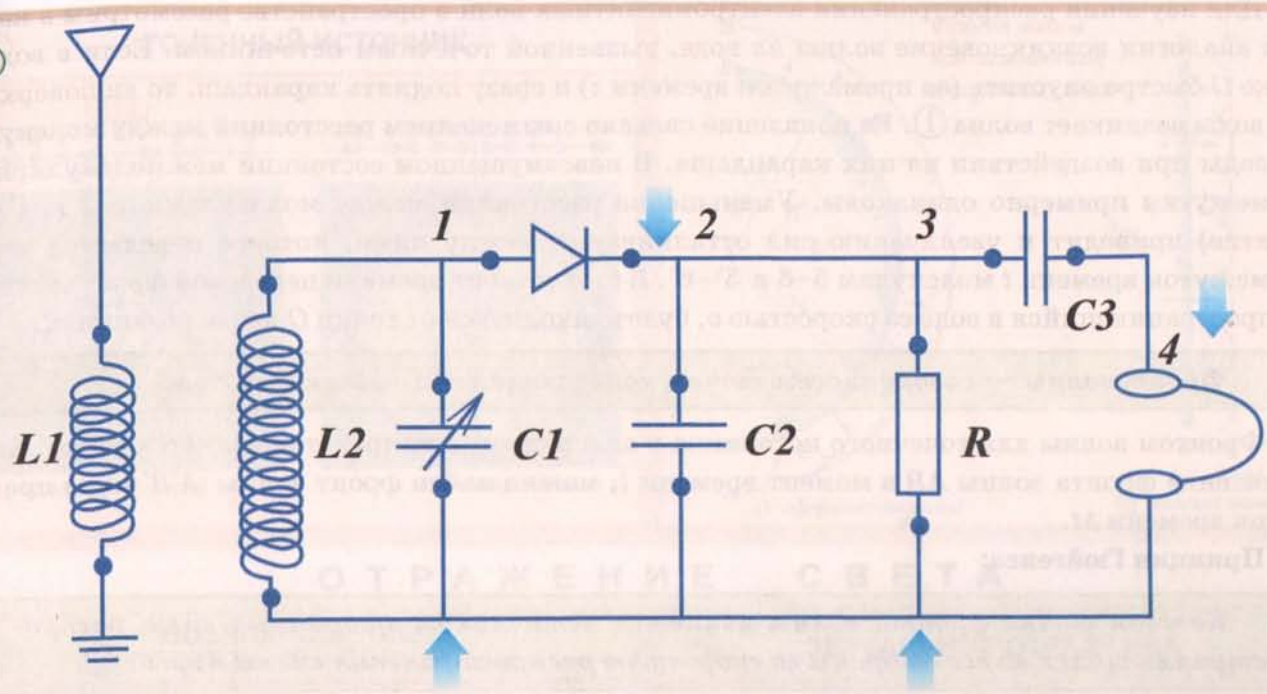
Детектирование (или демодуляция) — процесс выделения низкочастотных (звуковых) колебаний из модулированных колебаний высокой частоты.

В простейшем приемнике демодуляция осуществляется в два этапа: сначала колебания выпрямляются, а затем выделяется низкочастотная огибающая высокочастотных импульсов. Выпрямление амплитудно-модулированного сигнала u_1 несущей частоты, выделенного колебательным контуром во входной цепи, осуществляется полупроводниковым диодом ②. Высокочастотные импульсы напряжения u_2 подаются на параллельно соединенные конденсатор $C2$ и резистор R ③. В период действия отдельного импульса, когда диод открыт, конденсатор заряжается. При закрытом диоде импульсный сигнал не подается на конденсатор, который в этот период разряжается через сопротивление R.

При прохождении через R-$C2$ — фильтр высокочастотных импульсов, модулированных звуковой частотой, напряжение u_3 на сопротивлении R изменяется со временем практически подобно низкочастотному сигналу на передающей радиостанции ④. Для полного совпадения этих сигналов положительный сигнал звуковой частоты, выделяемой на сопротивлении, надо сделать знакопеременным. Это совпадение сигналов осуществляется с помощью конденсатора $C3$, не пропускающего постоянную составляющую положительного тока ⑤. В результате демодуляции в приемнике электрический сигнал u_4 звуковой частоты, идентичный сигналу, передаваемому радиостанцией, преобразуется мембраной телефона в звуковые колебания.

СХЕМА РАДИОПЕРЕДАТЧИКА

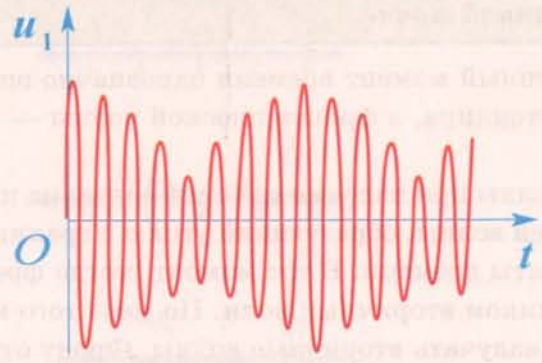
①



ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

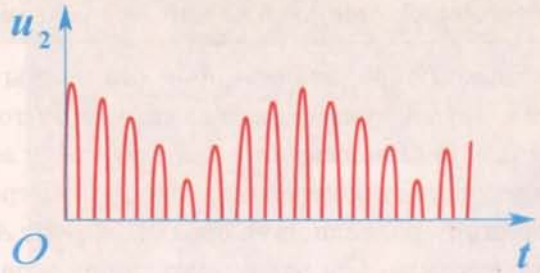
②

Амплитудно-модулированный сигнал в колебательном контуре L2-C1



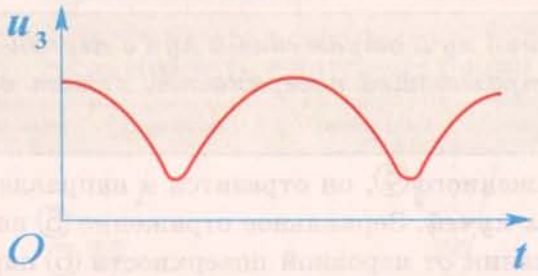
③

Выпрямление амплитудно-модулированного сигнала



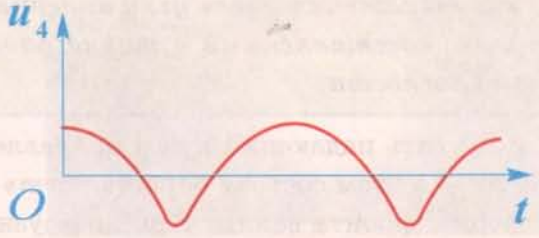
④

Выделение низкочастотного сигнала в RC2-цепочке



⑤

Звуковой сигнал, идентичный сигналу радиостанции



§40. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН

Для изучения распространения электромагнитных волн в пространстве рассмотрим в качестве аналогии возникновение волны на воде, вызванной точечным источником. Если в воду в точке O быстро опустить (за промежуток времени τ) и сразу поднять карандаш, то на поверхности воды возникает волна ①. Ее появление связано с изменением расстояний между молекулами воды при воздействии на них карандаша. В невозмущенном состоянии межмолекулярные промежутки примерно одинаковы. Уменьшение расстояния между молекулами 1–2 и $1'–2'$ (сжатие) приводит к увеличению сил отталкивания между ними, которое передается через промежуток времени t молекулам 5–6 и $5'–6'$. В этот момент времени передовой фронт сжатия, распространяющийся в воде со скоростью v, будет находиться от точки O на расстоянии vt.

Фронт волны — совокупность точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

Фронтом волны для точечного источника в однородном пространстве является сфера. Зная положение фронта волны AB в момент времени t, можно найти фронт волны $A'B'$ через промежуток времени Δt.

Принцип Гюйгенса:

Каждая точка фронта волны является источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью распространения волны в среде ②.

Вторичные волны, распространяющиеся от каждой точки волнового фронта AB, через время Δt удаляются от него на расстояние $v\Delta t$. Сферическая поверхность радиуса $v(t + \Delta t)$, огибающая все вторичные волны в момент времени $t + \Delta t$, определяет положение фронта волны в этот момент времени. Стрелками (лучами) показывают направление распространения волны.

Луч — линия, вектор касательной к которой перпендикулярен фронту волны и направлен в сторону переноса энергии волны в данной точке.

Положение фронта сферической волны в определенный момент времени однозначно определяется двумя лучами, выходящими из точечного источника, а фронта плоской волны — одним лучом, перпендикулярным плоскости волны.

Рассмотрим процесс возникновения отраженной волны при падении плоской волны на плоскую границу раздела двух сред ③. Фронт AB падающей волны, образующий угол α с границей раздела, достигает ее различных точек в разные моменты времени. В тот момент, когда фронт волны достигает точки A, эта точка становится источником вторичных волн. По мере того как волна попадает в точки 1, 2, 3, B', все они начинают излучать вторичные волны. Фронт отраженной волны является плоской поверхностью, касательной к сферическим фронтам вторичных волн. Из равенства прямоугольных треугольников $\Delta AA'B'$ и $\Delta AB'B$ ($AA' = BB'$ и общая гипотенуза AB') следует, что $\angle AB'A' = \angle BAB'$, или $\alpha = \gamma$.

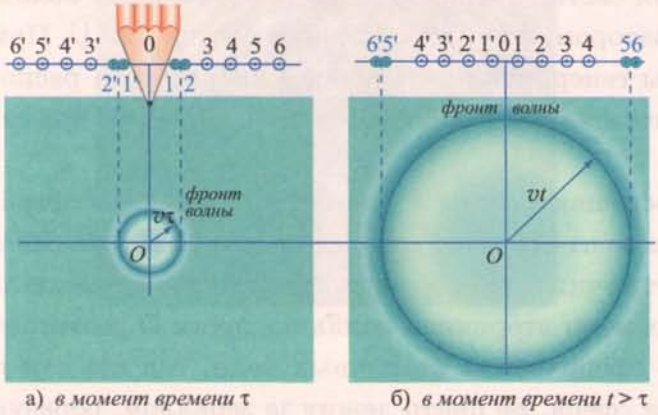
Закон отражения света:

Угол отражения равен углу падения. Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр, восставленный в точке падения к отражающей поверхности, лежат в одной плоскости.

Если пустить падающий луч в направлении отраженного ④, он отразится в направлении падающего — в этом состоит ***обратимость световых лучей***. Зеркальное отражение ⑤ не изменяет формы фронта волны. При диффузном отражении от неровной поверхности ⑥ параллельный пучок падающих лучей не преобразуется в параллельный пучок отраженных лучей.

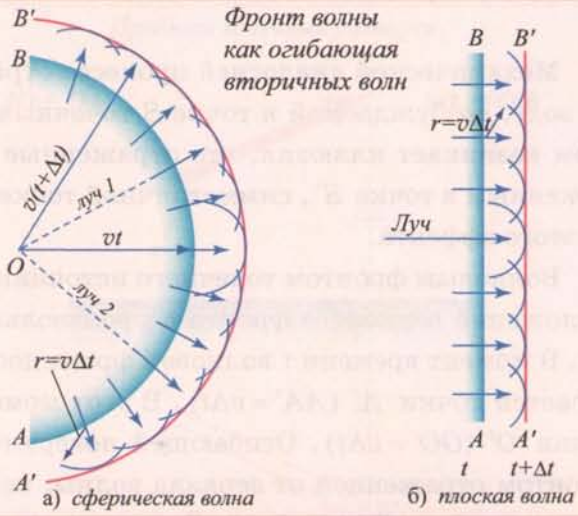
ВОЛНА НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

① ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК



а) *в момент времени* τ б) *в момент времени* $t > \tau$

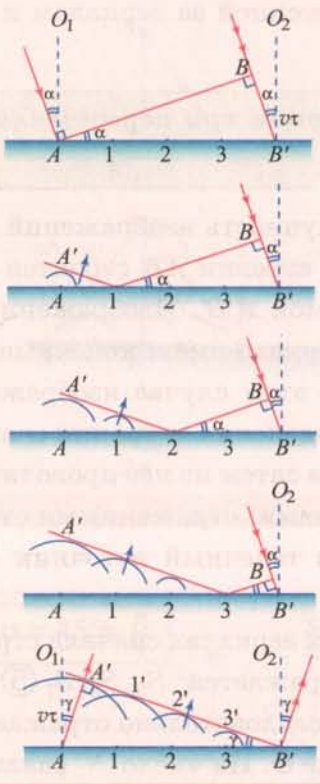
② ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА



а) *сферическая волна* б) *плоская волна*

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

③ ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ



а) *в точке A*

б) *в точке 1*

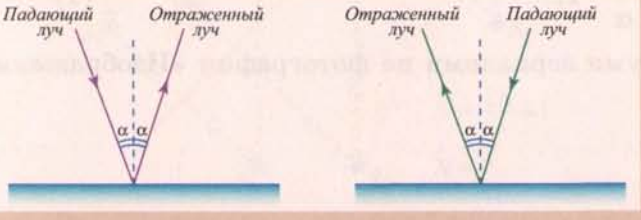
в) *в точке 2*

г) *в точке 3*

д) *в точке B'*

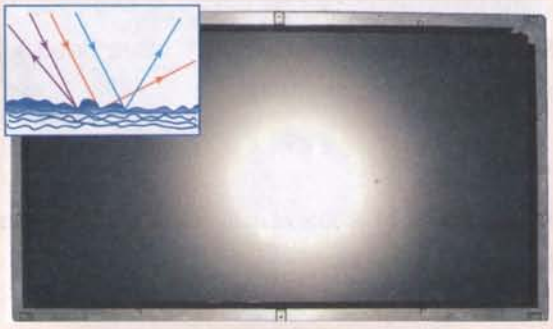
$\gamma = \alpha$

④ ОБРАТИМОСТЬ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ



⑤ ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

⑥ ДИФФУЗНОЕ ОТРАЖЕНИЕ



§41. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТА В ПЛОСКОМ ЗЕРКАЛЕ

Механической аналогией процесса отражения света от зеркала является отражение волны на воде, возбуждаемой в точке S точечным вибратором, от плоской стенки сосуда AB ①. При этом возникает иллюзия, что отраженные волны генерируются точечным вибратором, расположенным в точке S', симметричной точке S относительно стенки ($OS' = OS$). Выясним причину этого эффекта.

Волновым фронтом точечного источника S, освещающего плоское зеркало, является сфера. Положение волнового фронта в произвольный момент времени характеризуют два луча SO и SA. В момент времени τ волновой фронт достигает точки O, а еще через промежуток времени Δt касается точки A' ($AA' = v\Delta t$). В этот момент времени вторичная волна из точки O достигает точки O' ($OO' = v\Delta t$). Огибающей поверхностью сферических вторичных волн, так же как и фронтом отраженной от зеркала волны, является сфера. Ее центр лежит за зеркалом, образуя пучок расходящихся лучей. Для построения изображения точечного источника достаточно использовать два луча 1 и 2 ②. Как видно из построения, $\angle OSA' = \angle OS'A' = \alpha$. Следовательно, $\Delta OS'A' = \Delta OSA'$ (по катету OA' и острому углу). Это означает, что $OS' = OS$. Человеческому глазу, находящемуся в пространстве над зеркалом, кажется, что лучи $S'O$ и $S'A'$ выходят из одной точки S', симметричной точке относительно зеркала, расположенной за зеркалом и воспринимаемой как мнимое изображение источника S.

Мнимое изображение — изображение предмета, возникающее при пересечении продолжения расходящегося пучка лучей.

Изображение источника конечных размеров строится как совокупность изображений всех его точек ③. Например, для построения изображения светящейся стрелки AB строятся изображения крайних точек, которые затем соединяются отрезком прямой $A'B'$. Изображение источника находится в симметричной точке даже в том случае, если зеркало имеет конечные размеры и не находится между предметом и его изображением ④. В этом случае изображение предмета можно наблюдать лишь из ограниченной области. Для определения ее границ сначала находят мнимое изображение предмета S в симметричной точке S', а затем из нее проводят лучи через крайние точки зеркала L и M. Из области между этими лучами, отраженными от зеркала, можно наблюдать мнимое изображение S' предмета S. Если точечный источник S — Солнце, то в этой области видны солнечные зайчики.

При построении изображений точечного источника света S в двух зеркалах сначала строится его изображение S_1 в первом зеркале, которое последовательно отражается: S_3, S_5, S_7 ⑤. Затем строится изображение S_2 источника во втором зеркале и оно последовательно отражается: S_4, S_6. Все семь изображений лежат на окружности с центром в точке O. Их число N связано с углом α между зеркалами:

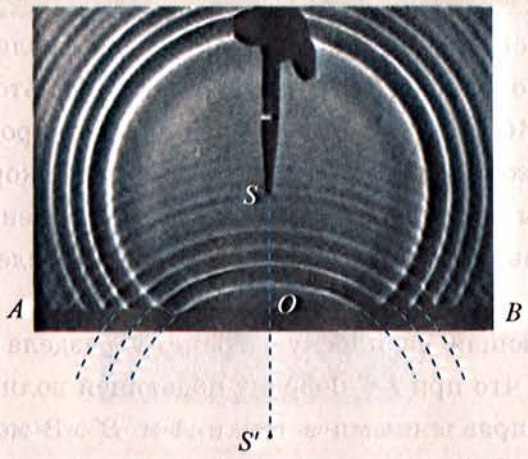
$$N = 2N = \frac{2\pi}{\alpha} - 1. \qquad (1)$$

Формула (1) позволяет найти угол между двумя зеркалами на фотографии «Изображение свечи в двух зеркалах» ⑥.

Изображение предмета в плоском зеркале

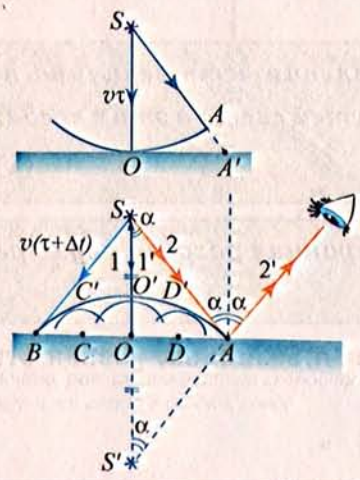
① ИЗОБРАЖЕНИЕ ТОЧКИ В ЗЕРКАЛЕ

Отражение волны на воде от плоской стенки сосуда



② МНИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Отражение сферического волнового фронта световой волны от плоской поверхности

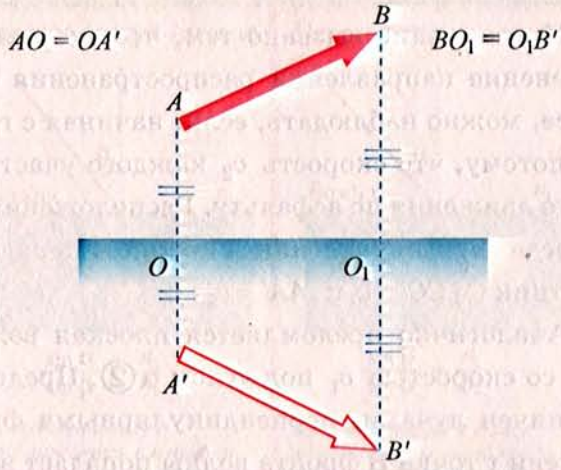


а) *в точке O*

б) *в точках B и A'*

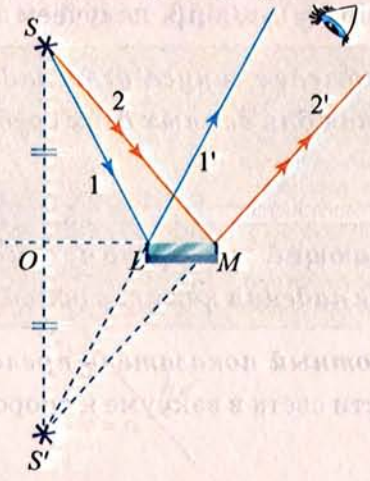
③ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТА

Предмет конечных размеров



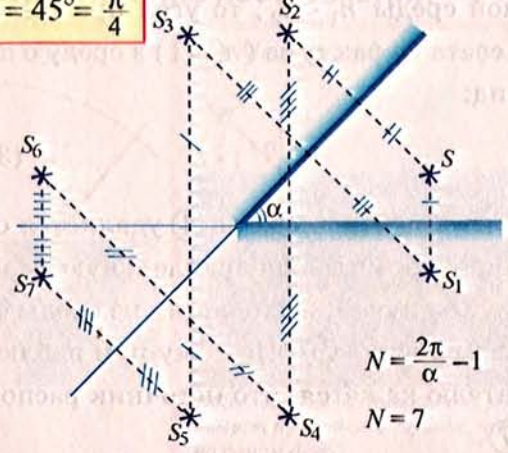
④ ИЗОБРАЖЕНИЕ В НЕБОЛЬШОМ ЗЕРКАЛЕ

Построение изображения точки S с помощью двух лучей



ИЗОБРАЖЕНИЕ В ДВУХ ЗЕРКАЛАХ

⑤ $\alpha = 45° = \frac{\pi}{4}$



$N = \frac{2\pi}{\alpha} - 1$

$N = 7$

⑥ $\alpha = ?$

§42. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Преломление волны — изменение направления распространения волны при прохождении из одной среды в другую.

Преломление вызвано тем, что скорости распространения волн в этих средах различны. Изменение направления распространения фронта колонны $ABCD$, идущей по асфальтовому шоссе, можно наблюдать, если, начиная с границы AC', она попадает в грязь ①. Это происходит потому, что скорость v_2 каждого участника движения по грязи заметно меньше скорости v_1 его движения по асфальту. Расположения колонны показаны в разные моменты времени: $t = 0$, когда первый участник A колонны попадает в грязь, и $t = \tau$, когда в нее попадает последний участник C ($CC' = v_1\tau$; $AA' = v_2\tau$).

Аналогично преломляется плоская волна, падающая на плоскую границу раздела двух сред со скоростью v_1 под углом α ②. Предположим, что при $t = 0$ фронт падающей волны AB ограничен лучами, перпендикулярными фронту, направленными в точки A и B'. В момент времени τ точка B фронта волны попадает в точку B' ($BB' = v_1\tau$). Вторичное излучение от точки A за этот промежуток времени распространяется со скоростью v_2 на расстояние $AA' = v_2\tau$. Огибающей вторичных волн оказывается плоский фронт $A'B'$ преломленной волны, распространяющейся под углом β к границе раздела. Приравнивая выражения для гипотенузы $AB' = v_1\tau/\sin\alpha = v_2\tau/\sin\beta$, получаем **закон преломления света:**

Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$\sin\alpha / \sin\beta = v_1 / v_2 . \qquad (1)$$

Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.

Абсолютный показатель преломления среды — физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = c/v.$$

Для двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 закон преломления можно представить в виде:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_1}{n_2}. \qquad (2)$$

Если луч света падает из оптически менее плотной среды $n_1 < n_2$, то угол преломления β оказывается меньше угла падения α ③. При падении света из вакуума ($n_1 = 1$) в среду с показателем преломления $n_2 = n$ закон преломления имеет вид:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n. \qquad (3)$$

Луч, выходящий из оптически более плотной среды в менее плотную ④ удаляется от перпендикуляра к границе раздела сред ($\alpha > \beta$). Луч, прошедший плоскопараллельную пластину, выходит из нее параллельно направлению падения ⑤. Ход лучей, выходящих из среды с показателем преломления $n_1 = n$ в вакуум $n_2 = 1$ показан на рисунке ⑥. Поэтому при наблюдении точечного источника из менее плотной среды наблюдателю кажется, что источник расположен на глубине в n раз меньшей, чем в действительности ⑦.

ПЛОСКАЯ ВОЛНА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

ПРЕЛОМЛЕНИЕ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ

①

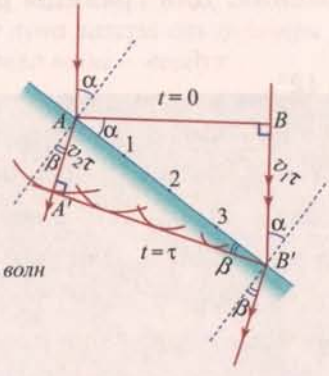
Положение колонны в моменты времени $t = 0$ и $t = \tau$

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРЕЛОМЛЕННОЙ ВОЛНЫ

②

Построение преломленной волны с помощью принципа Гюйгенса

$$AB' = \frac{v_1\tau}{\sin\alpha} = \frac{v_2\tau}{\sin\beta}$$



Закон преломления волн

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Абсолютный показатель преломления среды – физическая величина, равная отношению скорости света в вакууме и скорости света в данной среде

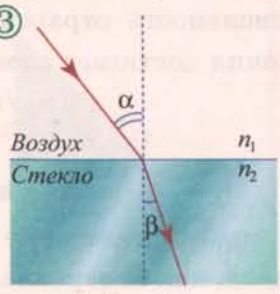
$$n = \frac{c}{v}$$

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЛУЧА

Переход воздух–стекло

③

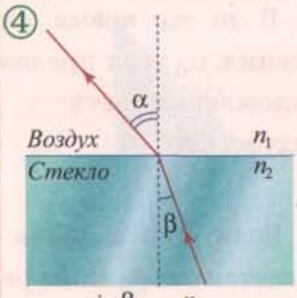


$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Преломленный луч приближается к перпендикуляру к границе раздела

Переход стекло–воздух

④



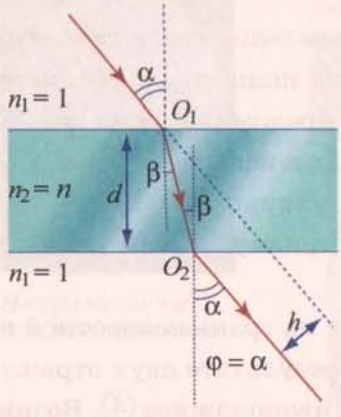
$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{n_1}{n_2}$$

Луч, выходящий в менее оптически плотную среду, удаляется от перпендикуляра

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНОЙ

⑤

Боковое смещение луча



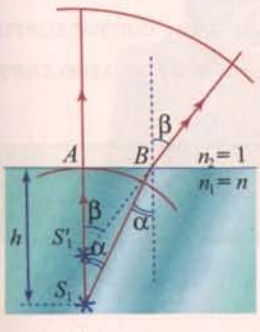
Луч, прошедший плоскопараллельную пластину, выходит из нее параллельно направлению падения

Боковое смещение h луча пропорционально толщине d пластины

ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТА ПРИ ПРЕЛОМЛЕНИИ

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

⑥ *Ход лучей*



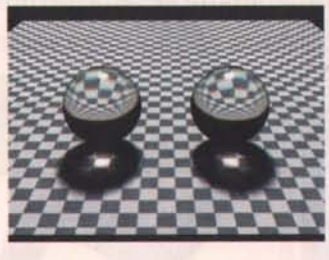
$$S'_1A = \frac{h}{n}$$

⑦ *Мнимое изображение рыбы*

Наблюдателю кажется, что рыба плывет на меньшей глубине, чем на самом деле

ЭФФЕКТЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Изображение клеток на столе



Кажущаяся форма предмета

§43. ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

Свет, распространяющийся в воде от точечного источника S, падающий на поверхность воды под малым углом α, частично преломляется и частично отражается ①, ②. С ростом угла падения возрастает угол преломления β ($\beta > \alpha$), а интенсивность преломленного света уменьшается. В то же время интенсивность отраженного света увеличивается. При некотором угле падения α_0 угол преломления достигает своего максимального значения $\beta_{max} = 90°$. Из закона преломления света $\sin\alpha_0 / \sin 90° = 1/n$,
следует, что

$$\alpha_0 = \arcsin(1/n).$$

Если угол падения $\alpha > \alpha_0$, преломление света в воздух прекращается. Свет полностью отражается от границы раздела, как от зеркала. Возникает

полное внутреннее отражение — явление отражения света от оптически менее плотной среды, при котором преломление отсутствует, а интенсивность отраженного света практически равна интенсивности падающего.

Угол полного внутреннего отражения α_0 — минимальный угол падения света, начиная с которого возникает явление полного внутреннего отражения. Для границы раздела стекло — воздух угол полного внутреннего отражения равен:

$$\alpha_0 = \arcsin(1/1{,}52) = 42°.$$

Рассмотрим преломление света стеклянной треугольной призмой с преломляющим углом $\alpha = 45°$, большим угла полного внутреннего отражения α_0 ③. Луч, падающий нормально на грань AB призмы, не преломляется на ней. Его угол падения на грань AC равен $45° > \alpha_0$, поэтому в точке падения O он испытывает полное внутреннее отражение. На грань BC отраженный луч падает перпендикулярно и не преломляется, выходя из призмы под углом 90^0 к направлению падения. Такую призму называют ***поворотной призмой***, так как она поворачивает луч на угол 90^0.

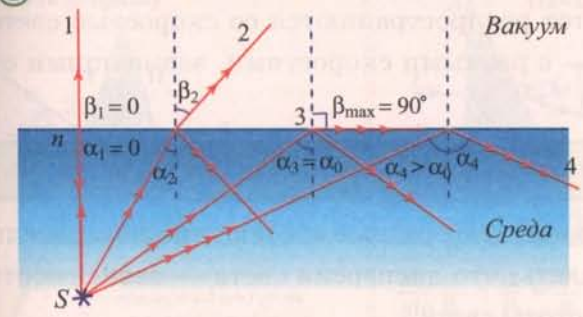
При падении луча на грань поворотной призмы, проектирующуюся в сечении в гипотенузу AC, падающий луч в результате двух отражений от граней AB и BC изменяет направление распространения на противоположное ④. Возникает обращение светового луча. Подобные призмы определяют отражение световращателей (катафотов) автомобилей, обеспечивающих их безопасную стоянку и движение. Полное внутреннее отражение используется в перископах ⑤, призматических биноклях ⑥, зеркальных фотоаппаратах.

Испытывая полное внутреннее отражение, световой сигнал может распространяться внутри гибкого стекловолокна (световода) ⑦. Свет может покидать волокно лишь при больших начальных углах падения и при значительном изгибе волокна. Использование пучка, состоящего из тысяч гибких стекловолокон (с диаметром каждого волокна от 0,002 – 0,01 мм), позволяет передавать из начала в конец пучка оптические изображения ⑧.

Волоконная оптика — система передачи оптических изображений с помощью стекловолокон (световодов).

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

① *Уменьшение интенсивности преломленного луча с увеличением угла падения света*

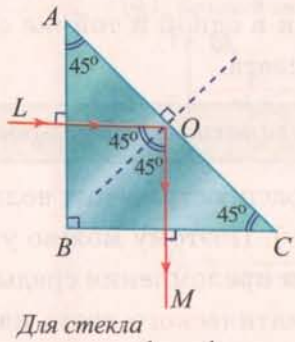


При угле падения $\alpha > \alpha_0$ (угла полного внутреннего отражения) свет не выходит из воды

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} \qquad \frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^0} = \frac{1}{n}$$

ПРИЗМА ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

③ *Поворот луча на 90°*

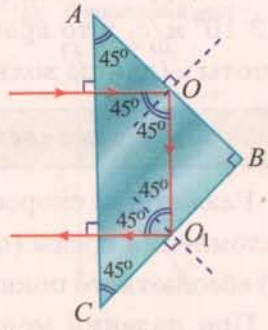


Для стекла

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_c} = \frac{1}{1{,}5}$$

$$\alpha_0 \simeq 42^0$$

④ *Отражение луча (поворот на 180°)*

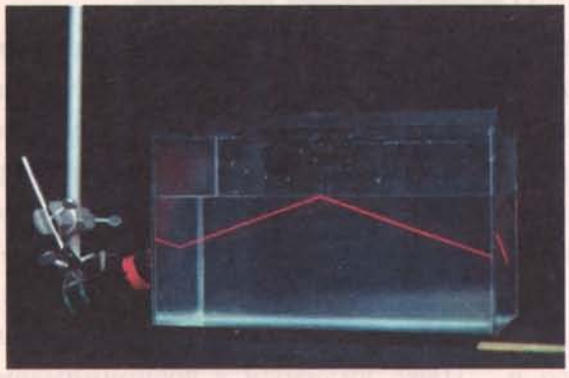


Угол падения света

$$\alpha = 45^0 > \alpha_0$$

ХОД ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ВОДЕ

② *Отражение луча лазера от границы раздела вода – воздух*



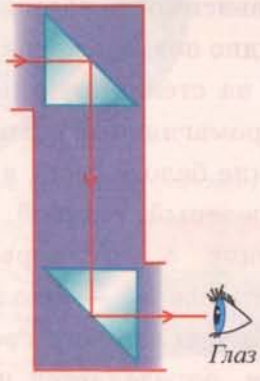
Луч не выходит в воздух после отражения

ПЕРИСКОП

⑤ *Поворотные призмы в перископе*

Изображение над поверхностью воды

Ход лучей в перископе



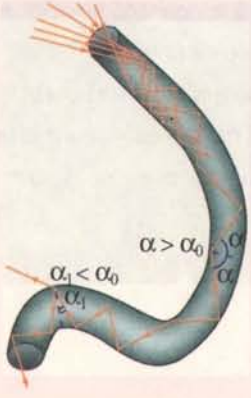
БИНОКЛЬ

⑥ *Оптическая схема*

Использование поворотных призм в бинокле

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

⑦ *Распространение света в световоде*



⑧ *Осветитель*

§44. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Монохроматическая волна — электромагнитная волна определенной постоянной частоты.

В вакууме монохроматические волны любых частот распространяются со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, в то время как в одной и той же среде — с разными скоростями, зависящими от частоты ν (длины волны λ) света.

Дисперсия света — зависимость скорости света в веществе от частоты волны.

Различным скоростям распространения волн соответствуют разные абсолютные показатели преломления среды ($n = c/\nu$). Поэтому можно утверждать, что дисперсия света — зависимость $n(\nu)$ абсолютного показателя преломления среды от частоты света.

При падении монохроматического света на грань I призмы с преломляющим лучом α ① луч 1 частично отражается (луч 2) и частично преломляется (луч 3). В результате преломления на грани II луч 4 выходит из призмы, а отражение от этой грани дает луч 5, преломляющийся на грани III и выходящий из призмы (луч 6).

При нормальном падении луча LO на грань AB призмы с преломляющим лучом $\alpha < \alpha_0$ — угла полного внутреннего отражения ②, преломленный луч отклоняется от первоначального направления к основанию на угол

$$\delta = \beta - \alpha \approx \alpha(n - 1).$$

Зависимость абсолютного показателя преломления среды от частоты световой волны была наглядно подтверждена в 1666 г. ***Исааком Ньютоном***, направившим тонкий пучок солнечного света на стеклянную призму. Солнечный свет не является монохроматическим, а содержит электромагнитные волны различных частот ③. За призмой наблюдалось пространственное разложение белого света в цветной спектр: семь основных цветов — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый плавно переходили друг в друга. Наименьшее отклонение $\delta_к$ от первоначального направления падения испытывают красные лучи, а наибольшее $\delta_ф$ — фиолетовые ④, ⑤. Это означает, что абсолютный показатель преломления $n_ф$ для фиолетового света больше, чем для красного $n_к$. Цвет, видимый и воспринимаемый глазом, определяется частотой световой волны. Частота фиолетового света больше частоты красного. Таким образом, из опыта с призмой Ньютона следует, что абсолютный показатель преломления возрастает с увеличением частоты света. Выясним физический механизм дисперсии. Под действием напряженности $\vec{E}_1$ электрического поля световой волны частоты ω валентные электроны атомов среды совершают вынужденные гармонические колебания и с определенным запаздыванием начинают излучать вторичные волны той же частоты и напряженности $\vec{E}_2$. Амплитуда вторичной волны зависит от частоты световой волны $E_2 \sim 1/\left|\omega_0^2 - \omega^2\right|$, где ω_0 — частота собственных колебаний электрона в атоме. С ростом частоты ($\omega < \omega_0$) амплитуда вторичной волны возрастает. При этом увеличивается время запаздывания, уменьшается скорость распространения волны и возрастает абсолютный показатель преломления среды.

Возникновение радуги — результат дисперсии света в каплях воды ⑥, когда излучение разных цветов, входящее в состав солнечного света, пространственно разделяется ⑦, ⑧.

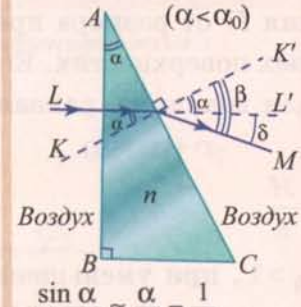
ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПРИЗМОЙ

① *Ход лучей*

Падение монохроматического света на призму

1 - *падающий луч*
2 - *отраженный от I грани*
3 - *преломленный на I грани*
4 - *преломленный на II грани*
5 - *отраженный от II грани*
6 - *преломленный на III грани*

② *Угол отклонения преломленного луча* $(\alpha < \alpha_0)$



$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \approx \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1}{n}$$

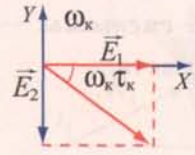
$$\beta = n\alpha$$

$$\delta = \beta - \alpha = \alpha\,(n-1)$$

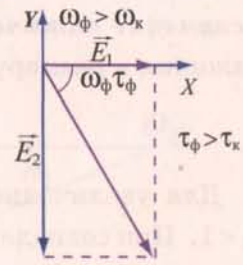
ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ СВЕТА

Зависимость времени запаздывания световой волны от амплитуды вторичной волны $\vec{E}_2$

④ Красный свет



⑤ Фиолетовый свет



$$E_2 \sim \frac{1}{|\omega_0^2 - \omega^2|}$$

$$n_ф > n_к$$

РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА В ЦВЕТНОЙ СПЕКТР

③ *Призма Ньютона*

Фиолетовый свет преломляется сильнее, чем красный

ОБРАЗОВАНИЕ РАДУГИ

⑥ *Преломление света в капле воды*

Возникновение цветного спектра

РАДУГА В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ

⑦

РАДУГА В ГОРОДЕ

⑧

§45. ЛИНЗЫ

При преломлении света на плоских границах пространственно ограниченных прозрачных сред, таких как плоскопараллельная пластинка, призма, размер изображения остается равным размеру предмета. Отличие размера изображения H от размера предмета h наблюдается при преломлении света на криволинейных прозрачных поверхностях. Его характеризует ***линейное увеличение оптической системы*** — физическая величина, равная отношению размера изображения к размеру предмета:

$$\Gamma_0 = \frac{H}{h}.$$

Для увеличенного изображения ($H > h$) $\Gamma_0 > 1$, при уменьшенном изображении ($H < h$) $\Gamma_0 < 1$. При совпадении размера изображения с размером предмета ($H = h$) $\Gamma_0 = 1$.

Важнейшим элементом многочисленных оптических приборов и систем, начиная от очков и кончая гигантскими телескопами, является

линза — прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.

Дадим определения основных геометрических характеристик линзы ①.

Главная оптическая ось — прямая, на которой лежат центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу. Главная оптическая ось O_1O_2 является осью симметрии линзы.

Главная плоскость линзы — плоскость, проходящая через центр линзы (точку O) перпендикулярно главной оптической оси. Главная плоскость MN проходит через линию пересечения сферических поверхностей с радиусами R_1 и R_2, называемыми ***радиусами кривизны***.

Будем считать, что для сферической поверхности, выпуклой относительно главной плоскости, радиус кривизны положителен. Для сферической поверхности, вогнутой относительно главной плоскости, радиус кривизны отрицателен.

Одна из сферических поверхностей линзы может быть плоской. Плоскую поверхность можно рассматривать как частный случай сферической, радиус кривизны которой стремится к бесконечности.

По форме ограничивающих поверхностей различают шесть типов линз:

выпуклые линзы	***вогнутые линзы***
• двояковыпуклая;	• двояковогнутая;
• плоско-выпуклая;	• плоско-вогнутая;
• вогнуто-выпуклая;	• выпукло-вогнутая.

Выпуклые линзы являются собирающими.

Собирающие линзы — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в сходящийся ②, ③.

Вогнутые линзы являются рассеивающими.

Рассеивающие линзы — линзы, преобразующие параллельный пучок световых лучей в расходящийся ④, ⑤, ⑥.

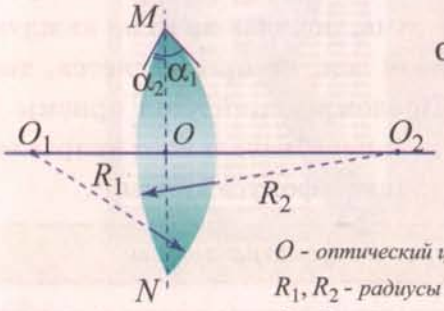
Для простоты рассматривают преломление световых лучей тонкими линзами.

Тонкая линза — линза, толщина l которой пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхности ($l \ll R_1, R_2$).

СОБИРАЮЩИЕ ЛИНЗЫ

① ДВОЯКОВЫПУКЛАЯ ЛИНЗА

Линза – прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями



$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$

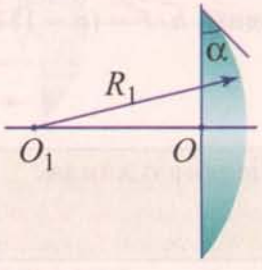
O - оптический центр

R_1, R_2 - радиусы кривизны

O_1, O_2 - главная оптическая ось

② ПЛОСКО-ВЫПУКЛАЯ ЛИНЗА

Двояковыпуклую линзу можно рассматривать как совокупность двух плоско-выпуклых линз



$\alpha = \alpha_1$

$\alpha_2 = 0$

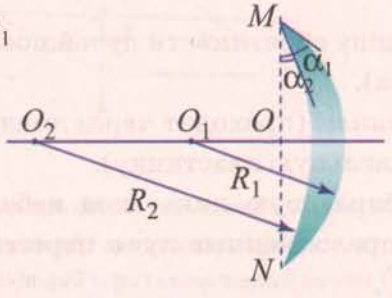
$R_1 > 0$

$R_2 \to \infty$

③ ВОГНУТО-ВЫПУКЛАЯ ЛИНЗА

Вогнуто-выпуклую линзу можно рассматривать как совокупность двух плоско-выпуклых линз

$|R_2| > R_1$



$R_1 > 0$

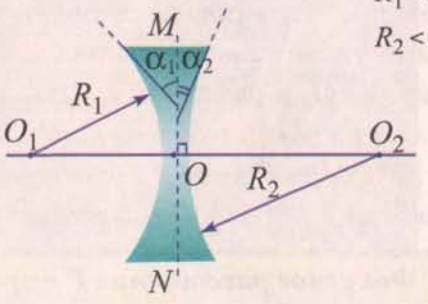
$R_2 < 0$

РАССЕИВАЮЩИЕ ЛИНЗЫ

④ ДВОЯКОВОГНУТАЯ ЛИНЗА

$R_1 < 0$

$R_2 < 0$



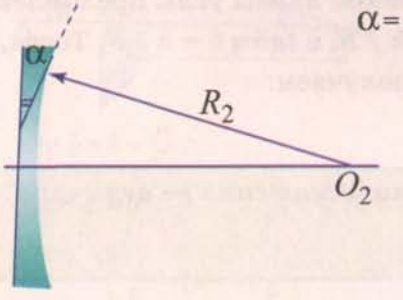
Преломляющий угол линзы

$\alpha = -(|\alpha_1| + |\alpha_2|)$

⑤ ПЛОСКО-ВОГНУТАЯ ЛИНЗА

Двояковогнутую линзу можно рассматривать как совокупность двух плоско-вогнутых линз

$\alpha = \alpha_2$

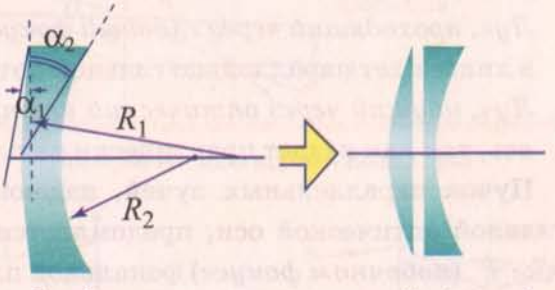


$R_1 \to \infty$

$R_2 < 0$

⑥ ВЫПУКЛО-ВОГНУТАЯ ЛИНЗА

Выпукло-вогнутую линзу можно рассматривать как совокупность плоско-вогнутой и плоско-выпуклой линз



$R_1 > 0$

$R_2 < 0$

$R_1 > |R_2|$

$\alpha = -(|\alpha_2| - \alpha_1)$

§46. СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА. ХОД ЛУЧЕЙ

Как показывает эксперимент ①, ②, пучок световых лучей, падающих на собирающую линзу параллельно ее главной оптической оси, собирается после преломления в линзе в одной и той же точке F на этой оси, называемой ***главным фокусом линзы***.

Объясним этот эффект на примере плоско-выпуклой линзы с радиусом кривизны R и показателем преломления n, которую условно можно представить как совокупность призм с различными углами преломления ③. Соответственно преломление луча, попадающего на каждую из призм, будет различным. Луч 1, направленный вдоль главной оси, не преломляется, так как падает практически на плоскопараллельную пластинку. Преломляющий угол призмы 2 равен β. Поэтому после прохождения призмы луч 2 отклоняется от первоначального направления на угол $\delta_B = \beta(n-1)$ и пересекает главную оптическую ось в главном фокусе линзы F.

Фокусное расстояние F — расстояние от главного фокуса до центра линзы

связано с ее радиусом кривизны ④. Луч 3 падает на призму с преломляющим углом α под углом α и отклоняется от горизонтали (первоначального направления его падения) на угол $\angle\delta = \angle AFO$ (как накрест лежащие углы при параллельных прямых). Радиус кривизны $O_1A = R$ в точке A совпадает по направлению с перпендикуляром к преломляющей грани призмы и составляет с оптической осью O_1O угол α. Угол δ можно найти из ΔAOF: $\mathrm{tg}\delta = h/F$, а угол α из ΔAO_1O: $\sin\alpha = h/R$.

Для тонкой линзы углы преломления α (и соответственно δ) столь малы, что можно считать $\sin\alpha \approx \alpha = h/R$, а $\mathrm{tg}\delta \approx \delta = h/F$. Тогда, учитывая связь δ и α, находим: $h/F = (n-1)\,h/R$. Сокращая на h, получаем:

$$1/F = (n-1)/R.$$

Оптическая сила — величина, обратная фокусному расстоянию линзы:

$$D = 1/F.$$

Единица оптической силы — *диоптрия* (дптр).

Оптическая сила собирающей линзы в вакууме определяется радиусами кривизны R_1, R_2 ее поверхности и абсолютным показателем преломления материала линзы:

$$D = (n-1)(1/R_1 + 1/R_2).$$

Характерные лучи, достаточные для построения хода любого луча, преломленного тонкой собирающей линзой, а также для получения изображения предмета в ней ⑤.

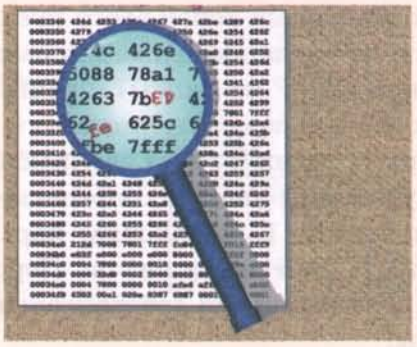
- *Луч, параллельный главной оптической оси* (преломляясь в линзе, проходит через ее главный фокус),
- *Луч, проходящий через главный фокус* (по принципу обратимости лучей после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси),
- *Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы* (проходит через линзу, не преломляясь, так как падает практически на плоскопараллельную пластинку).

Пучок параллельных лучей, падающих на собирающую линзу под небольшим углом γ к главной оптической оси, преломляется так, что преломленные лучи пересекаются в одной точке F' (***побочном фокусе***) фокальной плоскости ⑥.

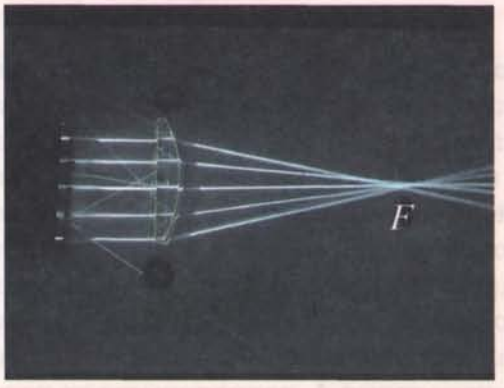
Фокальная плоскость линзы — плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси.

① ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЗЫ

Текст через собирающую линзу

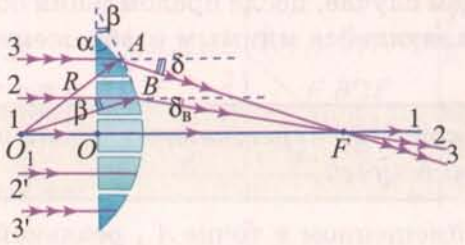


② ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЛУЧЕЙ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ГЛАВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ



③ ГЛАВНЫЙ ФОКУС ЛИНЗЫ

Преломление собирающей линзой лучей, параллельных главной оптической оси

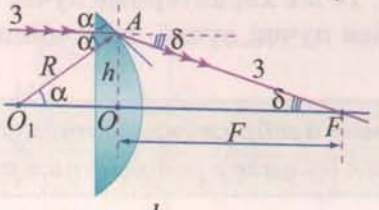


Главный фокус собирающей линзы – точка на главной оптической оси, в которой собираются лучи, падающие параллельно главной оптической оси, после преломления их в линзе

④ ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ

Связь фокусного расстояния с радиусом кривизны линзы

$$\delta = \alpha(n-1)$$

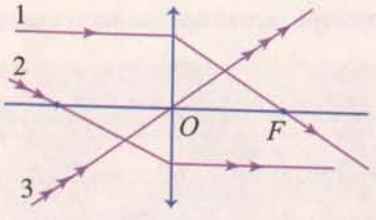


$$\operatorname{tg}\delta \approx \delta = \frac{h}{F};$$

$$\sin\alpha \approx \alpha = \frac{h}{R} \Rightarrow \frac{h}{F} = \frac{h}{R}(n-1)$$

$$\boxed{\frac{1}{F} = (n-1)\frac{1}{R}}$$

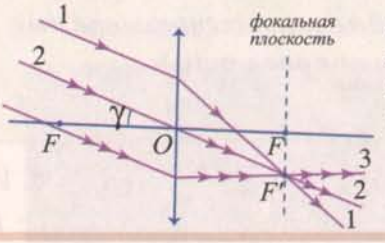
⑤ ХАРАКТЕРНЫЕ ЛУЧИ



1 – *луч, параллельный главной оптической оси*
2 – *луч, проходящий через главный фокус*
3 – *луч, проходящий через оптический центр*

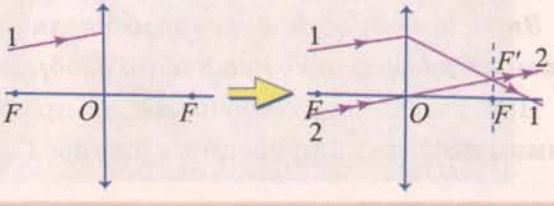
⑥ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЛУЧИ

Преломление параллельных лучей



После преломления лучи сходятся в точке F′ в фокальной плоскости

Построение хода параллельного луча



§47. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТА В СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЕ

Изображение предмета складывается из изображений отдельных точек этого предмета ①. В собирающей линзе с фокусным расстоянием F возможны два типа изображения светящейся точки: действительное (если точка находится на расстоянии $d > F$ от линзы) и мнимое (если точка находится на расстоянии $d < F$ от линзы). Построим сначала изображение точки A, находящейся на расстоянии h от главной оптической оси и на расстоянии $d > F$ от собирающей линзы. Положение сферического фронта световой волны, излучаемой точкой A, определяется двумя характерными лучами, выходящими из этой точки: лучом 1, падающим параллельно главной оптической оси, и лучом 2, проходящим через оптический центр линзы. Пересечение этих лучей, преломленных линзой, происходит в точке A', являющейся действительным изображением точки A, находящимся на расстоянии f от линзы.

Действительное изображение точки A — точка A', в которой сходится после преломления в линзе пучок лучей, испускаемых точкой A.

На экране, помещенном в точке A', видна светящаяся точка.

Найдем изображение светящейся точки A, расположенной между главным фокусом и линзой $d < F$ ②. Те же характерные лучи, что и в предыдущем случае, после преломления образуют расходящийся пучок лучей, выходящий из точки A', являющейся мнимым изображением точки A.

Мнимое изображение точки A — точка A', в которой пересекаются после преломления в линзе продолжения расходящегося пучка лучей,

как бы (мнимо) испускаемых точкой A'. На экране, помещенном в точке A', реальной светящейся точки нет.

Изображение линейного предмета AB в линзе находится путем построения изображений его крайних точек ③. Сначала строится изображение точки A, не находящейся на главной оптической оси. Будем использовать, как и ранее, два характерных луча: луч 1, параллельный главной оптической оси, и луч 2, проходящий через оптический центр O линзы. Построив изображение A', опускаем перпендикуляр на главную оптическую ось и находим точку B', являющуюся изображением точки B.

Для характеристики размера и ориентации изображения относительно предмета используют

поперечное увеличение линзы — отношение координаты y_f изображения к координате y_d предмета, отсчитываемых перпендикулярно главной оптической оси (в поперечном направлении):

$$\Gamma = y_f / y_d.$$

Если $d > 2F$, то $y_d = h$; $y_f = -H$, $|y_f| < h$. Изображение предмета — действительное, перевернутое, уменьшенное. Если $F < d < 2F$, $y_d = h$; $y_f = -H$, $|y_f| > h$ ④. Изображение предмета — действительное, перевернутое, увеличенное.

Если $d < F$, $y_d = h$; $y_f = H > h$, изображение предмета мнимое, прямое, увеличенное.

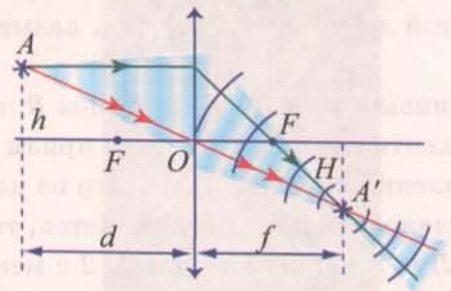
Знак и модуль поперечного увеличения определяет взаимную ориентацию и относительный размер предмета и его изображения в линзе.

При увеличенном изображении предмета в линзе $|\Gamma| > 1$, а при уменьшенном $|\Gamma| < 1$. При прямом изображении предмета в линзе $\Gamma > 0$, а при перевернутом $\Gamma < 0$.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Формирование действительного изображения точки

①

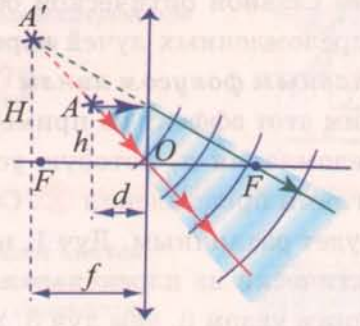


Линза преобразует сферический фронт падающей расходящейся световой волны во фронт сходящейся преломленной волны

МНИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Формирование мнимого изображения точки

②



Линза преобразует сферический фронт расходящейся падающей волны во фронт расходящейся преломленной волны

Построение изображения с помощью двух лучей

③

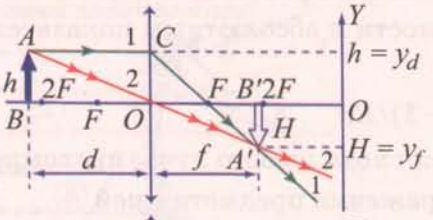
1) $d > 2F$

Изображение уменьшенное:

$|\Gamma| < 1$,

перевернутое:

$\Gamma < 0$



2) $F < d < 2F$

Изображение увеличенное:

$|\Gamma| > 1$,

перевернутое:

$\Gamma < 0$

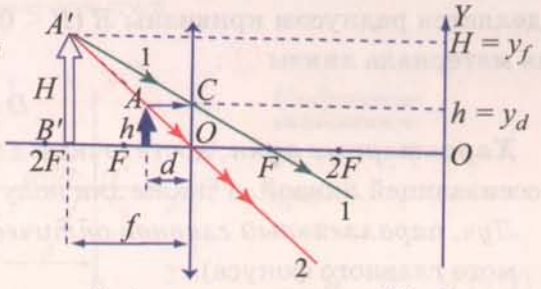
Формула линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Построение изображения с помощью двух лучей

④

$d < F$



Изображение увеличенное: $|\Gamma| > 1$,

прямое: $\Gamma > 0$

Формула линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|}$$

Уменьшенное перевернутое изображение

Увеличенное прямое изображение

§48. РАССЕИВАЮЩАЯ ЛИНЗА

Как показывает эксперимент, пучок световых лучей, падающих на собирающую линзу параллельно ее главной оптической оси, отклоняется после преломления в линзе так, что продолжения преломленных лучей пересекаются в одной и той же точке F этой оси, называемой ***мнимым главным фокусом линзы*** ①.

Объясним этот эффект на примере плоско-вогнутой линзы с радиусом кривизны R и показателем преломления n, которую условно можно представить как совокупность призм с различными углами преломления ②. Соответственно преломление луча, попадающего на каждую из призм, будет различным. Луч 1, направленный вдоль главной оси, не преломляется, так как падает практически на плоскопараллельную пластинку. Луч 2 падает на призму 2 с меньшим преломляющим углом β, чем луч 3, падающий на призму с преломляющим углом $\alpha > \beta$. Поэтому после прохождения призмы луч 2 меньше отклоняется от горизонтали, чем луч 3 ($\delta_B = \beta(n-1) < \delta$). Продолжения преломленных лучей пересекаются на главной оптической оси в точке F. Из мнимого главного фокуса, лежащего по другую сторону от линзы, чем фокус собирающей, как бы выходит расходящийся пучок лучей. Поэтому фокусное расстояние рассеивающей линзы (и ее оптическая сила D) считаются отрицательными: $F < 0$, $D < 0$.

Так же как и для собирающей линзы, оптическая сила рассеивающей линзы в вакууме определяется радиусом кривизны R ($R < 0$) ее поверхности и абсолютным показателем преломления материала линзы ③:

$$D = 1/F = (n - 1)/R.$$

Характерные лучи, достаточные для построения хода любого луча, преломленного тонкой рассеивающей линзой, а также для получения изображения предмета в ней ④.

- *Луч, параллельный главной оптической оси* (преломляясь в линзе, выходит как бы из мнимого главного фокуса).
- *Луч, падающий в направлении мнимого главного фокуса, находящегося за линзой* (по принципу обратимости лучей после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси).
- *Луч, идущий через оптический центр тонкой линзы* (проходит через линзу, не преломляясь, так как падает практически на плоскопараллельную пластинку).

Пучок параллельных лучей, падающих на рассеивающую линзу под небольшим углом γ к главной оптической оси, преломляется так, что продолжения преломленных лучей пересекаются в одной и той же точке F' (побочном фокусе) фокальной плоскости линзы ⑤.

Изображение линейного предмета AB, находящегося на расстоянии d от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием F, находится путем построения изображений крайних точек ⑥.

Поперечное увеличение рассеивающей линзы $\Gamma = H/h > 0$.

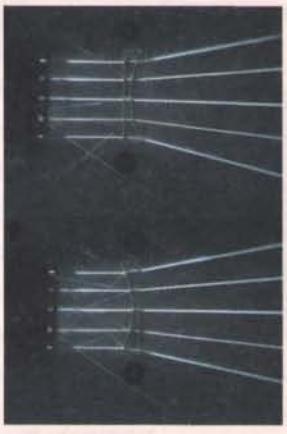
Изображение предмета в рассеивающей линзе — мнимое, прямое $\Gamma > 0$, уменьшенное $|\Gamma| < 1$.

Формула тонкой рассеивающей линзы имеет вид:

$$-\frac{1}{|F|} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|}.$$

ПАДЕНИЕ ЛУЧЕЙ СВЕТА НА ЛИНЗУ

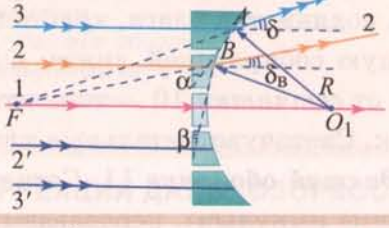
① *Преломление лучей, параллельных главной оптической оси*



ГЛАВНЫЙ ФОКУС ЛИНЗЫ

Преломление рассеивающей линзой лучей, параллельных главной оптической оси

②



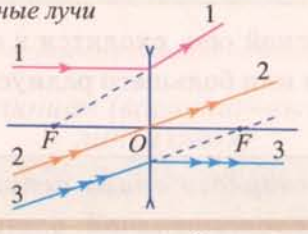
③ *Фокусное расстояние*

Оптическая сила $D = \frac{1}{F} = -(n-1)\frac{1}{|R|}$

ОСНОВНЫЕ ЛУЧИ В ЛИНЗЕ

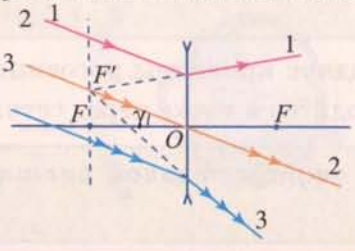
Характерные лучи

④



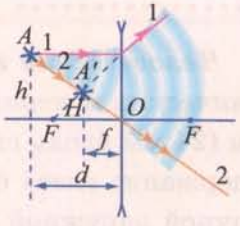
Лучи, параллельные главной оптической оси

⑤

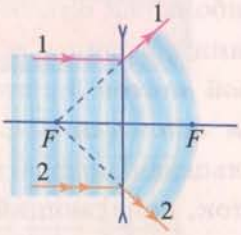


ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

⑥ *Преобразование сферической падающей волны в сферическую преломленную*



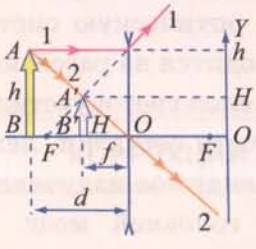
Преобразование плоской падающей волны в расходящуюся сферическую преломленную волну, выходящую как бы из мнимого фокуса



ИЗОБРАЖЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ПРЕДМЕТА

Построение изображения предмета с помощью двух лучей

⑦



Изображение уменьшенное: $\Gamma < 1$,

прямое: $\Gamma > 0$

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{|f|}{d} = \frac{|F| - |f|}{|F|}$$

Формула рассеивающей линзы

$$-\frac{1}{|F|} = \frac{1}{d} - \frac{1}{|f|}$$

УМЕНЬШЕННОЕ ПРЯМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Изображения в рассеивающих линзах с разным фокусным расстоянием

§49. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Человеческий глаз — достаточно сложная оптическая система, сформировавшаяся из органических материалов в процессе длительной биологической эволюции ①. Глаз почти сферичен (24 мм вдоль главной оптической оси и 22 мм в поперечном направлении). Желеподобное содержание глаза окружено плотной гибкой оболочкой 1 (***склерой***). За исключением ее прозрачной наружной части 2 (***роговица***) склера белого цвета и непрозрачна. Роговица обладает наибольшей оптической силой среди других оптических элементов глаза. Показатель преломления роговицы $n_1 \approx 1{,}376$. Пройдя роговицу, свет попадает в полость, заполненную ***водянистой влагой*** 3 с показателем преломления $n_2 = 1{,}336$. В водянистую влагу погружена ***радужная оболочка*** 4 с отверстием 5 (***зрачком***). Радужная оболочка — подвижная мышечная кольцевая диафрагма, сжимаясь и растягиваясь, изменяет размер зрачка и тем самым световой поток, попадающий в глаз. Через зрачок свет попадает на ***хрусталик*** 6 — эластичную двояковыпуклую линзу диаметром около 9 мм и толщиной около 4 мм. Показатель преломления хрусталика изменяется от наружной области к внутренней от 1,386 до 1,406. ***Циллиарная мышца*** 7, управляющая хрусталиком с помощью ***поддерживающей связки*** 8, может изменять его кривизну и соответственно оптическую силу глаза. В полости глаза за хрусталиком находится прозрачное ***стекловидное тело*** 9 ($n_3 = 1{,}337$). Роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему, аналогичную собирающей линзе. Оптический центр O такой линзы находится на расстоянии $f = 17{,}1$ мм от ***сетчатки*** 10 — тонкого (толщина 0,1–0,5 мм) прозрачного слоя светочувствительных клеток. Светочувствительные клетки находятся на задней поверхности сетчатки, лежащей на ***сосудистой оболочке*** 11. Сетчатка преобразует падающее на нее видимое излучение в электрические импульсы, передаваемые по ***зрительному нерву*** 12 в головной мозг. В месте выхода из сетчатки зрительного нерва светочувствительные клетки отсутствуют, поэтому там возникает ***слепое пятно*** 13, нечувствительное к свету. Расстояние между соседними светочувствительными клетками ($H_{\min} = 5$ мкм) определяет ***разрешающую способность*** глаза.

Спектральная чувствительность глаза максимальна в желто-зеленом диапазоне длин волн (около 560 нм) ②.

Дальнозоркость и близорукость — дефекты зрения, связанные с отличием от нормы либо длины глаза, либо радиуса кривизны роговицы.

У нормального глаза лучи, параллельные главной оптической оси, сходятся в одной точке на сетчатке. У дальнозоркого глаза из-за меньшей длины глаза или большего радиуса кривизны роговицы они сходятся за сетчаткой ③.

Для увеличения преломляющей способности дальнозоркого глаза используют очки — собирающие (вогнуто-выпуклые) линзы с положительной оптической силой ($D_0 > 0$).

Близорукий глаз либо удлинен, либо имеет меньший радиус кривизны роговицы по сравнению с нормальным глазом, поэтому параллельные лучи сходятся в точке перед сетчаткой ④.

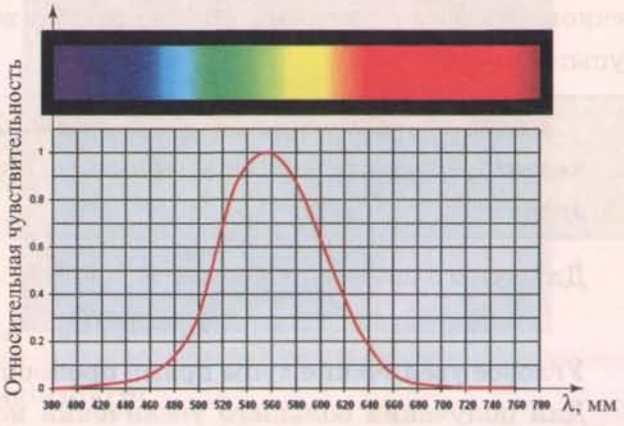
Для коррекции близорукости используют очки с отрицательной оптической силой ($D_0 < 0$).

① ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ГЛАЗ

Строение человеческого глаза

1 - *склера*
2 - *роговица* (n_1 = 1,376)
3 - *водянистая влага* (n_2 = 1,336)
4 - *радужная оболочка*
5 - *зрачок*
6 - *хрусталик*
7 - *циллиарная мышца*
8 - *поддерживающая связка*
9 - *стекловидное тело*
10 - *сетчатка*
11 - *сосудистая оболочка*
12 - *зрительный нерв*
13 - *слепое пятно*

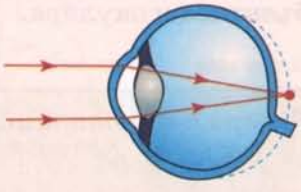
② СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЛАЗА



КОРРЕКЦИЯ ДАЛЬНОЗОРКОСТИ

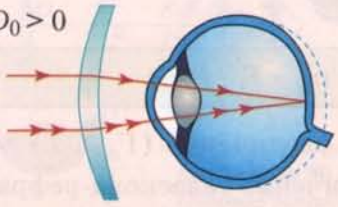
③

Дальнозоркий глаз



Собирающая (вогнуто–выпуклая) линза очков для коррекции дальнозоркости

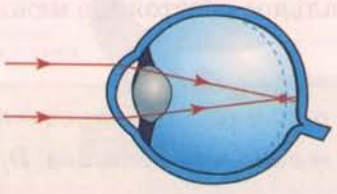
$D_0 > 0$



КОРРЕКЦИЯ БЛИЗОРУКОСТИ

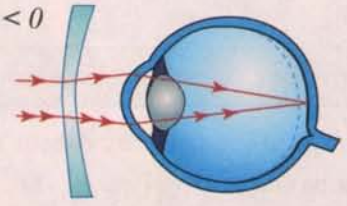
④

Близорукий глаз



Рассеивающая (выпукло–вогнутая) линза очков для коррекции близорукости

$D_0 < 0$



§50. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Зрительная информация, получаемая глазом о каком-либо предмете, тем больше, чем крупнее изображение предмета на сетчатке. Размер предмета h при его наблюдении на расстоянии $d_н$ наилучшего зрения можно характеризовать углом зрения $\alpha_н$. Если $h \ll d_н$, то $\operatorname{tg}\alpha_н \approx \alpha_н$, а $\alpha_н \approx h/d_н$. Для увеличения угла зрения используется ***лупа*** — короткофокусная собирающая линза. При расположении предмета между лупой и ее фокусом (в непосредственной близости от фокуса) получается увеличенное, прямое, мнимое изображение предмета на бесконечном удалении от глаза. Можно приближенно оценить угол зрения $\alpha_л$ при использовании лупы: $\alpha_л = h/F$.

Угловое увеличение Γ_α ***— отношение угла зрения, полученного с помощью оптического прибора, к углу зрения невооруженного глаза на расстоянии наилучшего зрения*** ①.

Для лупы с оптической силой $D = 1/F$:

$$\Gamma_\alpha = \alpha_л / \alpha_н = d_н / F, \quad \text{или} \quad \Gamma_\alpha = d_н D.$$

Угловое увеличение лупы прямо пропорционально ее оптической силе ②.

Для получения большего увеличения используют оптические системы, состоящие из нескольких линз. К таким системам относится ***оптический микроскоп***, который состоит из двух короткофокусных линз — ближайшей к предмету (***объектива***) и ближайшей к глазу наблюдателя (***окуляра***).

Угловое увеличение в микроскопе происходит дважды ③. Сначала объектив создает увеличенное изображение предмета перед окуляром, а затем окуляр дополнительно увеличивает это изображение. Угол зрения $\alpha_{ок}$ с использованием окуляра можно найти так же, как и для лупы:

$$\alpha_{ок} = H / F_2 = h(f_1 - F_1)/F_1F_2,$$

$$f_1 \approx L + F_1,$$

где L — минимальное расстояние между главными фокусами объектива и окуляра.

Тогда

$$\alpha_{ок} = hL / F_1F_2.$$

Угловое увеличение микроскопа $\Gamma_\alpha = \alpha_{ок}/\alpha_н = d_н L / F_1F_2$, ***прямо пропорционально оптическим силам объектива*** D_1 ***и окуляра*** D_2 ④:

$$\Gamma_\alpha = D_1D_2d_н L.$$

Оптический телескоп-рефрактор — линзовая система, дающая существенное угловое увеличение удаленных объектов в видимом спектре. Подобно микроскопу простейший рефрактор имеет объектив и окуляр. Окуляр выполняет роль лупы, обеспечивая угловое увеличение изображения $A'B'$. Для получения максимального углового увеличения изображение $A'B'$ должно находиться практически в фокусе F_2 окуляра, т.е. фокусы объектива F_1 и окуляра F_2 совпадают ⑤.

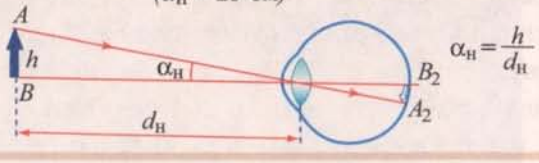
Угловое увеличение телескопа-рефрактора $\Gamma_\alpha = \alpha_{ок}/\alpha_н = F_1/F_2$.

Следовательно, для получения максимального углового увеличения ($\Gamma_\alpha \gg 1$) должно выполняться неравенство: $F_1 \gg F_2$. Максимальное угловое увеличение телескопа-рефрактора достигается при соединении длиннофокусного объектива с короткофокусным окуляром.

ЛУПА

УГЛОВОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

① *Предмет на расстоянии наилучшего зрения* ($d_н = 25$ см)



$$\alpha_н = \frac{h}{d_н}$$

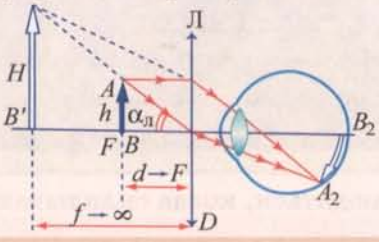
Увеличение угла зрения с помощью лупы – короткофокусной собирающей линзы

$$\alpha_л = \frac{h}{F_л}$$

Угловое увеличение

$$\Gamma_\alpha = d_н D$$

$$\left(\Gamma_\alpha = \frac{\alpha_л}{\alpha_н}\right)$$



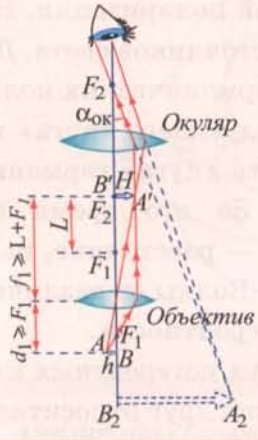
УВЕЛИЧЕННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

② *Цикада крупным планом*

ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП

УГЛОВОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

③ Ход лучей



Угловое увеличение

$$\Gamma_\alpha = \frac{\alpha_{ок}}{\alpha_н},$$

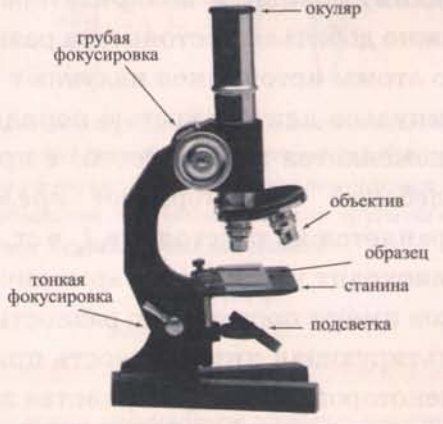
где $\alpha_{ок} = h\dfrac{L}{F_1 F_2}$ – *угол зрения глаза с окуляром,*

$$\alpha_н = \frac{h}{d_н}$$ – *угол зрения глаза на расстоянии наилучшего зрения*

$$\Gamma_\alpha = D_1 D_2 d_н L$$

ПРИНЦИПИАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

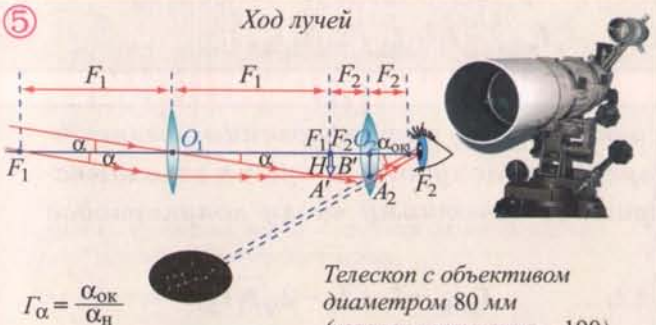
④ *Микроскоп с несколькими объективами*



ОПТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП

ТЕЛЕСКОП - РЕФРАКТОР

⑤ *Ход лучей*



$$\Gamma_\alpha = \frac{\alpha_{ок}}{\alpha_н}$$

Телескоп с объективом диаметром 80 мм (угловое увеличение – 190)

ТЕЛЕСКОП - РЕФЛЕКТОР

Космический телескоп Хаббла

§51. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

Волны, созданные различными источниками, накладываются, усиливая или ослабляя друг друга. Рассмотрим взаимодействие двух волн на воде, вызванных одновременно двумя точечными источниками, находящимися на расстоянии l друг от друга. Подобные волны сжатия и разрежения могут возникнуть при одновременном опускании в воду двух карандашей, которые затем быстро вынимаются из воды ①. Положения фронтов волн сжатия, распространяющихся от точек 1 и 2, показаны через равные промежутки времени $\tau_1 = l/2v$, где v — скорость распространения волн на воде ②. Максимальное сжатие возникает в точках пересечения фронтов на линии MON. Если возмущения среды в точках 1 и 2 происходят непрерывно, например, изменяются по гармоническому закону, наложение волн друг на друга будет происходить во всех точках пространства.

***Интерференция** (от лат. inter — взаимно и ferio — ударяю) — явление наложения волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний в различных точках пространства.*

Такая ***интерференционная картина*** может наблюдаться, когда складываются коррелированные (взаимосвязанные), или

***когерентные** (от лат. cohaerens) волны — волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.*

Выделить когерентные волны можно с помощью светофильтра, дающего определенную частоту (длину волны), и поляризатора, выделяющего свет определенной поляризации. Наиболее сложно добиться постоянства разности фаз от двух независимых источников света. Дело в том, что атомы источников излучают свет прерывисто в виде «цуга» гармонических колебаний — импульса длительностью порядка 10^{-8} с ③. Фаза каждого последующего «цуга» хаотически изменяется по сравнению с предыдущим. Средняя длительность «цуга» гармонических колебаний характеризует ***время когерентности*** $\tau_к \approx 10^{-8}$ с. За это время свет распространяется на расстояние $l_к \approx c\tau_к$. ***Длина когерентности*** $l_к \approx 1$ м — расстояние, на котором происходит устойчивое гармоническое колебание световой волны. Волны от различных источников имеют постоянную разность фаз лишь в течение времени когерентности.

Результирующая интенсивность при наложении (интерференции) двух когерентных колебаний в некоторой точке пространства зависит от времени их запаздывания друг относительно друга ④.

***Максимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определенной точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное периоду этих колебаний** ⑤:*

$$\Delta t_{max} = mt, \quad \text{где } m = 0, \pm1, \pm2, \ldots \qquad I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

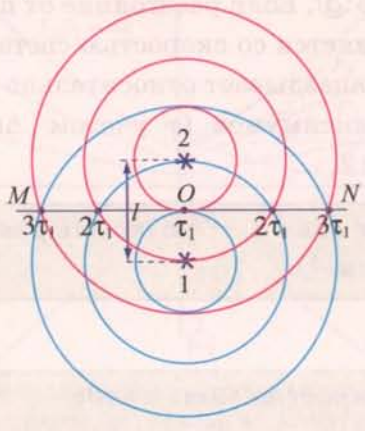
***Минимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определенной точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное нечетному числу полупериодов этих колебаний** ⑥:*

$$\Delta t_{min} = (2m+1)T/2, \quad \text{где } m = 0, \pm1, \pm2, \ldots \qquad I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

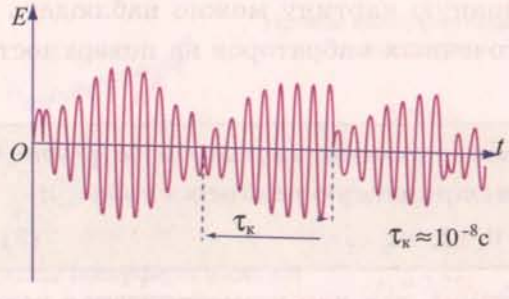
СЛОЖЕНИЕ ВОЛН ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ

① *Наложение волн на воде*

② *Взаимодействие волновых фронтов двух точечных когерентных синхронно излучающих источников*



③ *Амплитуда световой волны, излучаемой отдельным атомом вещества*

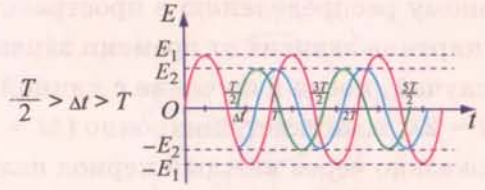


Время когерентности $\tau_к$ *– средняя длительность "цуга" гармонического излучения*

Длина когерентности $l_к = c\tau_к \approx 1$ м

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ ВОЛН

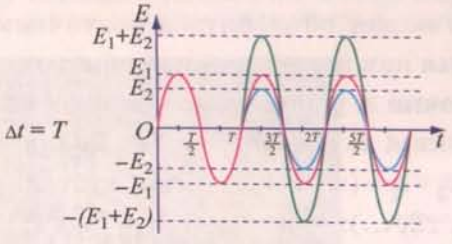
④ *Произвольное время запаздывания*



Результирующая интенсивность света оказывается между ее минимальным и максимальным значением:

$$I_{min} < I < I_{max}$$

⑤ *Условия максимумов интенсивности*

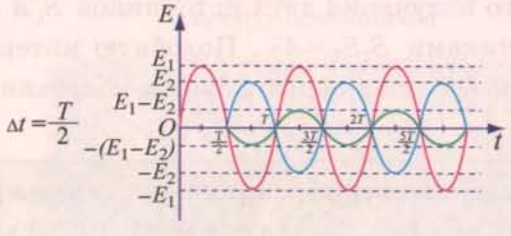


Максимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определенной точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное периоду этих колебаний

$$\Delta t_{max} = mT,$$

где $m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$

⑥ *Условия минимумов интенсивности*



Минимальная результирующая интенсивность при интерференции когерентных колебаний в определенной точке пространства получается при их запаздывании друг относительно друга на время, кратное нечетному числу полупериодов этих колебаний

$$\Delta t_{min} = (2m+1)T/2,$$

где $m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$

§52. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ КАРТИНА

Взаимное усиление и ослабление когерентных световых волн в пространстве приводит к неравномерному распределению в пространстве интенсивности света. Наблюдаемая интерференционная картина зависит от времени запаздывания волн друг относительно друга. Рассмотрим сначала случай, когда излучение с длиной волны λ от двух радиоантенн, находящихся на расстоянии $l = 2\lambda$, возникает синхронно ($\Delta t = 0$) ①. Мгновенное положение фронтов волн от обеих антенн показано через каждый период излучения $T = l/2c$ (c — скорость света). Взаимное усиление волн происходит во всех точках пересечений их фронтов. Устойчивое во времени усиление волн и соответственно максимальная интенсивность света будет наблюдаться вдоль прямых линий, составляющих с горизонтальной осью X углы $\alpha = 0; \pm 30°; \pm 90°; \pm 150°$. В случае, когда волна от антенны 2 излучается позднее, чем от антенны 1, на время $\Delta t = \tau_1$, интерференционная картина будет иной ②. Расстояние, которое проходит до встречи волна от антенны 1 за время τ_2 : $l_1 = c\tau_2$, а от антенны 2 — $l_2 = c(\tau_2 - \tau_1)$. Так как $l_1 + l_2 = l$, то $\tau_2 = 3l/4c$. Пересечения фронтов волн в моменты времени $(\tau_2 + \tau_1)$ и $(\tau_2 + 2\tau_1)$ показывают, что максимальная интенсивность света будет наблюдаться в частности на линии PAQ.

Запаздывание одной волны по сравнению с другой при попадании в произвольную точку A пространства может объясняться различием расстояний до этой точки от источников излучения, в то время как источники излучают энергию синхронно ③. Если расстояние от первого источника до точки A равно r_1, то световая волна распространяется со скоростью света от источника 1 до точки A за время $t_1 = r_1/c$. Волна от источника 2 запаздывает относительно первой на время: $\Delta t = t_2 - t_1 = (r_2 - r_1)/c$. Для интерференционных максимумов (с учетом $\Delta t_{max} = mT$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$): $r_2 - r_1 = mcT$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$ (1)

Геометрическая разность хода интерферирующих волн Δ — разность расстояний $(r_2 - r_1)$ от источников до точки их интерференции ④.

Так как $\lambda = cT$,

условие интерференционных максимумов (1) можно представить в виде:

$$\Delta = m\lambda, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (2)$$

Пространственные локализации интерференционных максимумов, возникшие в результате синхронного излучения двух источников S_1 и S_2, приведены для случая, когда расстояние между источниками $S_1S_2 = 4\lambda$. Подобную интерференционную картину можно наблюдать в результате синхронных вертикальных колебаний двух точечных вибраторов на поверхности воды ⑤.

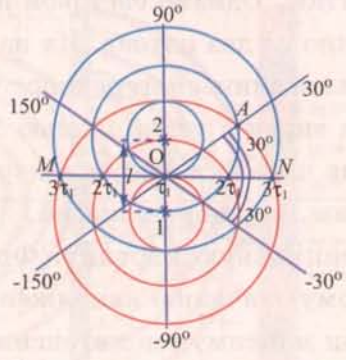
Условие интерференционных минимумов также можно выразить (с учетом $\Delta t_{min} = (2m+1)T/2$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$) через геометрическую разность хода ⑥:

$$\Delta = (2m + 1)\lambda/2, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (3)$$

В точке P_3 наблюдается интерференционный минимум, так как геометрическая разность хода $\Delta = 3\lambda/2$ ($r_1 = 7{,}25\lambda$, $r_2 = 9{,}75\lambda$). Для источников, разделенных расстоянием 9λ, показаны направления локализации максимумов и минимумов ⑦.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН ОТ ДВУХ КОГЕРЕНТНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

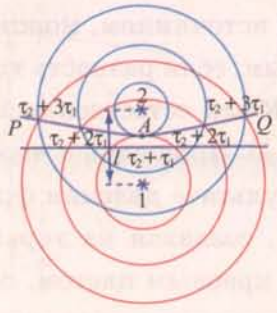
① *Синхронные источники* ($\Delta t = 0$)



Усиление волн возникает при

$\alpha = 0; \pm 30^\circ; \pm 90^\circ; \pm 150^\circ$

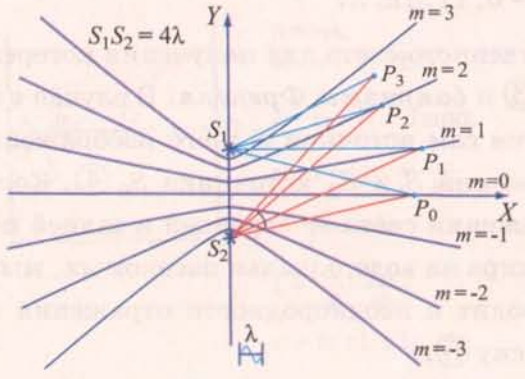
② *Запаздывание* $\Delta t = \tau_2$



PQ – линия, вдоль которой наблюдается взаимное усиление волн

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ДВУХ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

③ *Пространственное расположение интерференционных максимумов*



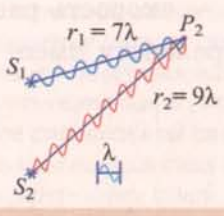
Геометрическая разность хода Δ интерферирующих волн – разность расстояний от источников волн до точки их интерференции

④ *Сложение волн на воде от двух вибраторов, расположенных друг от друга на расстоянии*

$l = 4\lambda$

$m = +2$ *максимум*
$m = +2$ *минимум*
$m = +1$ *максимум*
$m = +1$ *минимум*
$m = 0$ *максимум*
$m = -1$ *минимум*
$m = -1$ *максимум*
$m = -2$ *минимум*
$m = -2$ *максимум*

⑤ *Образование интерференционных максимумов и минимумов*



Условие интерференционного максимума

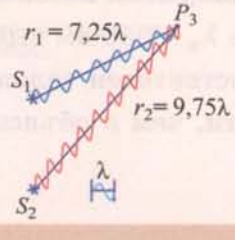
$\Delta = m\lambda,$

где $m = 0; \pm 1; \pm 2; \ldots$

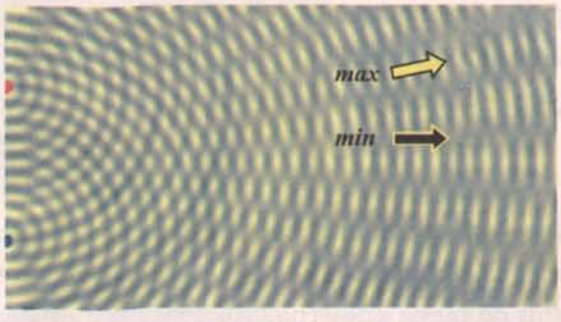
⑥ *Условие интерференционного минимума*

$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0; \pm 1; \pm 2; \ldots$



⑦ *Интерференционная картина для двух источников*



$l = 9\lambda$

максимум интенсивности →

минимум интенсивности →

§53. ОПЫТ ЮНГА. ПОЛУЧЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Независимые источники естественного света некогерентны. Однако световой поток, излучаемый таким источником, можно разделить пространственно на два потока. Их излучение будет когерентным, если разность хода между ними будет меньше длины когерентности ($\Delta \ll l_k$).

В ***опыте Юнга*** естественный солнечный свет падал на экран с узкой щелью S (шириной около 1 мкм) ①. Прошедшая через эту щель световая волна падала на экран с двумя щелями S_1 и S_2. В результате деления фронта волны световые волны, идущие от щелей, оказывались когерентными, создавая на экране устойчивую интерференционную картину. Фронт волны, обозначенный красным цветом, соответствует максимальному значению напряженности электрического поля волны, а желтым — минимальному. Линии максимумов интенсивности света за щелями S_1 и S_2 возникают при наложении друг на друга фронтов одного цвета, а линии минимумов при пересечении фронтов разного цвета. Используя условия интерференционного максимума ($\Delta = m\lambda$, где $m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$), Юнг измерил длины волн излучения фиолетового и красного света ② (учитывая, что $\Delta = r_2 - r_1 = d\sin\alpha \simeq dy_m / R$):

$$dy_m / R = m\lambda, \quad \text{где } m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$$

$$\lambda = dy_m / (Rm), \quad \text{где } m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$$

Разделение светового потока от источника естественного света для получения когерентных источников возможно с помощью ***зеркала Ллойда*** ③ и ***бипризмы Френеля***. В случае с зеркалом Ллойда когерентными источниками оказываются сам источник S и его изображение S'. Бипризма Френеля создает два когерентных изображения S_1 и S_2 источника S_0 ④. Когерентные волны от одного источника возникают при отражении света от передней и задней поверхностей тонких пленок (масляные пленки и пленки жира на воде, крылья насекомых, мыльные пузыри). Неоднородность пленки по толщине приводит к неоднородности отражения от нее волн разного цвета, придавая пленке радужную окраску ⑤.

Просветление оптики — уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на нее специальной пленки.

Отражение света уменьшается из-за того, что световые волны 1 и 2, отраженные от передней и задней поверхностей пленки, оказываются в противофазе. При падении лучей перпендикулярно пленке время запаздывания волны 2 ($\Delta t_{\min} = 2d / v_1$, где $v_1 = c / n_1$ — скорость распространения света в пленке) условие интерференционного минимума при отражении имеет вид: $\Delta t_{\min} = T / 2$. Требуемая толщина d покрытия

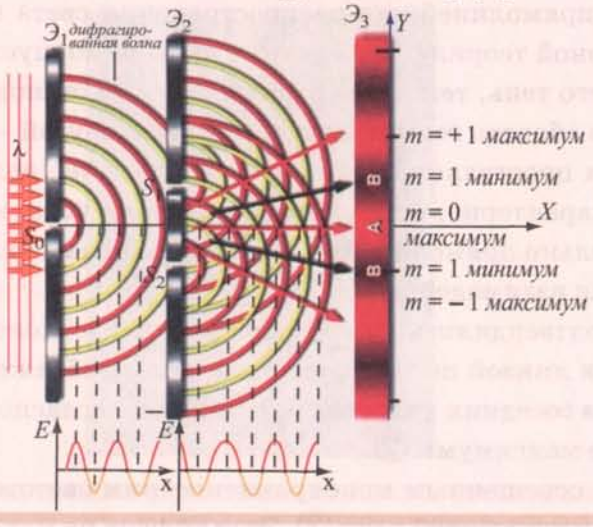
$$d = \frac{1}{4} v_1 T = \frac{\lambda_1}{4},$$

где λ_1 — длина волны света в пленке. Толщину покрытия можно выразить через длину волны света $\lambda_в$ в воздухе: $d = \lambda_в / 4n_1$. Обычно в качестве $\lambda_в = 550$ нм выбирают длину волны в желто-зеленой области спектра, к которой наиболее чувствителен человеческий глаз. Гашения отраженных волн не происходит в фиолетовой области, чем и объясняется фиолетовый цвет просветленного объектива ⑥.

Опыт Юнга. Получение когерентных источников

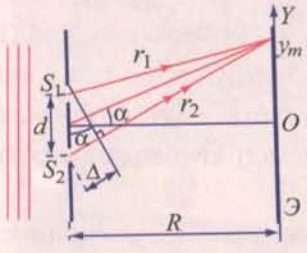
ОПЫТ ЮНГА

① Разделение волнового фронта. Интерференция



② Определение длины волны света

Условие интерференционного максимума



$\Delta = m\lambda$,
где $m = 0; \pm 1; \pm 2; \ldots$

$\Delta = r_2 - r_1 = d\sin\alpha$

$\sin\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha = \frac{y_m}{R}$

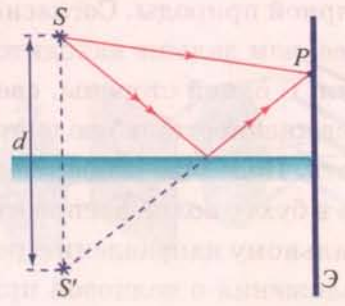
$d\frac{y_m}{R} = m\lambda$

$\lambda = \frac{d}{R}\frac{y_m}{m}$

$m = 0; \pm 1; \pm 2; \ldots$

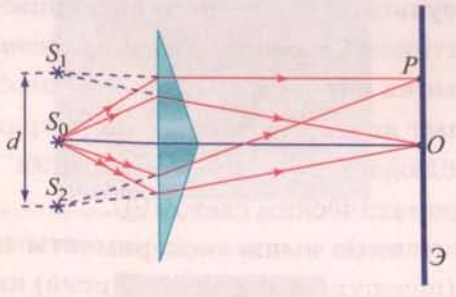
ПОЛУЧЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

③ Зеркало Ллойда



Когерентными источниками являются источник света S и его мнимое изображение в зеркале S'

④ Бипризма Френеля

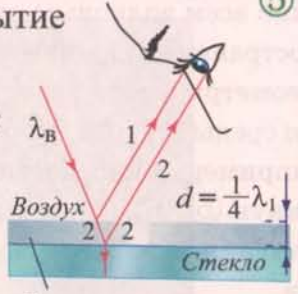


S_1 и S_2 – мнимые изображения источника S являются когерентными

ПРОСВЕТЛЕНИЕ ОПТИКИ

Просветляющее покрытие ⑤

Просветление оптики – уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на нее специальной пленки. Минимум отражения при интерференции лучей 1 и 2:



Просветляющая пленка

$\Delta t_{min} = \frac{T}{2} = \frac{2d}{v_1}$,

где $v_1 = \frac{c}{n_1}$ $d = \frac{\lambda}{4n_1}$

Мыльная пленка ⑥

Интерференция когерентных волн в мыльной пленке неоднородной толщины

Объектив с просветляющим покрытием

Гашение отраженных волн не происходит в фиолетовой области спектра, чем и объясняется фиолетовый цвет просветленного объектива

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

§54. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Наличие четкой геометрической тени за освещенным объектом в течение длительного времени представлялось весомым доказательством прямолинейного распространения света и его корпускулярной природы. Согласно корпускулярной теории, свет — поток частиц (корпускул). Тем не менее, чем дальше находится от объекта его тень, тем более расплывчатыми становятся ее очертания. С одной стороны, свет проникает в область геометрической тени, с другой — ослабление освещенности наблюдается в тех частях пространства, где тень, казалось бы, должна отсутствовать. Подобное огибание препятствий характерно, например, для волн на воде, когда после входа в бухту волна распространяется не только прямолинейно, но и под разными углами к первоначальному направлению распространения взаимодействия ①.

Предположения о волновой природе света подтвердились рядом экспериментов. Монохроматический свет, проходя узкую щель, собирался линзой не только в области ее изображения, предписываемого геометрической оптикой, но и в соседних участках экрана, где, согласно волновой теории, локализованы интерференционные максимумы ②.

Опыт показал, что за непрозрачным диском, освещенным монохроматическим светом, может возникнуть светлое пятно даже в области геометрической тени ③. Этот эффект не мог быть объяснен в рамках геометрической оптики, базирующейся, в частности, на прямолинейном распространении света в вакууме.

Результаты последнего эксперимента впервые были предсказаны в 1918 г. французским математиком ***Симоном-Дени Пуассоном*** на основе волновой теории света. Любопытно, что Пуассон хотел опровергнуть своими необычными предсказаниями эту теорию. Однако контрольный опыт лишь блестяще ее подтвердил. Чередование светлых и темных полос вне контура тени наблюдается и при освещении лезвия, а также круглого и квадратного отверстий монохроматическим светом ④.

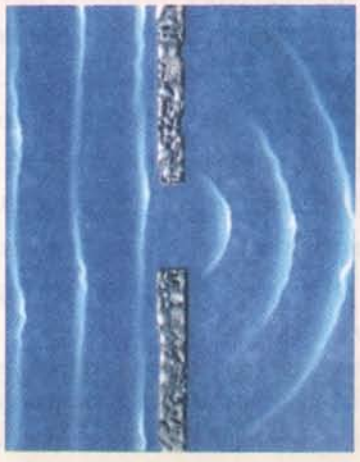
Описанные выше эксперименты имеют характерную общую особенность. Неоднородность среды (поверхности лезвия и диска) нарушает целостность фронта световой волны, распространяющейся от источника, вызывает отклонение распространения волн от законов геометрической оптики, или дифракцию.

Дифракция — проявление волновых свойств света, приводящее к его проникновению в область геометрической тени.

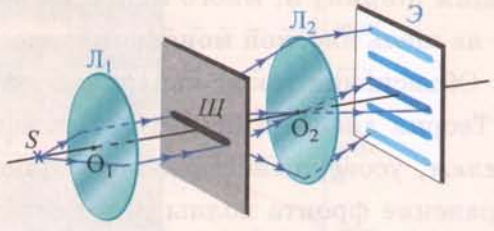
Дифракция сопровождается нарушением целостности фронта волны, вызванным резкими неоднородностями среды. Это явление свойственно всем волновым процессам. Дифракция проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибании волнами препятствий, в проникновении света в область геометрической тени. Пространственное распределение интенсивности света за неоднородностью среды (щелью, решеткой, препятствием, линзой) характеризует дифракционную картину (например, в плоскости экрана). Внешне дифракционная картина напоминает интерференционную ⑤, ⑥. Методы геометрической оптики можно использовать для описания распространения коротких волн, распространяющихся вблизи неоднородностей среды больших размеров.

ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И СВЕТОВЫХ ВОЛН

① *Морские волны у входа в бухту*



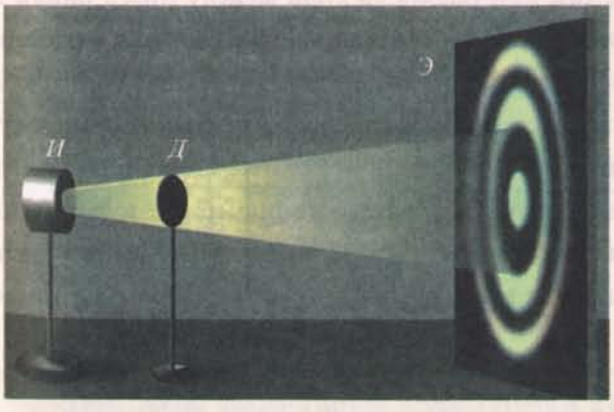
② *Чередование светлых и темных полос на экране*



$Л_1$, $Л_2$ – *собирающие линзы*
Щ – щель
Э – экран

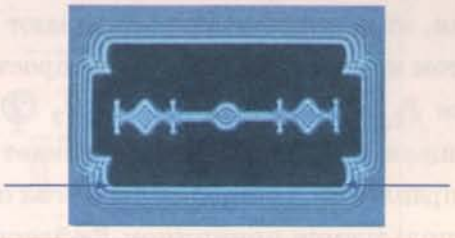
ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА

③ *Светлое пятно в области геометрической тени*

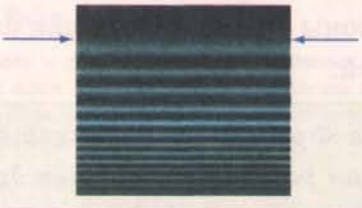


И – источник *Д – диск* *Э – экран*

④ *Лезвие при освещении монохроматическим светом*

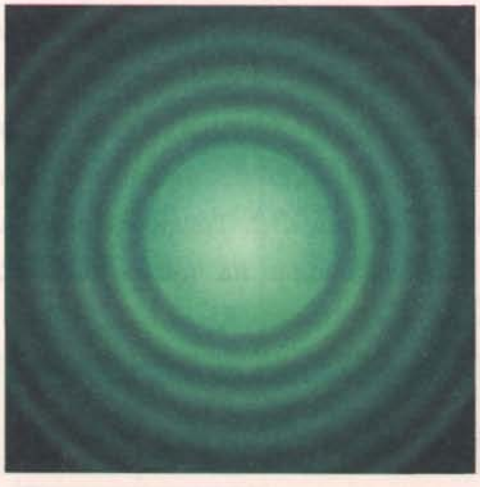


Увеличенное изображение тени вблизи края



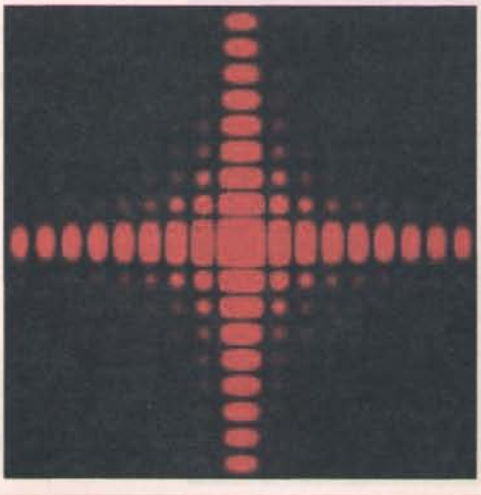
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ

⑤



ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА КВАДРАТНОМ ОТВЕРСТИИ

⑥



§55. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ЩЕЛИ

Пространственное распределение интенсивности света за неоднородностью среды (например, в плоскости экрана) характеризует дифракционную картину. Простейшим примером неоднородности среды является непрозрачный экран $Э_1$ с прямоугольным отверстием (щелью), имеющим ширину a, много меньшую ее длины l ($a << l$). В результате перпендикулярного падения на щель плоской монохроматической волны за щелью возникает дифракционная картина ①. Объяснение такой картины с позиции геометрической оптики оказывается невозможным. Теория дифракции света была разработана в 1816 г. французским ученым ***Огюстеном Френелем***, усовершенствовавшим принцип Гюйгенса, позволяющий найти направление распространение фронта волны. Френель дополнил принцип Гюйгенса идеей об интерференции вторичных волн, сформулировав ***принцип Гюйгенса — Френеля***:

> ***Возмущение в любой точке пространства является результатом интерференции когерентных вторичных волн, излучаемых каждой точкой фронта волны.***

Если вторичные волны усиливают друг друга, в соответствующей точке O на экране $Э_2$ за щелью возникает дифракционный максимум интенсивности света. При взаимном гашении волн в точке A появляется минимум интенсивности. В направлении, перпендикулярном плоскости щели, вторичные волны усиливают друг друга, так как разность хода между ними равна нулю. В этом направлении волны распространяются по законам геометрической оптики, собираясь в фокусе F_2 собирающей линзы $Л_2$ ②. Точнее на прямой, проходящей через ее фокус параллельно щели. Таким образом возникает центральный нулевой максимум дифракционной картины в направлении, составляющем угол $\alpha = 0°$ с первоначальным направлением падающей волны.

Воспользуемся принципом Гюйгенса — Френеля для объяснения дифракционной картины за щелью. Площадь щели может быть условно разбита на ряд параллельных полосок равной ширины (зоны Френеля), каждая из которых представляет источник вторичных волн с равной амплитудой.

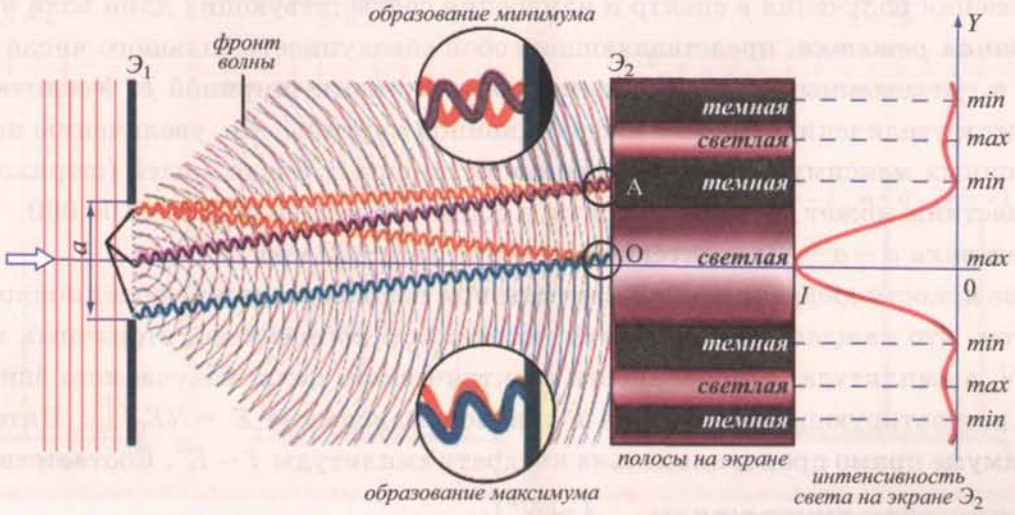
> ***Зона Френеля — множество когерентных источников вторичных волн, максимальная разность хода между которыми (для определенного направления распространения) равна $\lambda/2$.***

Такое разделение щели позволяет свести задачу об интерференции вторичных волн, идущих от разных зон, к задаче об интерференции пар ***соответственных источников***, для которых разность хода одинакова ③. Соседние пары зон Френеля гасят друг друга, так как разность хода соответственных источников из этих зон равна $\lambda/2$. Если на щели укладываются две зоны Френеля, возникает первый дифракционный минимум, наблюдающийся под минимальным углом α_1. В этом случае разность хода Δ_1 ($\Delta_1 = B_1C_1 = \frac{a}{2}\sin\alpha_1$) равна $\lambda/2$. Тогда ***условие первого дифракционного минимума*** имеет вид: $a \sin\alpha_1 = \pm\lambda$. Разделив щель на четное число $2m$ зон Френеля, получаем ④

> ***условие m-ого дифракционного минимума:***
>
> $$a \sin\alpha_m = m\lambda, \quad \text{где } m = 0, \pm1, \pm2, \ldots$$

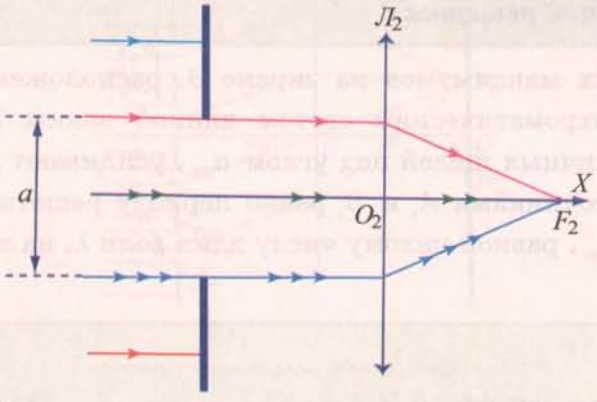
ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА ЗА ЩЕЛЬЮ

①



ОБРАЗОВАНИЕ НУЛЕВОГО МАКСИМУМА

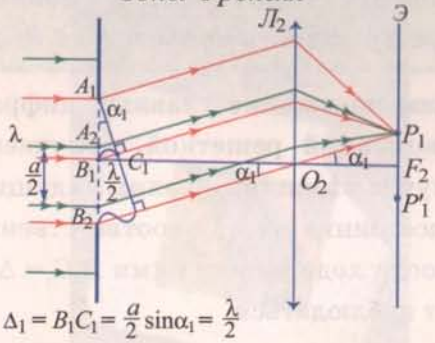
② *Взаимное усиление вторичных волн*



Вторичные волны, распространяющиеся перпендикулярно плоскости щели, усиливают друг друга

ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРВОГО МИНИМУМА

③ *Зоны Френеля*



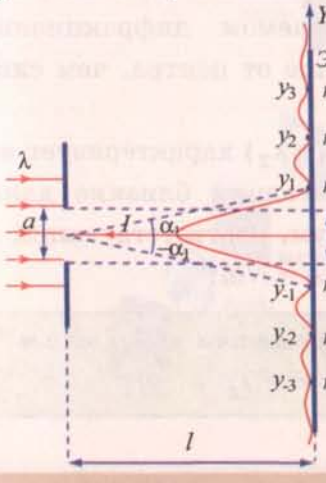
$$\Delta_1 = B_1C_1 = \frac{a}{2}\sin\alpha_1 = \frac{\lambda}{2}$$

Зона Френеля – множество когерентных источников вторичных волн, максимальная разность хода между которыми (для определенного направления распространения) равна $\frac{\lambda}{2}$

$$a\sin\alpha_1 = \pm\lambda$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА

④ *Теоретический расчет*



Условие дифракционного минимума

$$a\sin\alpha_m = m\lambda,$$

где $m = 0; \pm1; \pm2; \ldots$

ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА ПРИ РАЗНОЙ ШИРИНЕ ЩЕЛИ

⑤

§56. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Для разложения излучения в спектр и измерения соответствующих длин волн используется ***дифракционная решетка***, представляющая собой совокупность большого числа узких щелей шириной a, разделенных непрозрачными промежутками шириной b. Увеличение числа щелей приводит к увеличению яркости дифракционной картины, т.е. увеличению интенсивности дифракционных максимумов и уменьшению их ширины. Число щелей (штрихов) на 1 мм стеклянной пластины может достигать тысячи, а общее число штрихов $N = 100\,000$.

Период решетки $d = a + b$ (характерное значение $d \approx 0{,}002$ мм).

Увеличение яркости дифракционной картины при использовании дифракционной решетки объясняется тем, что каждая щель является источником когерентных вторичных волн. Если число щелей N, а амплитуда напряженности электрического поля, излучаемого одной щелью, равна E_0, то результирующая амплитуда в главном максимуме $E = NE_0$ ①. Интенсивность света I в максимуме прямо пропорциональна квадрату амплитуды $I \sim E^2$. Соответственно

$$I \sim N^2 I_0,$$

где I_0 — интенсивность света, излучаемого одной щелью.

Интенсивность света в главном дифракционном максимуме пропорциональна квадрату полного числа щелей дифракционной решетки.

Найдем положение главных дифракционных максимумов на экране Э, расположенном за дифракционной решеткой, облучаемой монохроматическим светом длиной волны λ ②. В этом случае вторичные волны, идущие от различных щелей под углом α_m, усиливают друг друга. Расстояние между соответственными источниками A_1 и B_1 равно периоду решетки d. При разности хода между ними $B_1C_1 = \Delta = d \sin \alpha_m$, равной целому числу длин волн λ, на экране Э будут наблюдаться

главные дифракционные максимумы:

$$d \sin \alpha_m = m\lambda, \quad \text{где } m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (1)$$

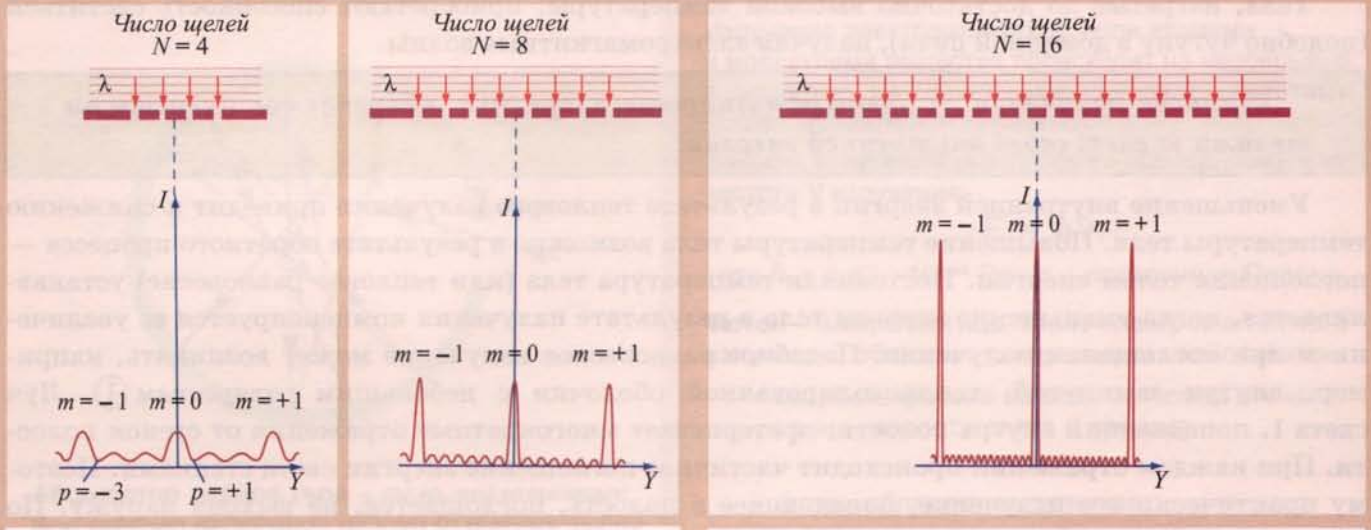
При освещении дифракционной решетки немонохроматическим светом (например, солнечным), содержащим разные длины волн, свет разлагается в спектр ③, так как (согласно формуле (1)) положение главных максимумов зависит от длины волны λ.

Чем больше λ, тем больше угол α_m, тем дальше от центра дифракционной картины располагается соответствующий максимум. Поэтому в спектре, даваемом дифракционной решеткой ④, красные линии с длиной волны λ_1 расположены дальше от центра, чем синие ($\lambda_1 > \lambda_2$), т.е. $\alpha_1 > \alpha_2$.

Разрешающая способность дифракционной решетки $A = \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2)$ характеризует возможность раздельного наблюдения двух спектральных линий, имеющих близкие длины волн λ_1 и λ_2. Это оказывается возможным, когда главный максимум, соответствующий λ_2 приходится на побочный минимум, соответствующий λ_1 ⑤. При этом $A = Nm$:

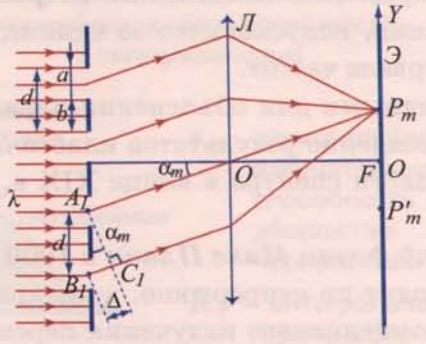
высокую разрешающую способность имеют дифракционные решетки с большим числом штрихов N при наблюдении спектров высокого порядка $m > 1$.

① ИНТЕНСИВНОСТЬ СВЕТА ЗА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ С РАЗНЫМ ЧИСЛОМ ЩЕЛЕЙ



② ДИФРАКЦИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЕТА

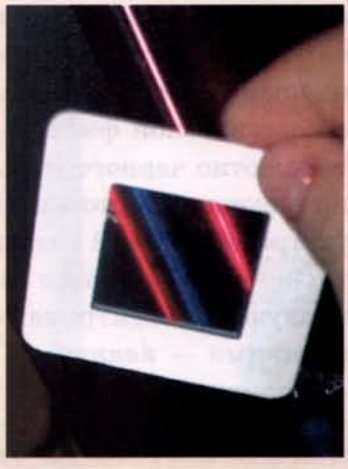
Условие максимумов



Главные максимумы: $d \sin \alpha_m = m\lambda$,
где $m = 0; \pm 1; \pm 2; \ldots$

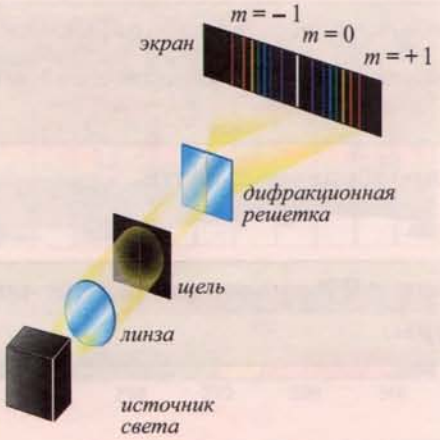
③ НАБЛЮДЕНИЕ ИСТОЧНИКА СВЕТА ЧЕРЕЗ ДИФРАКЦИОННУЮ РЕШЕТКУ

Разложение спектра излучения водородной лампы



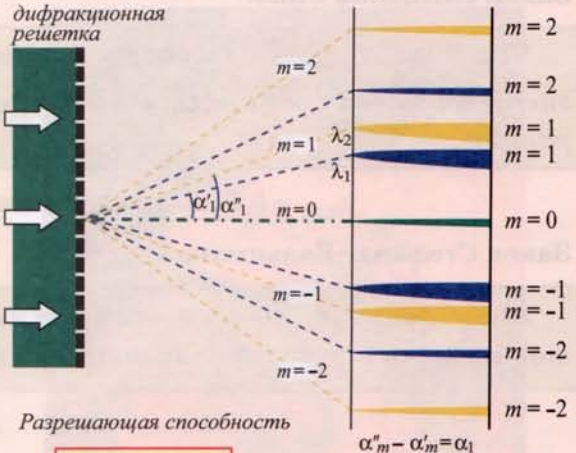
④ РАЗЛОЖЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТР

Оптическая схема



⑤ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Раздельное наблюдение спектральных линий



Разрешающая способность

$$A = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = Nm$$

$$\alpha''_m - \alpha'_m = \alpha_1$$

$$\frac{m\lambda_2}{d} - \frac{m\lambda_1}{d} = \frac{\lambda_1}{Nd}$$

§57. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Тела, нагретые до достаточно высокой температуры, приобретают способность светиться (подобно чугуну в доменной печи), излучая электромагнитные волны.

Тепловое излучение — электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами за счет своей внутренней энергии.

Уменьшение внутренней энергии в результате теплового излучения приводит к снижению температуры тела. Повышение температуры тела возможно в результате обратного процесса — поглощения телом энергии. Постоянная температура тела (или тепловое равновесие) устанавливается, когда уменьшение энергии тела в результате излучения компенсируется ее увеличением при поглощении излучения. Подобное равновесное излучение может возникать, например, внутри замкнутой, теплоизолированной оболочки с небольшим отверстием ①. Луч света 1, попадающий внутрь полости, претерпевает многократные отражения от стенок полости. При каждом отражении происходит частичное поглощение энергии света стенками. Поэтому практически все излучение, попадающее в полость, поглощается, не выходя наружу. По аналогичной причине черными кажутся окна домов днем, хотя в комнатах достаточно светло из-за отражения дневного света от стен. Подобная оболочка является моделью ***абсолютно черного тела*** (АЧТ).

Спектр теплового излучения характеризует ***спектральная плотность энергетической светимости*** r_ν — энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени с единицы площади поверхности тела в единичном интервале частот.

Методы классической физики оказались недостаточными для объяснения характеристик излучения абсолютно черного тела. Значительное расхождение результатов классической волновой теории с экспериментом в ультрафиолетовой области спектра в конце XIX в. получило название «ультрафиолетовой катастрофы» ②.

Для объяснения результатов эксперимента немецкий физик ***Макс Планк*** в 1900 г. предположил, что излучение электромагнитных волн происходит не непрерывно, а дискретно — отдельными порциями — ***квантами*** ③. Энергию электромагнитного излучения переносит микрочастица — ***фотон***.

Энергия фотона (кванта излучения) $E = h\nu$,

где ν — частота излучения, $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — ***постоянная Планка***.

Гипотеза Планка позволила объяснить ***законы теплового излучения АЧТ*** ④.

Закон смещения Вина:

Частота ν_{max}, ***на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ, прямо пропорциональна его абсолютной температуре:***

$$\nu_{max} = b_1 T, \quad \text{где } b_1 \text{ — коэффициент пропорциональности.}$$

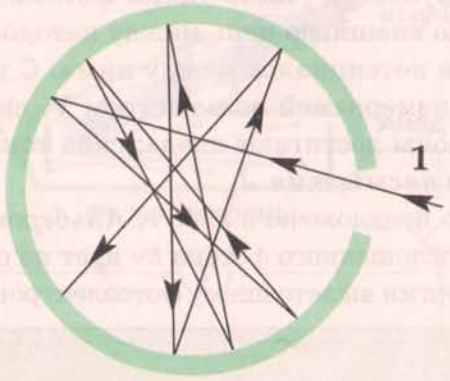
Закон Стефана–Больцмана:

Интегральная (по всем частотам) светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры:

$$R = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^{2}К^4) — постоянная Стефана–Больцмана.

① МОДЕЛЬ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА



Абсолютно черное тело – *тело, поглощающее всю энергию падающего на него излучения любой частоты при произвольной температуре*

② *Ультрафиолетовая катастрофа (расхождение классической теории с экспериментом)*

r_ν – спектральная излучательная способность абсолютно черного тела

R_T – интегральная светимость абсолютно черного тела

$$R_T = \int_0^\infty r_\nu \, d\nu$$

③ КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА. ФОТОН

Излучение электромагнитных волн атомами и молекулами вещества происходит не непрерывно, а дискретно, т.е. отдельными порциями – **квантами** (от лат. quantum – количество).

Энергия излучения кванта прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu,$$

где $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка.

Фотон – микрочастица, квант электромагнитного излучения, обладает следующими свойствами:

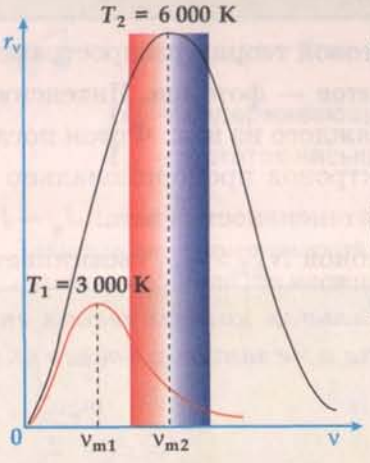
- скорость фотона во всех системах отсчета равна скорости света в вакууме

$$v = c$$

- фотон обладает импульсом

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

④ *Законы теплового излучения*



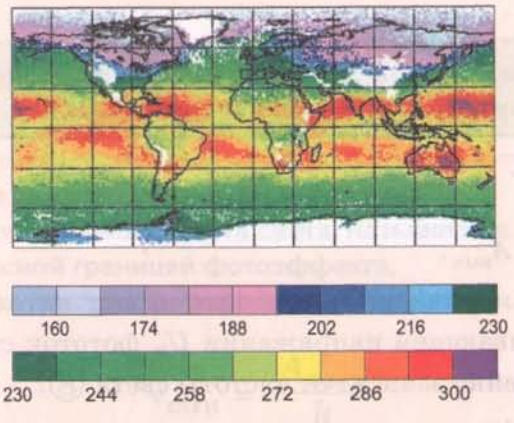
Закон Вина

$$\nu_m = b_1 T$$

Закон Стефана – Больцмана

$$R_T = \sigma T^4$$

Тепловое излучение Земли



Температура *T*, К

Тепловое излучение при пожаре

§58. ФОТОЭФФЕКТ

Фотоэффект — явление вырывания электронов из твердых и жидких веществ под действием света. Электроны могут вырываться, например, при освещении поверхности металлического электрода (катода), помещенного в вакуумной трубке ①. Часть таких фотоэлектронов попадает на анод. Через гальванометр G, включенный во внешнюю цепь между катодом и анодом, начинает протекать ток даже в отсутствие разности потенциалов между ними. С увеличением разности потенциалов между анодом и катодом, измеряемой вольтметром V, сила тока возрастает. При некотором напряжении все фотоэлектроны достигают анода: сила тока достигает максимального значения, называемого ***фототоком насыщения*** $J_н$.

Теоретическое объяснение явления фотоэффекта было предложено в 1905 г. ***Альбертом Эйнштейном*** с помощью квантовой теории света. Энергия поглощенного фотона $h\nu$ идет на совершение работы выхода $A_{вых}$ и на сообщение кинетической энергии вылетевшему фотоэлектрону ②:

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m_e v^2}{2}$$

Работа выхода — минимальная работа, которую нужно совершить для удаления электрона из металла.

Опытным путем были установлены ***законы фотоэффекта***.

I. Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод ③.

Согласно квантовой теории распространение света следует рассматривать как поток дискретных световых квантов — фотонов. Интенсивность света прямо пропорциональна числу фотонов $N_ф$ и энергии $h\nu$ каждого из них. Фотон поглощается целиком только одним электроном. Поэтому число фотоэлектронов пропорционально числу фотонов, а стало быть, фототок насыщения пропорционален интенсивности света: $J_н \sim I$. При большей интенсивности света $I_2 > I_1$ (т.е. при большем числе фотонов $N_{ф2} > N_{ф1}$) возникает больший фототок насыщения ($J_{н2} > J_{н1}$) ④.

II. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности ⑤.

$$\frac{m_e v_{max}^2}{2} = h\nu - A_{вых}$$ ⑥.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона всегда положительна. Это значит, что фотоэффект будет наблюдаться для частот

$$\nu \geq A_{вых} / h$$ ⑦.

III. Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен:

$$\nu_{min} = A_{вых} / h.$$

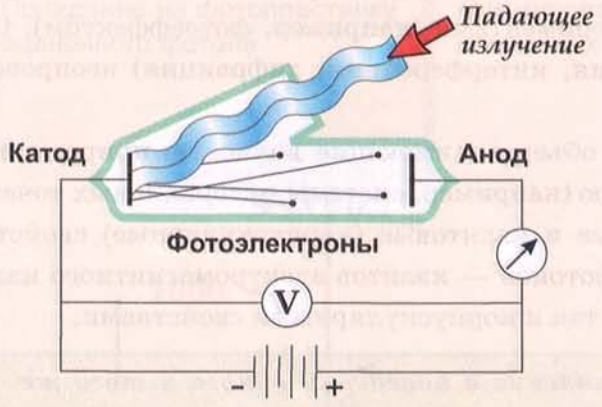
Красной границе соответствует длина волны

$$\lambda_{max} = c / \nu_{min} = ch / A_{вых}.$$

Если изменить полярность источника напряжения, электрическое поле между катодом и анодом будет тормозить фотоэлектроны. При задерживающем напряжении $U_з$ фототок становится равным нулю. Задерживающее напряжение линейно зависит от частоты света ⑧:

$$U_з = \frac{m_e v_{max}^2}{2} = \frac{h\nu - A_{вых}}{e}.$$

① ОПЫТЫ СТОЛЕТОВА



② УРАВНЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m_e v^2}{2}$$

Энергия фотона $h\nu$ идет на совершение работы выхода $A_{вых}$ и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии

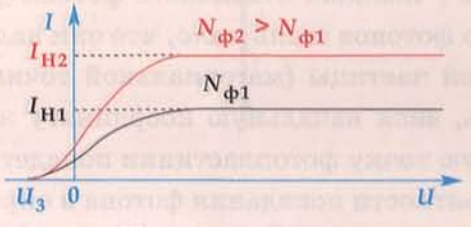
$$\frac{m_e v^2}{2}$$

③ I ЗАКОН ФОТОЭФФЕКТА

Фототок насыщения прямо пропорционален интенсивности света, падающего на катод

$$I_н \sim I$$

④ *Вольт-амперная характеристика фотодиода при различных интенсивностях света* ($I_2 > I_1$)



$U_з$ – задерживающее напряжение

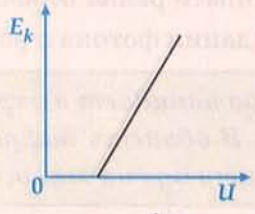
$I_н$ – фототок насыщения

⑤ II ЗАКОН ФОТОЭФФЕКТА

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте света и не зависит от его интенсивности

$$E_{k_{max}} = \left(\frac{m_e v^2}{2}\right)_{max} = h\left(\nu - \frac{A_{вых}}{h}\right)$$

⑥ *Зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света*



$$\lambda_{max} = \frac{c}{\nu_{min}}$$

красная граница фотоэффекта

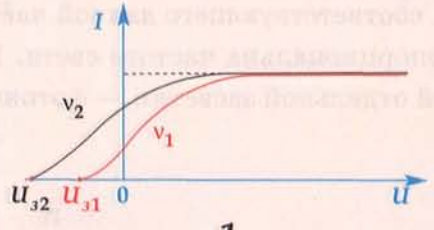
$$\nu_{min} = \frac{A_{вых}}{h}$$

⑦ III ЗАКОН ФОТОЭФФЕКТА

Для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен

$$\nu_{min} = \frac{A_{вых}}{h}$$

⑧ *Вольт-амперная характеристика фотодиода при облучении светом разных частот* ($\nu_2 > \nu_1$)



$$U_з = \frac{1}{e}\,(h\nu - A_{вых})$$

§59. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Распространение света в виде потока фотонов и квантовый характер взаимодействия света с веществом подтверждены многочисленными экспериментами (например, фотоэффектом). Однако целый ряд оптических явлений (поляризация, интерференция, дифракция) неопровержимо свидетельствует о волновых свойствах света.

Классическая физика всегда разграничивала объекты, имеющие волновую природу (например, звук и свет) и дискретную, корпускулярную (например, системы материальных точек). Квантовая физика не противопоставляет волновые и квантовые (корпускулярные) свойства света: свет рассматривается как поток частиц — фотонов — квантов электромагнитного излучения, обладающих одновременно как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Корпускулярно-волновой дуализм — проявление в поведении одного и того же объекта как корпускулярных, так и волновых свойств.

Согласно квантовой теории света, дифракция света на щели объясняется наличием волновых свойств у каждого отдельного фотона ①. При малой интенсивности света, падающего на щель, число фотонов столь мало, что они налетают на щель поодиночке. Траекторию движения классической частицы (материальной точки) в каждом отдельном случае можно однозначно предсказать, зная начальную координату и ее скорость. Однако заранее невозможно установить, в какую точку фотопластинки попадет фотон после дифракции на щели. Можно говорить лишь о вероятности попадания фотона в окрестность определенной области. Предположим, что первый фотон, пройдя щель, попадает на фотопластинку в точку с координатой y_1, затем второй — в точку с координатой y_2 и т.д. Результат суммирования числа фотонов, попадающих в окрестность точки с определенной координатой y после 1000 экспериментов, приведен на рисунке ②. Например, из 1000 фотонов, последовательно проходящих через щель, в окрестность точки с координатой y_1 попали 34. Это означает, что вероятность попадания фотона в окрестность этой точки в любом опыте равна 0,034. Дифракционная картина за щелью возникает потому, что вероятность попадания фотона в разные точки фотопластинки неодинакова.

Чем больше фотонов попадает в окрестность данной точки, тем больше интенсивность света в ней. В область дифракционных максимумов попадает много фотонов, в области минимумов их мало.

При большой интенсивности света, падающего на щель, зависимость интенсивности света на фотопластинке от координаты y совпадает с картиной распределения интенсивности света за щелью, описываемой волновой теорией света.

При малой интенсивности света, падающего на щель, т.е. при падении на щель одиночных фотонов разной частоты ν_1 ③ и $\nu_2 > \nu_1$ ④, на экране возникают локальные засветки (вспышки разного цвета, соответствующего данной частоте). Как показывает эксперимент, энергия засветок прямо пропорциональна частоте света. Коэффициентом пропорциональности между энергией и частотой отдельной засветки — фотона является постоянная Планка h: $E = h\nu$.

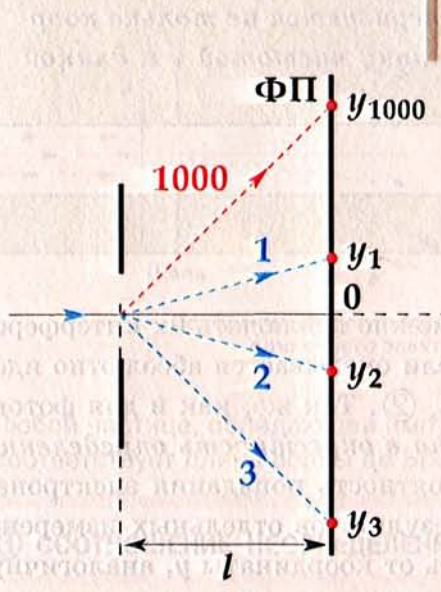
ДИФРАКЦИЯ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ЩЕЛИ

Попадание на фотопластинку одиночного фотона

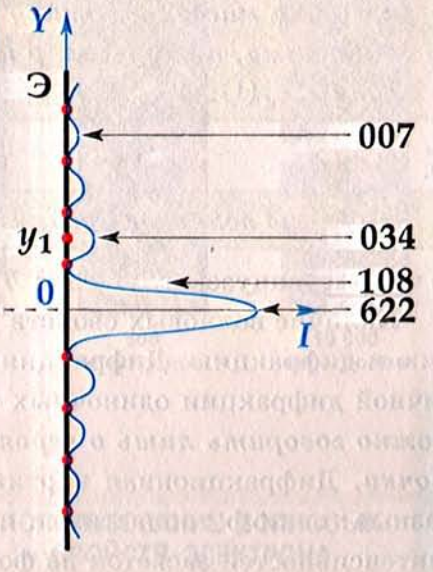
Суммирование результатов отдельных измерений

Распределение результирующей интенсивности за щелью

①



②

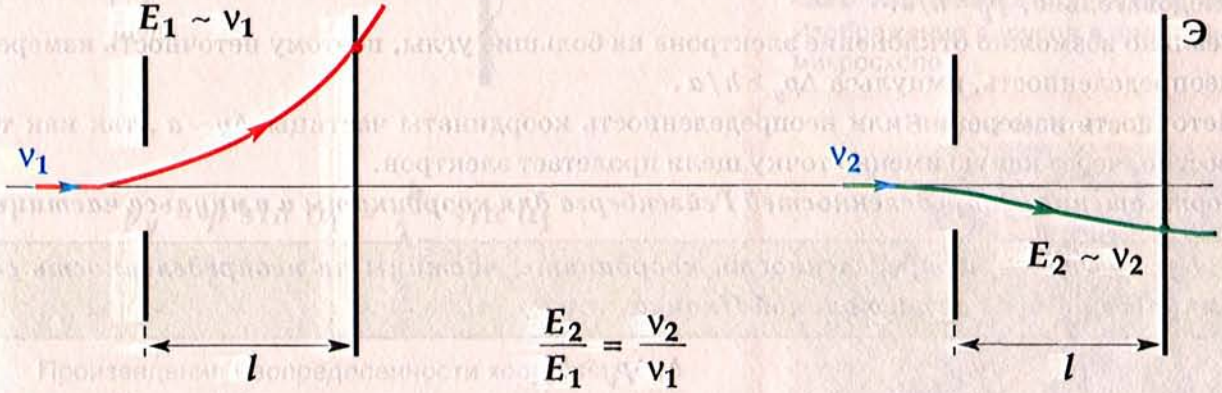


1, 2, 3, – последовательность дифрагирующих фотонов

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА ЩЕЛИ

③ Частота падающего света ν_1

④ Частота падающего света $\nu_2 > \nu_1$



$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\nu_2}{\nu_1}$$

$$E \sim \nu$$

$$E = h\nu$$

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

§60. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ

Корпускулярно-волновой дуализм частиц означает, что корпускулярные и волновые свойства неразделимы. Любая микрочастица обладает помимо корпускулярных еще и волновыми свойствами. Это значит, что

частица массой m, движущаяся со скоростью v, характеризуется не только координатами, импульсом p и энергией E, но и подобно фотону частотой ν и длиной волны $\lambda_Б$ ①:

$$E = h\nu; \quad p = h/\lambda_Б .$$

Длина волны де Бройля $\lambda_Б = h/p$

(в честь французского физика ***Луи де Бройля***).

Наличие волновых свойств у микрочастиц означает, что можно наблюдать их интерференцию и дифракцию. Дифракция одиночных электронов на щели оказывается абсолютно идентичной дифракции одиночных фотонов с длиной волны $\lambda = \lambda_Б$ ②. Так же, как и для фотона, ***можно говорить лишь о вероятности попадания электрона в окрестность определенной точки***. Дифракционная картина возникает потому, что вероятность попадания электрона в разные точки фотопластинки неодинакова. Суммирование результатов отдельных измерений (интенсивностей засветок на фотопластинке) дает зависимость от координаты y, аналогичную результату волновой теории при расчете интенсивности света длины волны $\lambda = \lambda_Б$ на фотопластинке за щелью.

В результате дифракции на щели электрон изменяет направление своего движения: возникает компонента импульса по оси Y ③:

$$p_y = p\sin\alpha = \frac{h}{\lambda_Б}\sin\alpha.$$

Для оценки p_y можно использовать угол α_1, соответствующий первому дифракционному минимуму на щели $a\sin\alpha_1 = \lambda_Б$.

Следовательно, $p_y = h/a$.

Реально возможно отклонение электрона на большие углы, поэтому неточность измерения, или неопределенность, импульса $\Delta p_y \geq h/a$.

Неточность измерения или неопределенность координаты частицы $\Delta y \sim a$, так как точно неизвестно, через какую именно точку щели пролетает электрон.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса частицы:

Произведение неопределенности координаты частицы на неопределенность ее импульса не меньше постоянной Планка

$$\Delta y \Delta p_y \geq h.$$

Соотношение неопределенностей Гейзенберга для энергии частицы и времени ее измерения имеет вид:

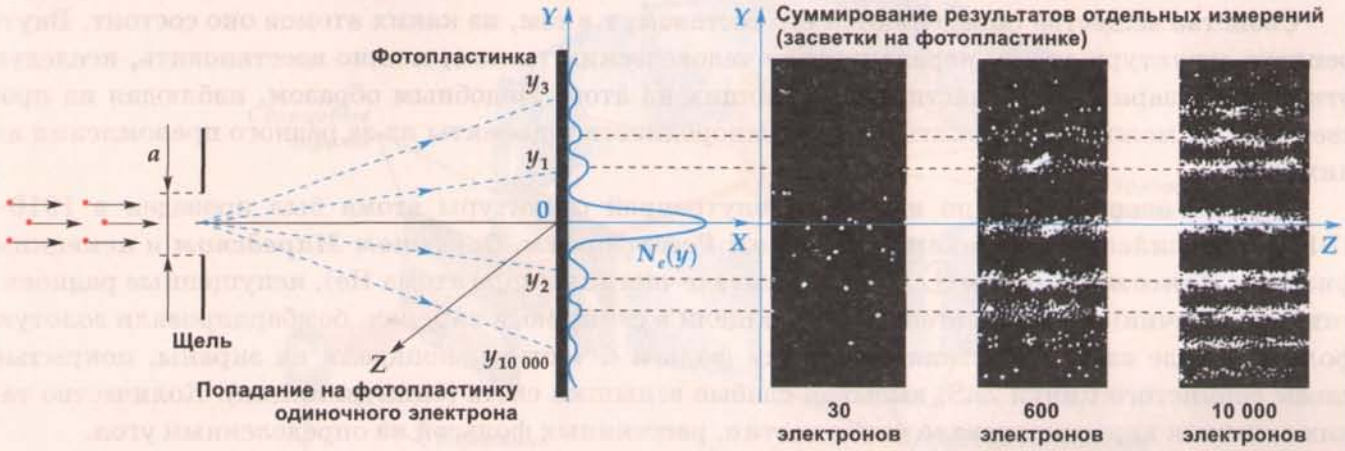
$$\Delta E \Delta t \geq h.$$

Волновые свойства электрона используют в электронном микроскопе, позволяющем, в частности, получать изображения вирусов ④.

① ДЛИНА ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ

② ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА

Дифракция одиночных электронов на щели



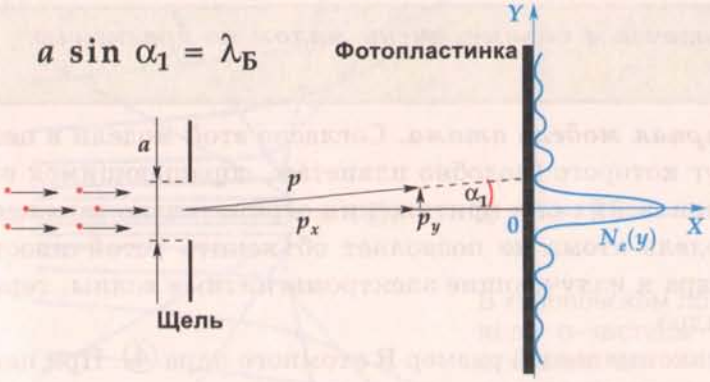
Любой частице, обладающей импульсом p, соответствует длина волны де Бройля

$$\lambda_Б = \frac{h}{p}$$

③ СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Измерение импульса частицы при ее локализации

$$a \sin \alpha_1 = \lambda_Б$$



$$p_y = p \sin \alpha_1 = \frac{h}{\lambda_Б} \sin \alpha_1$$

$$p_y = \frac{h}{a} \qquad \Delta p_y \geq \frac{h}{a} \qquad \Delta y \sim a$$

Произведение неопределенности координаты частицы на неопределенность ее импульса не меньше постоянной Планка

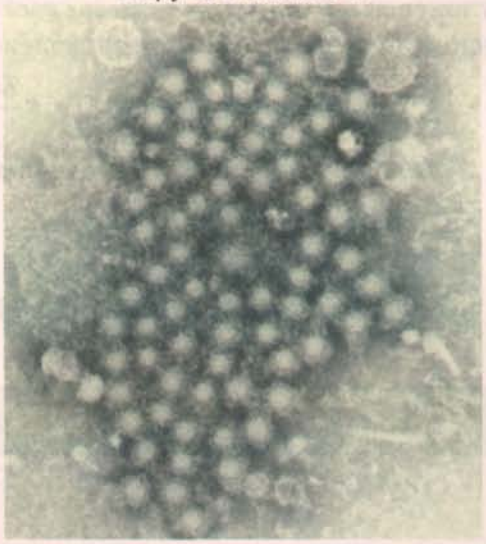
$$\Delta y \Delta p_y \geq h$$

$$\Delta E_y \Delta t \geq h$$

④ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОНА

Изображение вирусов в электронном микроскопе

Вирусы гепатита С



§61. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

Свойства вещества определяются его составом, т.е тем, из каких атомов оно состоит. Внутреннюю структуру атома, неразличимую человеческим глазом, можно восстановить, исследуя отклонения заряженных частиц, налетающих на атом. Подобным образом, наблюдая на просвет стекло, можно обнаружить в нем неоднородности и дефекты из-за разного преломления на них света.

Первый эксперимент по изучению внутренней структуры атома был проведен в 1910–1911 гг. английскими физиками ***Эрнестом Резерфордом, Эрнестом Марсденом*** и немецким физиком ***Хансом Гейгером*** ①. В этом опыте α-частицы (ядра атома He), испущенные радиоактивным источником и пролетевшие через щели в свинцовых экранах, бомбардировали золотую фольгу. После взаимодействия с атомами фольги α-частицы попадали на экраны, покрытые слоем сернистого цинка ZnS, вызывая слабые вспышки света (сцинтилляции). Количество таких вспышек характеризовало число частиц, рассеянных фольгой на определенный угол.

Анализ сцинтилляций показал, что большинство частиц проходит фольгу, практически не отклоняясь ②. Лишь одна из 20000 α-частиц резко отклонялась от первоначального направления движения, даже отражаясь назад (на угол 180°). Подобное отклонение не могло быть вызвано столкновением α-частицы с очень легким (по сравнению с α-частицей) электроном. Резерфорд предположил, что такое отражение α-частиц, имеющих заряд $+2e$, обусловлено их отталкиванием положительно заряженными частицами, обладающими массой, соизмеримой с массой α-частицы. Малая доля частиц, испытывающих значительное рассеяние, означает, что

положительный заряд атома сосредоточен в объеме, очень малом по сравнению с объемом атома, или в ядре атома.

Из опытов Резерфорда следует ***планетарная модель атома.*** Согласно этой модели в центре атома расположено атомное ядро, вокруг которого (подобно планетам, обращающимся вокруг Солнца) вращаются под действием кулоновских сил притяжения отрицательно заряженные электроны ③. Однако планетарная модель атома не позволяет объяснить устойчивость атомов. Электроны, вращающиеся вокруг ядра и излучающие электромагнитные волны, теряют энергию и неизбежно должны упасть на ядро.

Опыты Резерфорда позволили оценить максимальный размер R атомного ядра ④. При центральном столкновении α-частицы с ядром, имеющим заряд $+Ze$, она останавливается силами кулоновского отталкивания на расстоянии r от центра ядра ($r > R$). В точке остановки кинетическая энергия $E_к$ α-частицы переходит в потенциальную:

$$E_k = k\frac{Ze \cdot 2e}{r}, \quad \text{где } k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2.$$

Следовательно, размер атомного ядра определяется соотношением

$$R < \frac{2k \cdot Ze^2}{E_k}.$$

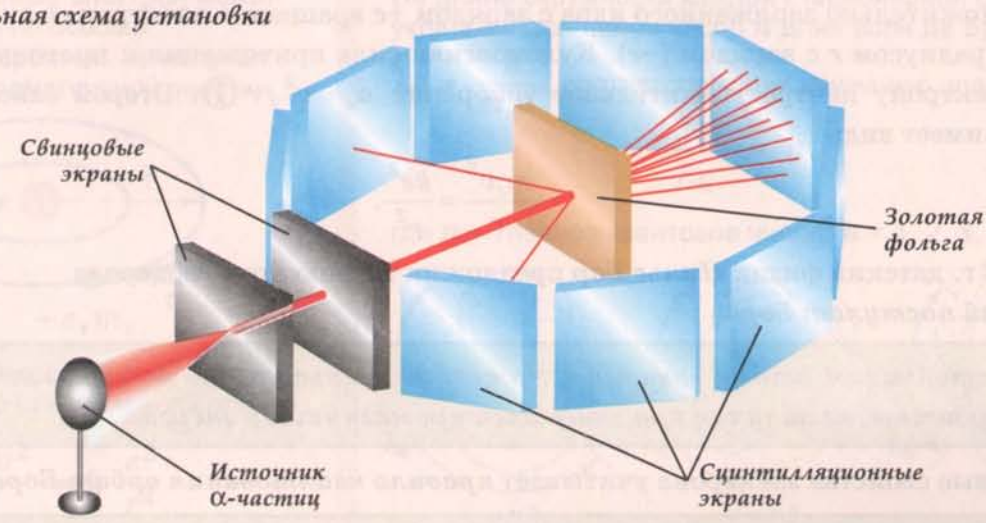
В опытах Резерфорда $E_k = 5$ МэВ, заряд ядра золота $Z = 79$. Тогда размер ядра

$$R < 23 \text{ фм}.$$

Линейный размер ядра по крайней мере в 10000 раз меньше размера атома.

ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

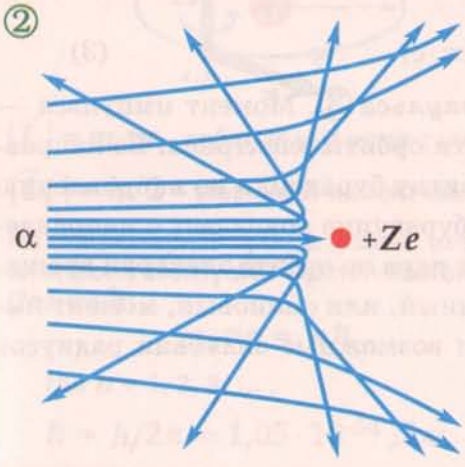
① *Принципиальная схема установки*



ОЦЕНКА РАДИУСА ЯДРА

Рассеяние α-частиц атомными ядрами $^{197}_{79}\mathrm{Au}$

②



$Z_{Au} = 79$

В кулоновском поле ядра α-частицы отклоняются по гиперболическим траекториям

НЕПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПЛАНЕТАРНОЙ МОДЕЛИ АТОМА

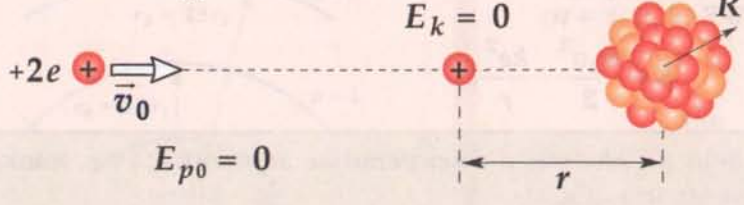
③

Падение электрона на ядро вследствие его торможения при излучении

④

$E_{k0} = 5$ МэВ $\quad v = 0$

$E_k = 0$



$E_{p0} = 0$

$R \le r$

$$E_p = k\frac{(+2e)\cdot(+Ze)}{r}$$

Закон сохранения энергии

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p \qquad E_{k0} = k\frac{2e\cdot Ze}{r} \Rightarrow r = \frac{2kZe^2}{E_{k0}} = 23 \text{ фм}$$

§62. АТОМ ВОДОРОДА (ТЕОРИЯ БОРА)

Согласно планетарной модели атома, обоснованной опытами Резерфорда, в атоме водорода вокруг положительно заряженного ядра с зарядом $+e$ вращается электрон со скоростью υ по окружности радиусом r с зарядом $(-e)$. Кулоновская сила притяжения к протону $F_К = ke^2/r^2$ сообщает электрону центростремительное ускорение $a_n = \upsilon^2/r$ ①. Второй закон Ньютона для электрона имеет вид:

$$\frac{m_e\upsilon^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2}. \qquad (1)$$

В 1913 г. датский физик ***Нильс Бор*** предложил теорию атома водорода.

Первый постулат Бора.

> ***В устойчивом атоме электрон может двигаться лишь по особым, стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии.***

Волновые свойства электрона учитывает ***правило квантования орбит Бора*** ②:

> ***На длине окружности каждой стационарной орбиты укладывается целое число n длин волн де Бройля $\lambda_Б = h/m_e\upsilon$, соответствующих движению электрона***
>
> $$2\pi r/\lambda_Б = n, \qquad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$ — главное квантовое число.

Правило квантования (2) может быть представлено в виде

$$m_e\upsilon r = n\hbar \qquad (\hbar = h/2\pi = 1{,}05\cdot10^{-34}\ Дж\cdot с) \qquad (3)$$

Физическую величину $L = m_e\upsilon r$ называют ***моментом импульса*** ③. Момент импульса — векторная величина, направленная перпендикулярно плоскости орбиты электрона. Ее направление определяется по правилу буравчика. Если вращать рукоятку буравчика по направлению движения электрона по орбите, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением орбитального момента импульса. Кроме движения вокруг ядра по орбите электрон вращается как волчок вокруг собственной оси. При этом его собственный, или спиновый, момент импульса $L_s = \hbar/2$. Из системы уравнений (1), (3) можно найти возможные значения радиусов стационарных орбит и скорости движения электрона ④:

$$r_n = r_1\cdot n^2,$$

где $r_1 = \hbar^2/km_ee^2 = 0{,}53\cdot10^{-10}$ м — радиус первой ($n = 1$) орбиты электрона, ближайшей к ядру. Скорость движения электрона по n-й орбите $\upsilon_n = ke^2/(\hbar n)$. Она максимальна на первой орбите.

Энергия электрона в атоме складывается из его кинетической энергии и потенциальной кулоновской энергии притяжения к ядру.

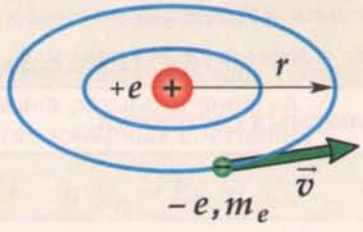
$$E = \frac{m_e\upsilon^2}{2} - \frac{ke^2}{r}.$$

> ***Энергия электрона принимает не любые, а дискретные значения, т.е. квантуется*** ⑤.
>
> $$E_n = -\frac{E_1}{n^2}.$$

$E_1 = -13{,}6$ эВ — энергия основного ($n = 1$) состояния атома водорода — состояния с минимальной энергией.

① ПЕРВЫЙ ПОСТУЛАТ БОРА

В устойчивом атоме электрон может двигаться лишь по особым, стационарным орбитам, не излучая при этом электромагнитной энергии



Второй закон Ньютона для электрона, движущегося по стационарной орбите

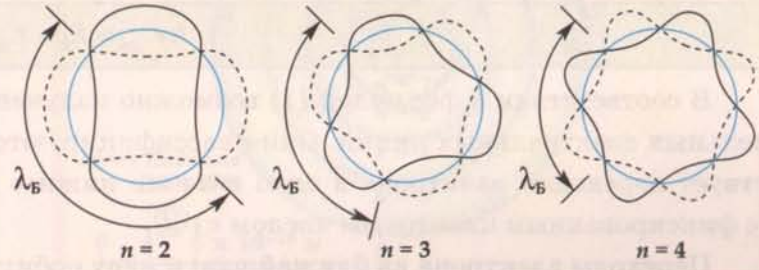
$$\frac{m_e v^2}{r} = k\,\frac{e^2}{r^2}$$

② ПРАВИЛО КВАНТОВАНИЯ ОРБИТ БОРА

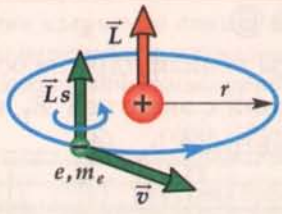
На длине окружности каждой стационарной орбиты укладывается целое число n длин волн де Бройля $\lambda_Б = \dfrac{h}{m_e v}$, соответствующих движению электрона

$$\frac{2\pi r}{\lambda_Б} = n,$$

где n – главное квантовое число; n = 1, 2, 3, ...



③ МОМЕНТ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОНА



$|\vec{L}| = m_e v r$ – орбитальный момент импульса

$|\vec{L}_s| = \hbar/2$ – спиновый момент импульса

На стационарной орбите момент импульса электрона квантуется (кратен постоянной Планка $\hbar$)

$$m_e v r = n\hbar,$$

где n = 1, 2, 3, ... ,

$\hbar = h/2\pi = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

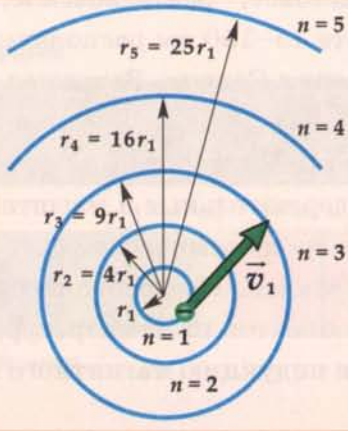
⑤ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР АТОМА ВОДОРОДА

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{ke^2}{r}$$

$$E_n = \frac{E_1}{n^2},\ n = 1, 2, 3, \ldots$$

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -13{,}6\ \text{эВ}$$

④ ОРБИТЫ ЭЛЕКТРОНА В АТОМЕ ВОДОРОДА



Радиус n-й стационарной орбиты (n = 1, 2, 3, ...)

$$r_n = r_1 \cdot n^2,$$

где $r_1 = \dfrac{\hbar^2}{k m_e e^2}$

Скорость движения электрона по n-й орбите

$$v_n = \frac{v_1}{n},$$

где $v_1 = \dfrac{ke^2}{\hbar}$

§63. ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА АТОМОМ

Атом может излучать свет и поглощать его. Свет излучается атомом, если электрон перескакивает с более отдаленной от ядра стационарной орбиты на орбиту меньшего радиуса ①. Согласно **второму постулату Бора:**

Излучение света атомом происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n.

Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \qquad (1)$$

В соответствии с формулой (1) возможно излучение лишь некоторого набора частот — отдельных спектральных линий. Они классифицируются по сериям, каждая из которых соответствует переходам электрона в одно и то же нижнее энергетическое состояние с энергией E_n (с фиксированным квантовым числом n) ②.

Переходы электрона на ближайшую к ядру орбиту — в основное состояние ($n = 1$) — вызывают излучение в УФ диапазоне — серия Лаймана. Переходы в состояние с $n = 2$ приводят к излучению в видимом диапазоне — серия Бальмера. ИК-излучение возникает при переходах электрона на уровни ($n = 3, 4, 5$) — серии Пашена, Брэкета, Пфунда ③.

При поглощении света атомом электрон перескакивает с орбиты вблизи ядра на более отдаленную орбиту. Например, переход электрона из основного состояния с энергией E_1 в возбужденное с большей энергией E_n возможен при поглощении фотона частотой ν_{n1} ④:

$$h\nu_{n1} = E_n - E_1. \qquad (2)$$

Излучение достаточно высокой частоты может ионизовать атом. При этом электрон, поглощая фотон, покидает атом. Минимальная энергия свободного электрона $E_n = 0$.

Энергия ионизации атома I_1 — минимальная энергия, которую нужно затратить для перевода электрона из основного состояния атома в свободное состояние.

Ионизация атома может происходить под действием падающего на него фотона с энергией $h\nu \geq |E_1| = I_1$.

Сравнительный анализ спектров излучения и поглощения показывает, что атом поглощает излучение той же частоты, которую излучает ⑤. Земная атмосфера избирательно поглощает излучение различных частот (длин волн) ⑥. Ультрафиолетовое, рентгеновское, гамма-излучение поглощаются в верхних слоях атмосферы. На высоте 15–150 км располагается озоновый слой, поглощающий коротковолновую часть УФ-излучения Солнца. Защищая флору и фауну Земли от губительного воздействия коротковолнового облучения, атмосфера одновременно лишает физиков и астрономов существенной информации о структуре Вселенной, содержащейся в спектрах этого диапазона. Поэтому наиболее содержательные и масштабные исследования Вселенной начались с 60-х гг. XX в. с момента вывода в космическое пространство искусственных спутников Земли, космических аппаратов и зондов. Исследование и анализ спектров позволяют определять помимо химического состава объектов их температуру, давление, скорость движения, напряженность электрического поля и индукцию магнитного поля.

ВТОРОЙ ПОСТУЛАТ БОРА

① Излучение света происходит при переходе из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n

Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний

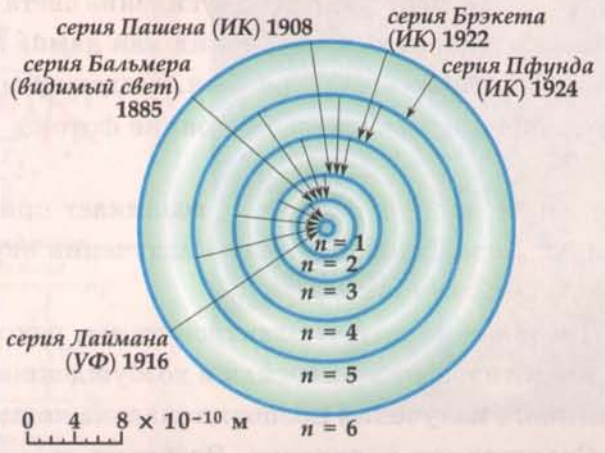
$$h\nu_{kn} = E_k - E_n$$

Для водорода

$$h\nu_{kn} = E_1\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$$

$$n = 1, 2, 3, \ldots;\ k > n$$

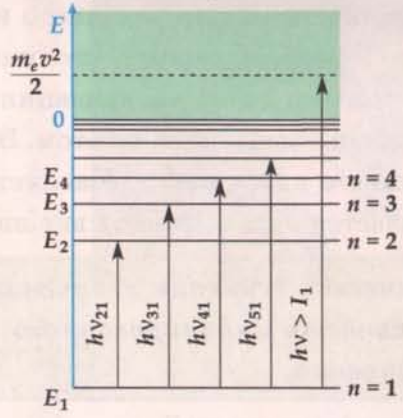
② *Серии излучения атома водорода: переходы между орбитами стационарных состояний*



ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА АТОМОМ ВОДОРОДА

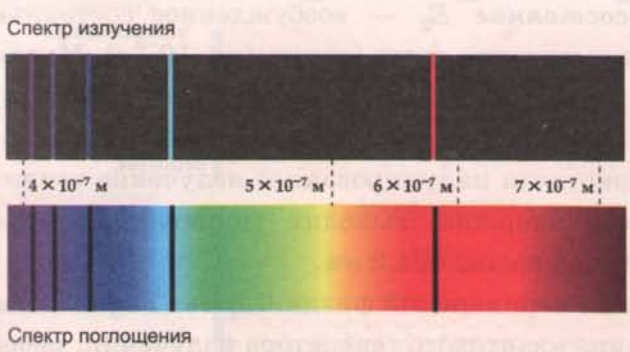
③ *Серии излучения атома водорода при переходах электрона между энергетическими уровнями*

④ *Переход электрона из основного состояния атома водорода при поглощении света*



$I_1 = |E_1|$ – энергия ионизации атома

⑤ СЕРИЯ БАЛЬМЕРА ДЛЯ АТОМА ВОДОРОДА



⑥ ПОГЛОЩЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

§64. ЛАЗЕР

Лазер — наиболее мощный искусственный источник направленного излучения.

Слово laser образовано начальными буквами английских слов light amplification by stimulated emission of radiation («усиление света с помощью вынужденного излучения»). В традиционных источниках света, таких как лампа накаливания, валентные электроны атомов вещества возбуждаются электронами, создающими электрический ток. При их самопроизвольном возвращении в основное состояние фотоны излучаются некогерентно (независимо друг от друга).

В лазерах мощное излучение возникает при прохождении через вещество электромагнитной волны. Характеристики этого излучения определяют три основных процесса взаимодействия излучения с атомами ①.

1. ***Поглощение света.*** Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией E_1, может поглотить фотон, перейдя в возбужденное состояние с энергией $E_2 > E_1$. Интенсивность поглощенного излучения пропорциональна концентрации n_1 атомов в основном состоянии.

2. ***Спонтанное излучение.*** Электрон атома, находящийся в возбужденном состоянии с энергией E_2, через $10^{-8} - 10^{-9}$ с самопроизвольно (спонтанно) возвращается в основное состояние. Атомы излучают независимо друг от друга.

3. ***Индуцированное излучение*** — излучение атома, возникающее при переходе электрона на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения. Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации n_2 атомов, находящихся в возбужденном состоянии. У световой волны, возникшей при индуцированном излучении, частота, фаза, поляризация и направление распространения оказываются такими же, как и у волны, падающей на атом. Это означает, что к первичному фотону I, падающему на атом от внешнего источника, добавляется идентичный фотон II индуцированного излучения, т.е. увеличивается интенсивность внешнего излучения.

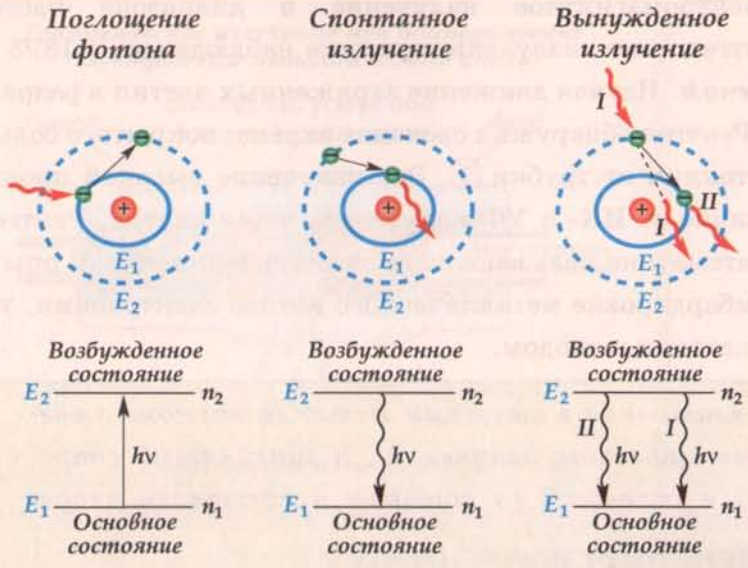
Оптическое усиление излучения, падающего на среду, возникает тогда, когда интенсивность индуцированного излучения превысит интенсивность поглощенного излучения.

Это происходит в случае ***инверсной населенности***, если в возбужденном состоянии находится больше частиц, чем в основном $n_2 > n_1$.

В кристалле рубинового лазера, облучаемом лампой-вспышкой, ионы хрома Cr^{3+} переводятся из основного состояния E_1 в возбужденное E_3 ②. Через 10^{-8} с ионы переходят на метастабильный уровень $E_2 < E_3$. ***Метастабильное состояние*** E_2 — возбужденное состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго (например, 10^{-3} с). Малая вероятность спонтанного перехода $2 \to 1$ приводит к инверсной населенности: $n_2 > n_1$. Случайный фотон с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов ③. При многократном отражении от торцов кристалла индуцированное излучение усиливается. Через полупрозрачный торец рубинового стержня выходит мощный импульс монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

Российские ученые ***Н.Г. Басов, А.М. Прохоров*** и американский физик ***Чарльз Таунс*** были удостоены Нобелевской премии по физике за создание квантового генератора излучения, работающего в сантиметровом диапазоне.

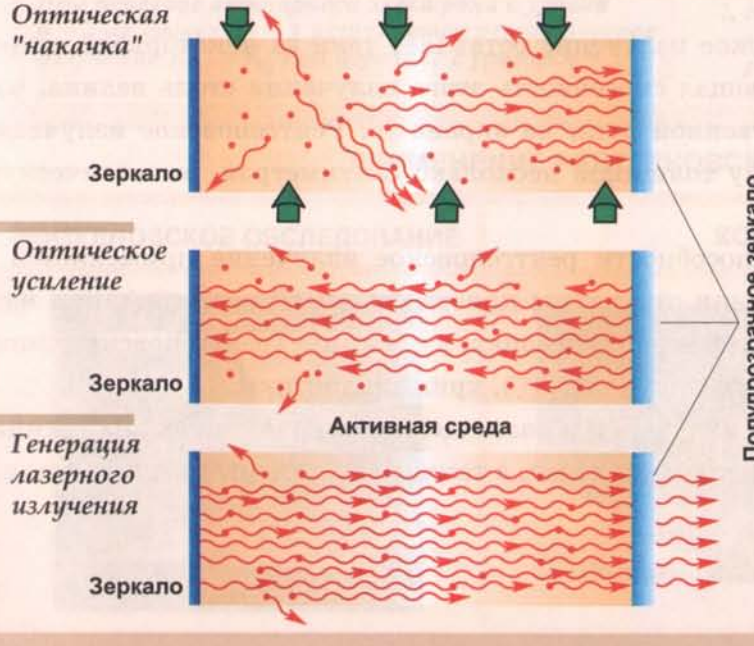
① ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОТОНА С ЭЛЕКТРОНОМ АТОМА



② ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА

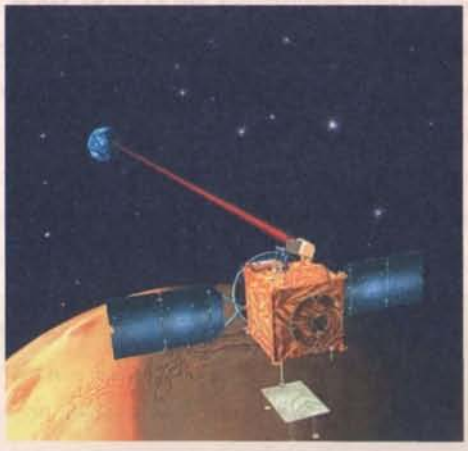
Оптические процессы в рубиновом лазере

③ ОПТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ В КРИСТАЛЛЕ



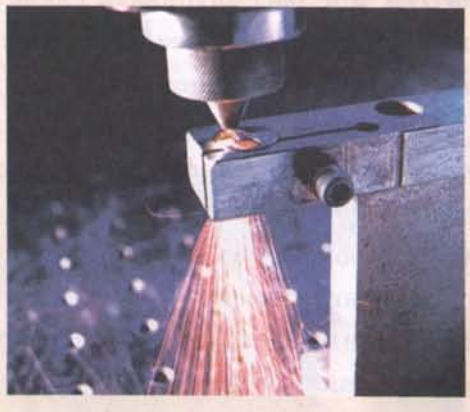
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРА

Лазерная связь и локация



Лазерный прицел

Лазерная резка металлов



§65. РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА

Рентгеновское излучение — электромагнитное излучение в диапазоне частот $3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda = 10^{-12} \div 10^{-8}$ м). Рентгеновское излучение впервые наблюдалось в 1895 г. немецким физиком ***Вильгельмом Рентгеном***. Изучая движение заряженных частиц в разрядной трубке, закрытой черным картоном, Рентген обнаружил свечение экрана, покрытого солью бария, находящегося на некотором расстоянии от трубки ①. Это излучение высокой проникающей способности, проходящее, в отличие от ИК- и УФ-излучения, через картон, Рентген назвал *X*-лучами (подобно тому, как в математике называют неизвестную величину). В опыте Рентгена *X*-излучение возникало при бомбардировке металлического катода электронами, ускоренными электрическим полем между катодом и анодом.

При взаимодействии быстрых электронов с атомами металла возможно возникновение двух типов спектра рентгеновского излучения ②: линейчатый (определенной фиксированной частоты) и сплошной (в котором представлен непрерывный набор частот)

1. ***Линейчатый спектр рентгеновского излучения*** возникает, когда свободный электрон выбивает атомарный с энергетического уровня с энергией E_1 с главным квантовым числом $n = 1$ (с орбиты, ближайшей к ядру) ③. Затем при переходе другого атомарного электрона с уровня E_2 ($n = 2$) на уровень $n = 1$ испускается рентгеновское излучение с частотой $\nu_{21} = (E_2 - E_1)/h$, обозначаемое K_α. Возможно и линейчатое рентгеновское излучение K_β большей частоты ν_{31} (меньшей длины волны) при переходе какого-либо электрона с энергетического уровня E_3 ($n = 3$) на уровень $n = 1$: $\nu_{31} = (E_3 - E_1)/h$.

2. ***Сплошной спектр рентгеновского излучения*** возникает, когда свободный электрон с энергией E_0 тормозится электромагнитным полем атома металла ④. Его энергия уменьшается, становясь равной E. В результате изменения энергии электрона возникает ***тормозное рентгеновское излучение*** частоты $\nu = (E_0 - E)/h$.

Излучение рентгеновской трубки содержит как линейчатый спектр (K_α, K_β), так и сплошной (тормозное излучение).

Подобно видимому свету, рентгеновское излучение оставляет тени за некоторыми непрозрачными предметами. Однако проникающая способность этого излучения столь велика, что Рентген мог рассматривать скелет собственной руки на экране ⑤. Рентгеновское излучение может проникать через деревянную доску толщиной несколько сантиметров, металлическую пластину толщиной порядка сантиметра.

Благодаря высокой проникающей способности рентгеновское излучение применяется в рентгеноструктурном анализе (исследовании структуры кристаллической решетки), при изучении структуры молекул, обнаружении дефектов в образцах, в медицине (рентгеновские снимки, флюорография, лечение злокачественных опухолей ⑥), криминалистике.

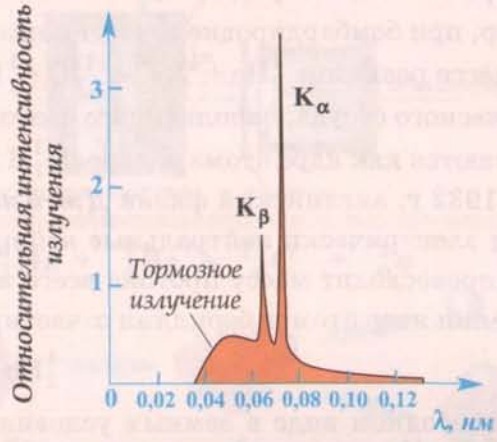
Создание приемников рентгеновского излучения и размещение их на космических станциях позволило обнаружить рентгеновское излучение звезд, а также оболочек сверхновых звезд и целых галактик.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА

① *Рентгеновское излучение при бомбардировке электронами металлического анода*

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

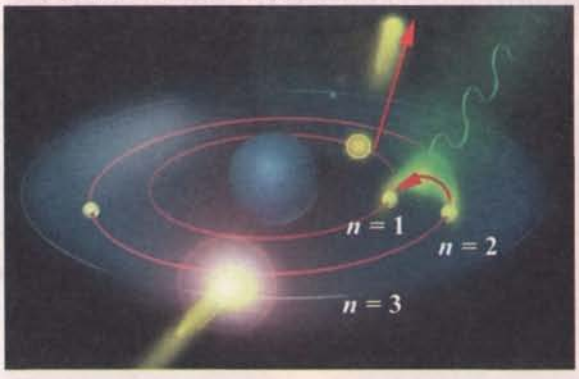
② *Молибденовый анод (энергия электронов 35 кэВ)*



ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЛИНЕЙЧАТЫЙ СПЕКТР

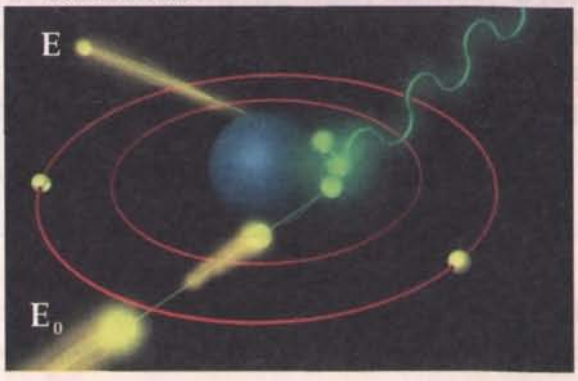
③ *1. Свободный электрон выбивает атомарный с энергетического уровня $n = 1$*



2. При переходе атомарного электрона с уровня $n = 2$ на уровень $n = 1$ испускается рентгеновское излучение K_α, а K_β при переходе с уровня $n = 3$

ТОРМОЗНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

④ *1. Электрон тормозится электромагнитным полем атома*

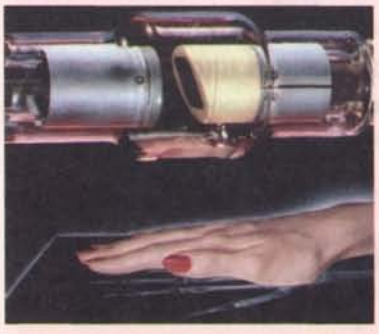


2. В результате изменения энергии электрона возникает рентгеновское излучение частоты $\nu = \frac{1}{h}(E_0 - E)$

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

РЕНТГЕНОВСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ

⑤



КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ

⑥

§66. СОСТАВ И РАЗМЕРЫ ЯДРА

Опыты Резерфорда, проведенные в 1919 г., показали, что в состав ядер атомов входят ***протоны*** p, имеющие заряд $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл и массу $m_p = 1{,}6726231 \cdot 10^{-27}$ кг ①. Они вылетали, например, при бомбардировке α-частицами ${}^4_2\mathrm{He}$ ядра азота ${}^{14}_7\mathrm{N}$ вместе с изотопом кислорода ${}^{17}_8\mathrm{O}$ в процессе реакции: ${}^4_2\mathrm{He} + {}^{14}_7\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_8\mathrm{O} + {}^1_1\mathrm{H}$. При этом источник α-частиц находился внутри металлического сосуда, заполненного азотом. В свободном состоянии в земных условиях протоны встречаются как ядра атома водорода ${}^1_1\mathrm{H}$.

В 1932 г. английский физик ***Джеймс Чедвик*** показал, что помимо протонов в состав ядра входят электрически нейтральные *нейтроны* (от лат. neutron — нейтральный) ②. Масса нейтрона превосходит массу протона всего на 0,14%. В опыте Чедвика нейтроны ${}^1_0n$ вылетали при облучении ядер атомов бериллия α-частицами:

$$ {}^4_2\mathrm{He} + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_6\mathrm{C} + {}^1_0n . $$

В свободном виде в земных условиях нейтроны не встречаются из-за самопроизвольного распада: среднее время жизни нейтрона близко к 15,3 мин.

> ***Протоны и нейтроны удерживаются в ядре в результате сильного взаимодействия между ними,***

подтвержденного в 1919 г. опытами Резерфорда. При бомбардировке ядер атома водорода (протонов) α-частицы испытывали кулоновское отталкивание на расстоянии, большем 3 фм ③. Однако на меньших расстояниях пролета наблюдалось притяжение α-частиц к протону, обусловленное сильным взаимодействием нуклонов.

> ***Притяжение между протоном и нейтроном объясняется их постоянным обменом друг с другом виртуальной (экспериментально ненаблюдаемой) частицей — π^+-мезоном ④.***

Процесс обмена виртуальными частицами изображают на диаграммах Фейнмана (***Ричард Фейнман*** — американский физик), на которых реальной частице сопоставляется прямая линия, а виртуальной — волнистая. По современным представлениям

> ***протон и нейтрон являются двумя разными состояниями одной и той же частицы — нуклона (от лат. nucleus — ядро). Протон — нуклон в заряженном состоянии, нейтрон — в нейтральном.***

Нуклоны обладают, как и электрон ⑤, полуцелым спином, т.е. имеют спиновый момент импульса, равный $\hbar/2$. Взаимодействие нуклонов зависит от взаимной ориентации их спинов. При антипараллельных спинах энергия взаимодействия нуклонов оказывается меньше, чем при параллельных. Поэтому парное расположение нуклонов с антипараллельными спинами в одном энергетическом состоянии энергетически наиболее выгодно.

Радиус ядра R с массовым числом A можно оценить в предположении плотной упаковки нуклонов в ядре, т.е. когда объем ядра складывается из объемов отдельных нуклонов радиусом r_0 ⑥:

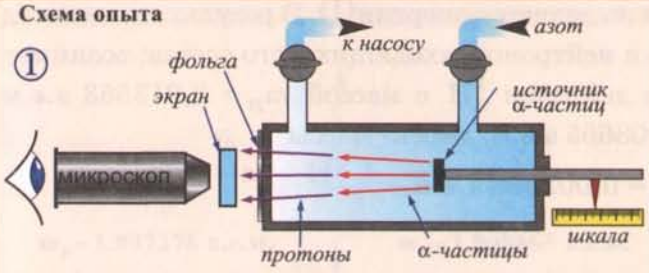
$$ \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \cdot A. $$

Следовательно, радиус ядра $R = r_0 \cdot A^{1/3}$.

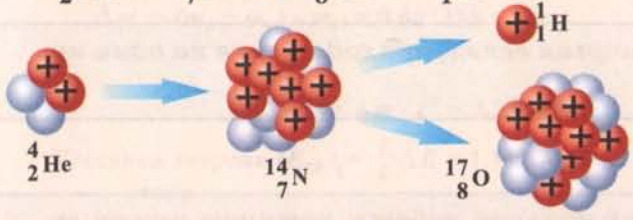
Эксперименты показывают, что $r_0 \approx 1{,}2$ фм.

ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА (Э.РЕЗЕРФОРД – 1919 г.)

Схема опыта

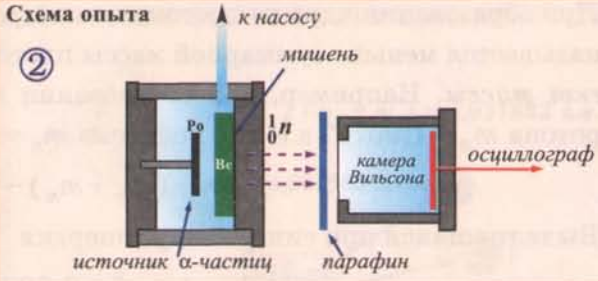


$$^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$$

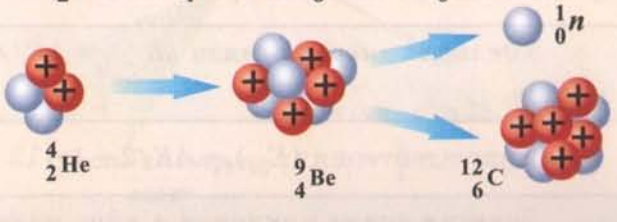


ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА (ДЖ. ЧЕДВИК – 1932 г.)

Схема опыта

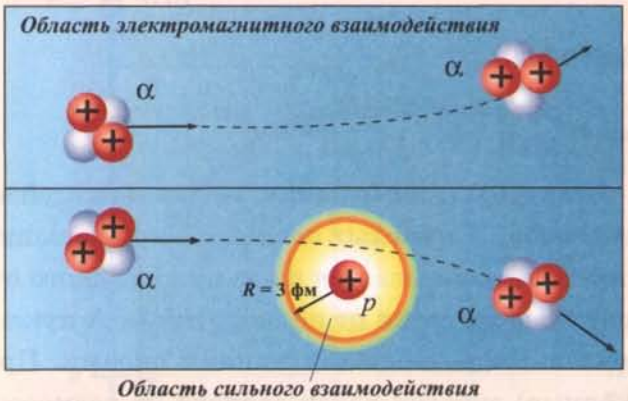


$$^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$



СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ

③ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ α-ЧАСТИЦЫ С ПРОТОНОМ



④ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОТОНА И НЕЙТРОНА

π^+ - мезон - *виртуальный переносчик взаимодействия*

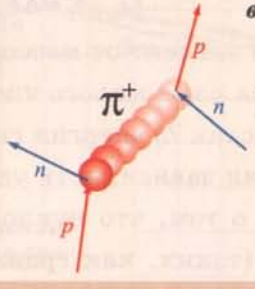


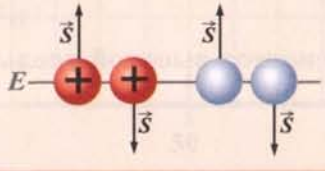
Диаграмма Фейнмана, описывающая взаимодействие протона и нейтрона

⑤ ЯДРО АТОМА ГЕЛИЯ

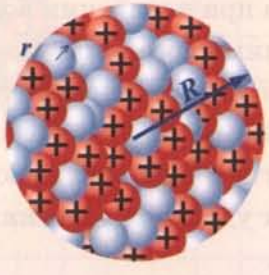
Нуклоны в ядре

$^{4}_{2}He$

Спины нуклонов в основном энергетическом состоянии



⑥ РАЗМЕР ЯДРА



A – массовое число – число нуклонов в ядре

Объем ядра

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot A$$

$$R = rA^{1/3}$$

$r = 1{,}2 \cdot 10^{-15}$ м

§67. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНОВ В ЯДРЕ

При образовании ядра из протонов и нейтронов выделяется энергия ①. В результате масса ядра оказывается меньше суммарной массы протонов и нейтронов, входящих в его состав: возникает ***дефект массы***. Например, при образовании ядра дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ с массой $m_D = 2{,}013553$ а.е.м. из протона $m_p = 1{,}00727$ а.е.м. и нейтрона $m_n = 1{,}008665$ а.е.м. дефект массы

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = 0{,}002388 \text{ а.е.м.}$$

Выделившаяся при синтезе ядра энергия

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0{,}002388 \cdot 931{,}5 = 2{,}224 \text{ МэВ},$$

определяет энергию связи нуклонов в ядре.

Удельная энергия связи $(E_{\text{св}})_1 = \Delta E / A$ ***— энергия связи, приходящаяся на один нуклон.***

Для ядра дейтерия $(E_{\text{св}})_1 = \Delta E / 2 = 1{,}112$ МэВ.

Энергия связи нуклонов в ядре равна минимальной работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на составные части — протоны и нейтроны ②.

Оценим удельную энергию связи нуклона в α-частице — ядре атома ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ ($m_\alpha = 4{,}001506$ а.е.м.). Дефект массы

$$\Delta m = 2(m_p + m_n) - m_\alpha = 0{,}030376 \text{ а.е.м.}$$

Энергия связи нуклонов в ядре

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 28{,}296 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи нуклона

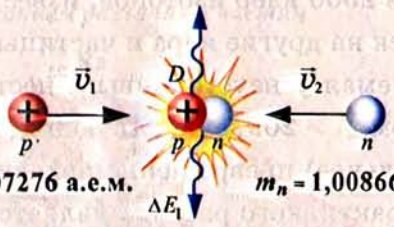
$$(E_{\text{св}})_1 = \Delta E / 4 = 7{,}07 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи зависит от массового числа A ③. У небольших легких ядер дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ она мала из-за малого числа нуклонов. У тяжелых элементов при больших A (и больших зарядовых числах Z) энергия связи нуклона уменьшается из-за кулоновского отталкивания протонов. Слабая зависимость удельной энергии связи от полного числа A нуклонов в ядре свидетельствует о том, что нуклоны связаны короткодействующими силами. При дальнодействующих силах (таких, как гравитационные) энергия связи зависит от размеров: камень в 6 раз труднее оторвать от поверхности Земли, чем от Луны. Ядерные силы напоминают быстро убывающие с расстоянием силы взаимодействия между молекулами жидкости. Энергия связи молекул не зависит от массы жидкости, поэтому удельная теплота парообразования воды одинакова при испарении воды из чашки и из озера. Лишний нуклон взаимодействует лишь с ближайшими соседями. Подобно молекулам, находящимся на поверхности воды, нуклоны втягиваются внутрь ядра, испытывая поверхностное натяжение. Вот почему ядра имеют сферическую форму. Ядро является как бы каплей ядерного вещества.

Наибольшей энергией связи обладают стабильные ядра, содержащие целое число α-частиц $\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right)$. Максимальная удельная энергия связи 8,795 МэВ в ядре никеля ${}^{62}_{28}\mathrm{Ni}$ — наиболее стабильного из всех ядер.

Широкая распространенность железа во Вселенной объясняется высокой удельной энергией связи ядра железа.

① ОБРАЗОВАНИЕ ДЕЙТРОНА



$m_p = 1{,}007276$ а.е.м. $m_n = 1{,}008665$ а.е.м.

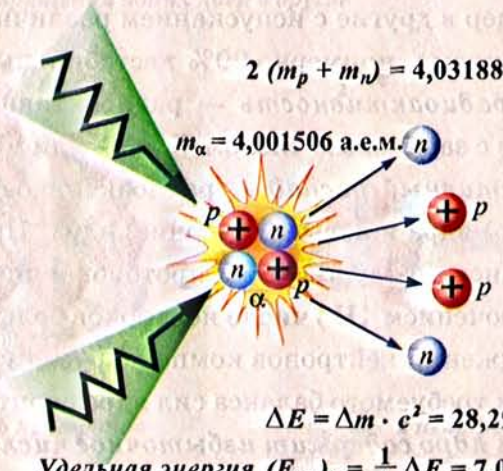
$m_D = 2{,}013553$ а.е.м.

$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = 0{,}002388$ а.е.м.

$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 2{,}224$ МэВ

Удельная энергия связи $(E_{св})_1 = \frac{1}{2}\Delta E = 1{,}112$ МэВ

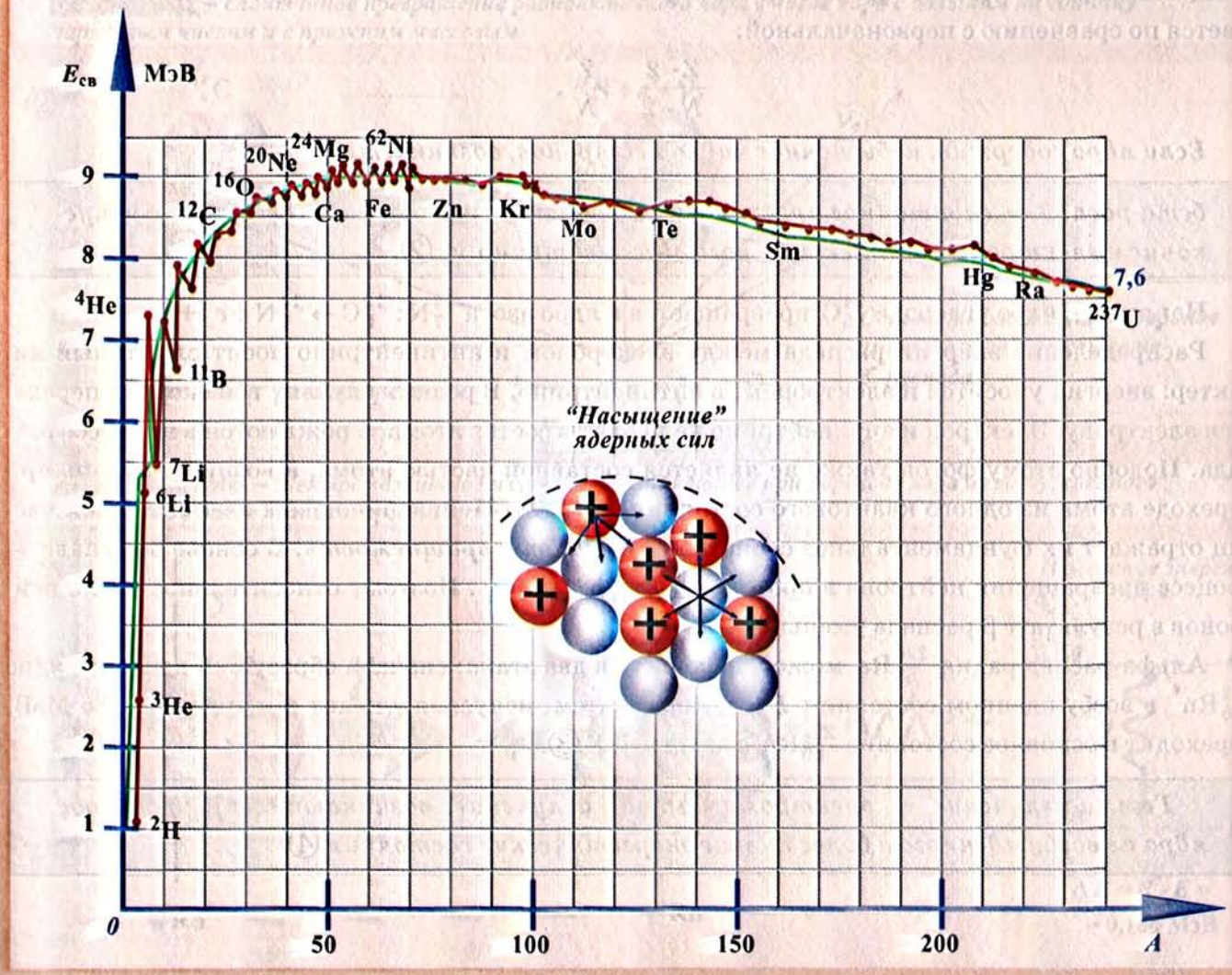
② ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ α-ЧАСТИЦЫ



$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 28{,}296$ МэВ

Удельная энергия связи $(E_{св})_1 = \frac{1}{4}\Delta E = 7{,}07$ МэВ

③ УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНА В ЯДРЕ



§68. ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность (от лат. radio — излучаю) — явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц. Из 2500 ядер изотопов, известных в настоящее время, примерно 90% нестабильны и распадаются на другие ядра и частицы. ***Естественная радиоактивность*** — радиоактивность, наблюдаемая у неустойчивых, нестабильных изотопов с зарядовым числом $Z > 83$ или массовым числом $A > 209$, существующих в природе. ***Радиоактивный распад*** — радиоактивное (самопроизвольное) превращение исходного (материнского) ядра в новые (дочерние) ядра. Причиной радиоактивного распада является нарушение баланса между числом Z протонов и числом N нейтронов в ядре. Во всех стабильных ядрах (за исключением $^{1}_{1}\mathrm{H}$) число нейтронов больше (не меньше) числа протонов: $N \geq Z$. Поле ядерного притяжения нейтронов компенсирует кулоновское отталкивание между протонами. При нарушении требуемого баланса сил ядро спонтанно переходит в состояние с меньшей энергией.

Если ядро содержит избыточное число протонов, возникает

> ***альфа-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием α-частицы (ядро атома $^{4}_{2}\mathrm{He}$) ①.***

Широко используемым источником α-частиц является радий $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$. При распаде он превращается в радон $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$: $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$, а относительная доля протонов в ядре уменьшается по сравнению с первоначальной:

$$\frac{Z-2}{N-2} < \frac{Z}{N}.$$

Если ядро содержит избыточное число нейтронов, возникает

> ***бета-распад — спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с испусканием электрона e^- и электронного антинейтрино $\tilde{\nu}_e$ ②.***

Например, ядро углерода $^{14}_{6}\mathrm{C}$ превращается в ядро азота $^{14}_{7}\mathrm{N}$: $^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + e^- + \tilde{\nu}_e$.

Распределение энергии распада между электроном и антинейтрино носит случайный характер: энергия уносится и электроном, и антинейтрино. В редких случаях вся энергия передается электрону. Электрон и антинейтрино не входят в состав атома, а рождаются в процессе распада. Подобно этому фотон также не является составной частью атома, а возникает лишь при переходе атома из одного квантового состояния в другое. Появление новых элементарных частиц отражает их фундаментальное свойство — ***взаимопревращаемость***. В основе β-распада — процесс превращения нейтрона в протон: $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + e^- + \tilde{\nu}_e$. Поэтому относительное число нейтронов в результате β-распада уменьшается.

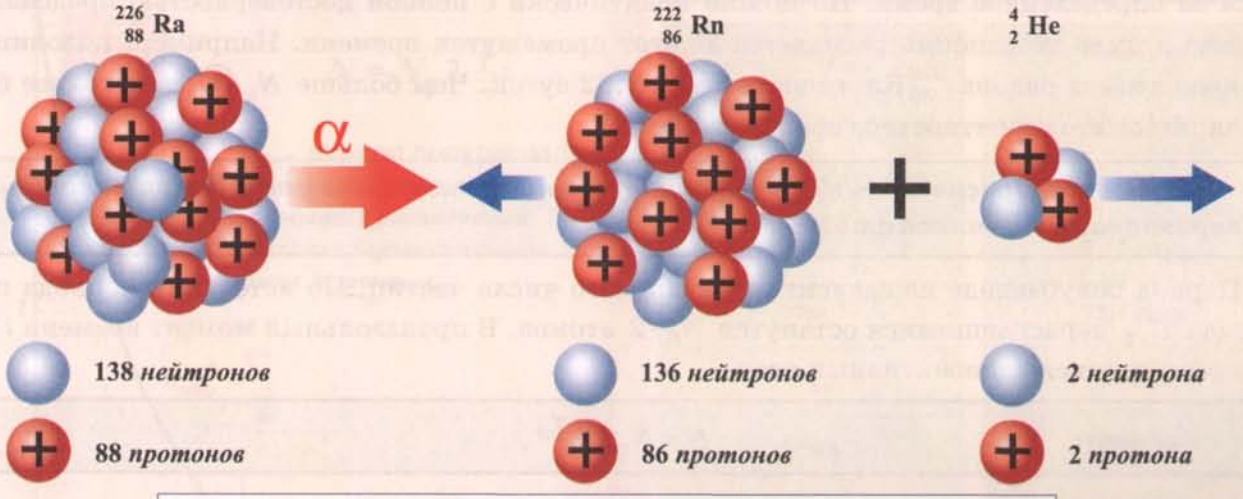
Альфа-распад радия $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ может проходить в два этапа: сначала образуется дочернее ядро $^{222}_{86}\mathrm{Rn}^{*}$ в возбужденном состоянии E^{*}, которое затем, испуская γ-квант с энергией 0,186 МэВ, переходит в основное состояние $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ с энергией E ③.

> ***Гамма-излучение — электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбужденного в более низкие энергетические состояния ④.***

α - РАСПАД – *спонтанный распад радиоактивного ядра, сопровождающийся испусканием α-частиц.*

РАДИОАКТИВНОСТЬ – *явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц*

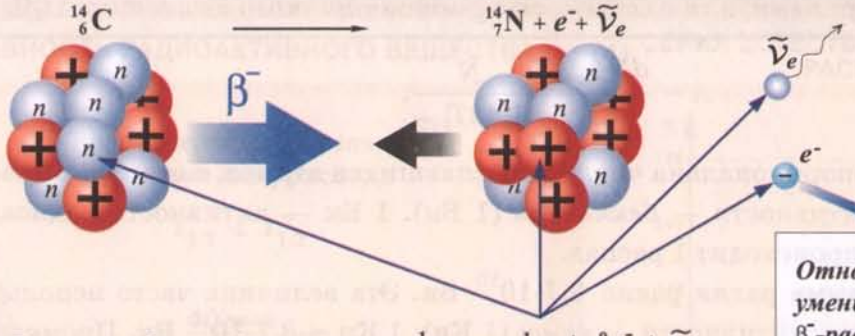
①



Относительная доля протонов уменьшается в результате α-распада

β⁻ - РАСПАД – *спонтанное превращение радиоактивного ядра в новое ядро с бо́льшим на единицу зарядовым числом и с прежним массовым*

②

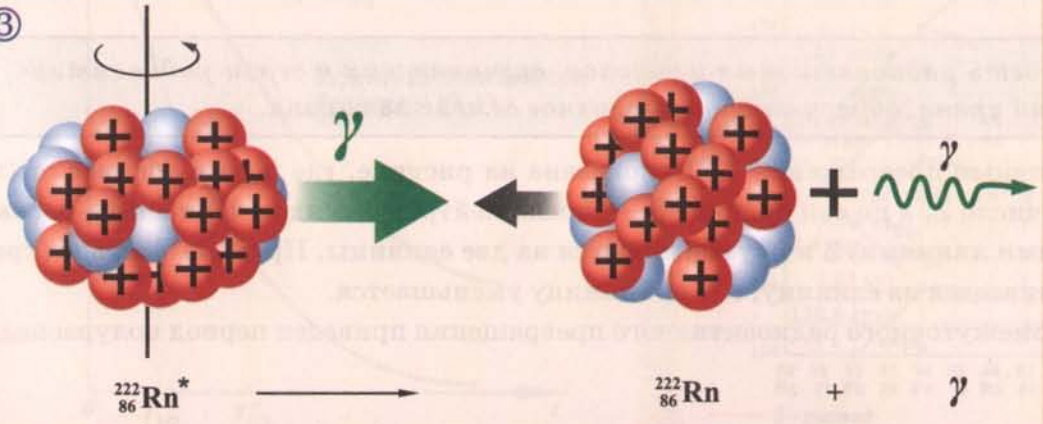


Относительная доля нейтронов уменьшается в результате β⁻-распада

В основе β⁻ распада реакция: $^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e^- + \tilde{\nu}_e$

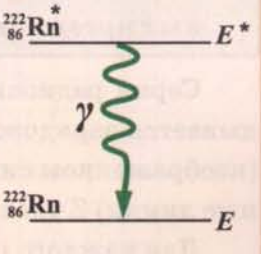
γ - ИЗЛУЧЕНИЕ – *электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбужденного состояния в более низкое энергетическое состояние*

③



Изменение энергии ядра

④



$\Delta E = E^* - E =$
$= 0{,}186$ МэВ

§69. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Радиоактивный распад — статистический процесс. Нельзя указать, какие именно атомы в радиоактивном образце, состоящем в начальный момент времени ($t = 0$) из N_0 атомов, распадутся за определенное время. Но можно практически с полной достоверностью предсказать, сколько атомов независимо распадется за этот промежуток времени. Например, половина из N_0 ядер атомов радона $^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ распадется за 3,82 суток. Чем больше N_0 ①, тем точнее будет выполняться это вероятностное предсказание.

Период полураспада — промежуток времени, за который распадется половина первоначального числа атомов.

Период полураспада не зависит от начального числа частиц. По истечении периода полураспада $T_{1/2}$ нераспавшимися останутся $N_0/2$ атомов. В произвольный момент времени t число нераспавшихся радиоактивных ядер

$$N = N_0 2^{-t/T_{1/2}}. \qquad (1)$$

Закон (1) убывания числа радиоактивных ядер со временем — ***закон радиоактивного распада***. Чем меньше период полураспада, тем быстрее происходит распад. В таблице приведен период полураспада некоторых изотопов ②.

Скорость радиоактивного распада характеризует число ядер $N_{\text{расп}} = N_0 - N$, распавшихся в единицу времени, или активность радиоактивного вещества A ③:

$$A = \frac{dN_{\text{расп}}}{dt} = \frac{N}{1{,}44T_{1/2}}.$$

Активность прямо пропорциональна числу нераспавшихся атомов, которое убывает с течением времени. Единица активности — ***беккерель*** (1 Бк). 1 Бк — активность радиоактивного вещества, в котором за 1 с происходит 1 распад.

Активность одного грамма радия равна $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк. Эта величина часто используется на практике в качестве единицы активности — ***кюри*** (1 Ки); 1 Ки = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк. Промежуток времени $t = 1{,}44\,T_{1/2}$ характеризует ***среднее время жизни радиоактивного изотопа.***

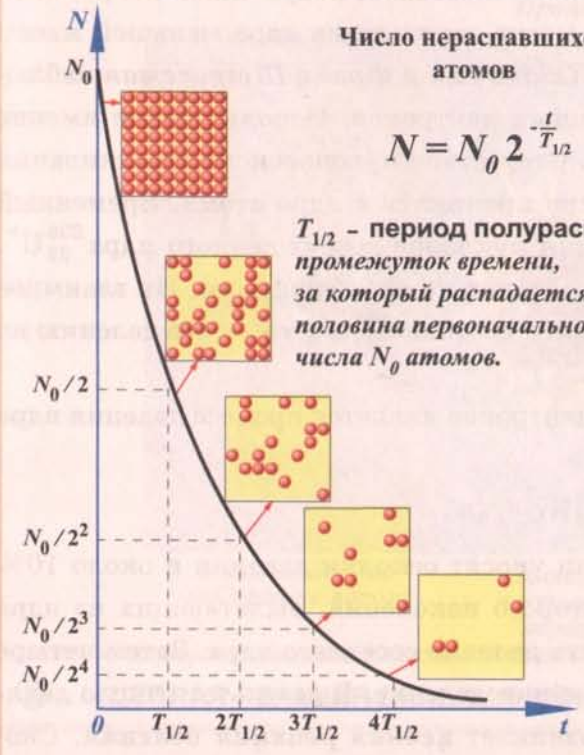
Естественный радиоактивный распад конкретного изотопа может являться отдельным звеном длинной последовательности (серии) ядерных превращений ④. Промежуточные в серии дочерние ядра, будучи нестабильными, продолжают распадаться до тех пор, пока не образуется стабильное ядро.

Вся совокупность радиоактивных изотопов, возникающих в серии радиоактивных превращений урана, образует радиоактивное семейство урана.

Серия радиоактивных превращений $^{238}_{92}\mathrm{U}$ показана на рисунке, где по оси абсцисс откладывается зарядовое число Z, а по оси ординат N — число нейтронов в ядре. При альфа-распаде (изображенном синими линиями) Z и N уменьшаются на две единицы. При бета-распаде (красные линии) Z увеличивается на единицу, а N на единицу уменьшается.

Для каждого промежуточного радиоактивного превращения приведен период полураспада.

① ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА



Число нераспавшихся атомов

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$T_{1/2}$ – **период полураспада** – *промежуток времени, за который распадается половина первоначального числа N_0 атомов.*

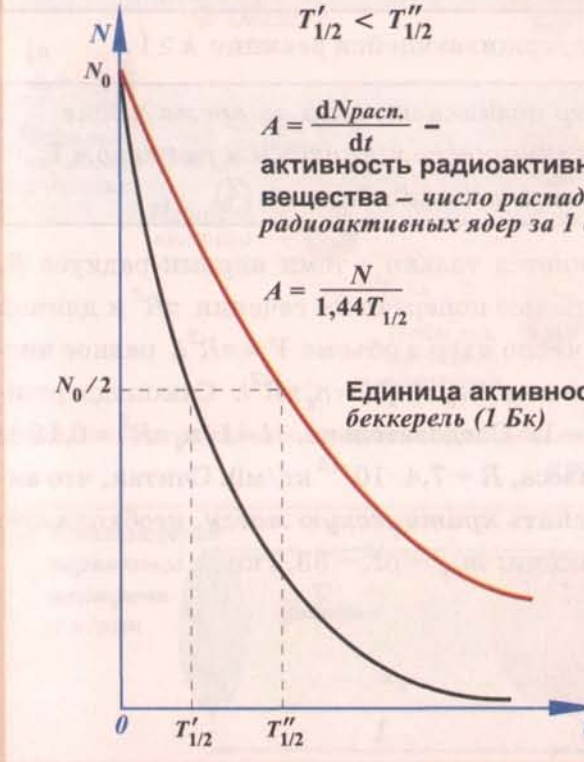
② ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА НЕКОТОРЫХ ИЗОТОПОВ

ИЗОТОП	*Период полураспада*
^{104}Tc	18 минут
^{222}Rn	3,8 суток
^{131}I	8 суток
^{60}Co	5,24 года
^{3}H	12,3 года
^{90}Sr	28 лет
^{226}Ra	1600 лет
^{14}C	5730 лет
^{239}Pu	$2{,}4 \cdot 10^4$ лет
^{238}U	$4{,}5 \cdot 10^9$ лет

③ АКТИВНОСТЬ РАДИОАКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА

Распад атомов с разным периодом полураспада

$$T'_{1/2} < T''_{1/2}$$

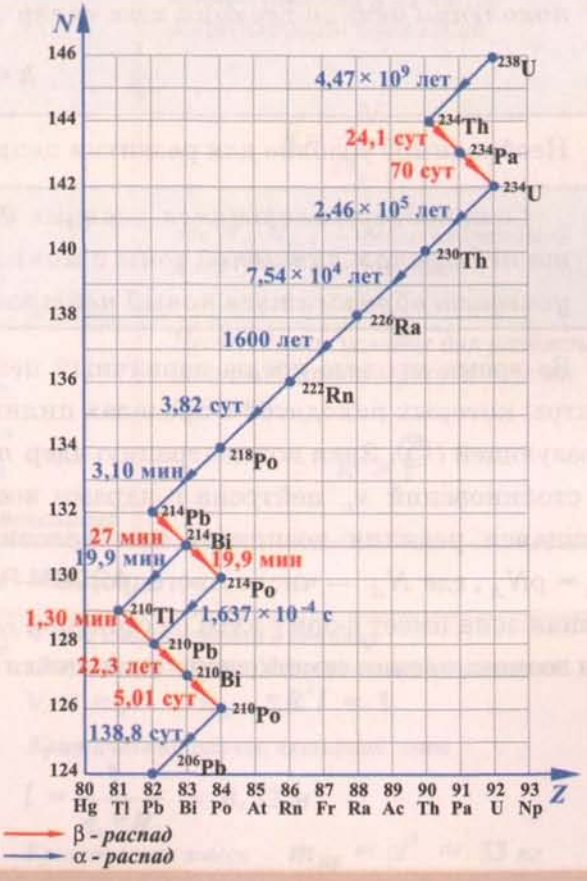


$$A = \frac{dN_{расп.}}{dt}$$ – **активность радиоактивного вещества** – *число распадов радиоактивных ядер за 1 с*

$$A = \frac{N}{1{,}44T_{1/2}}$$

Единица активности – *беккерель (1 Бк)*

④ СЕРИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА ИЗОТОПА



§70. ЦЕПНАЯ ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Искусственная радиоактивность — радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях. Ядра тяжелых элементов могут делиться на ядра меньшей массы при внешнем воздействии. В 1938 г. немецкие ученые ***Отто Ган*** и ***Франц Штрассман*** наблюдали деление ядра урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$ под действием медленных нейтронов. Использование именно нейтронов обусловлено их электронейтральностью ①. Отсутствие кулоновского отталкивания протонами ядра позволяет нейтронам беспрепятственно проникать в ядро атома. Временный захват нейтрона вызывает пространственные колебания нуклонов возбужденного ядра $^{236}_{92}\mathrm{U}^{*}$. Избыток нейтронов в центре ядра означает избыток протонов на его периферии. Их взаимное отталкивание приводит к искусственной радиоактивности изотопа $^{236}_{92}\mathrm{U}^{*}$, т.е. к его делению на ядра меньшей массы, называемые осколками деления.

Типичной реакцией деления с образованием трех нейтронов является процесс деления ядра урана $^{235}_{92}\mathrm{U}$ ②:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{138}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{95}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{1}_{0}n\,.$$

В процессе деления ядра урана около 90% энергии уносят осколки деления и около 10% возникающие нейтроны. Любой из двух нейтронов второго поколения, вылетающих из ядра $^{235}_{92}\mathrm{U}$ в процессе деления, может в свою очередь вызвать деление соседнего ядра. Затем четыре нейтрона третьего поколения способны вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер начинает лавинообразно нарастать — возникает ***цепная реакция деления***. Скорость цепной реакции деления ядер характеризует

коэффициент размножения нейтронов ③ ***— отношение числа нейтронов*** N_i ***в i-ом поколении цепной реакции к их числу*** N_{i-1} ***в предыдущем*** $(i-1)$***-ом:***

$$k = N_i / N_{i-1}.$$

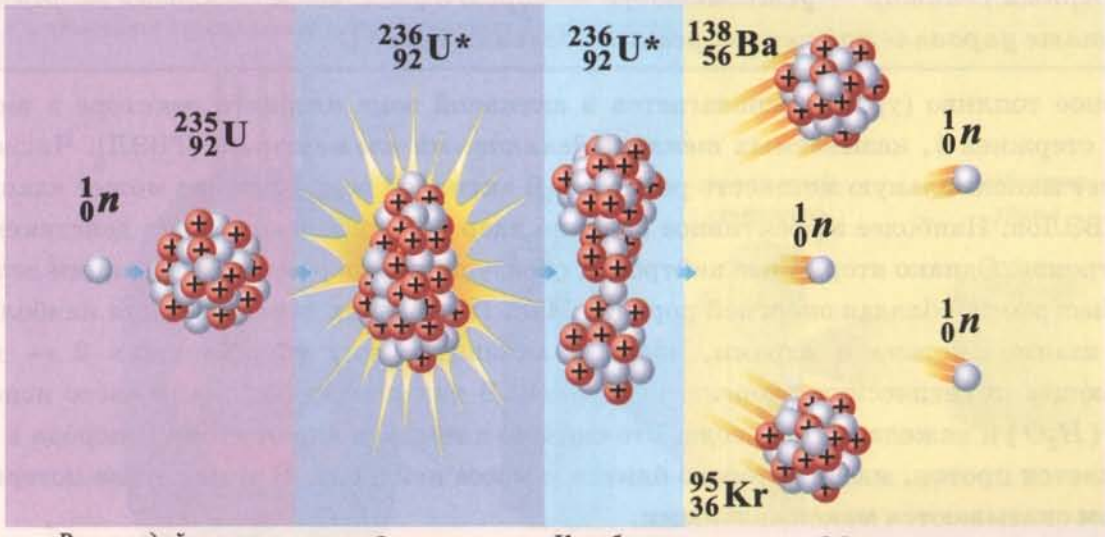
Необходимое условие для развития цепной самоподдерживающейся реакции $k \geq 1$.

Самоподдерживающаяся реакция деления ядер возникает, если за время пролета нейтроном активной зоны с минимальным критическим линейным размером l ***успевает образоваться новый нейтрон в результате реакции деления*** ④.

За время пролета среды первичный нейтрон столкнется только с теми ядрами радиуса R, центры которых находятся в пределах цилиндра с площадью поперечного сечения πR^2 и длиной образующей l ⑤. Зная концентрацию ядер $n_я$, найдем число ядер в объеме $V = \pi R^2 l$, равное числу столкновений ν_c нейтрона с ядрами в единицу времени: $\nu_c = n_я V = n_я \pi R^2 l$. Самоподдерживающаяся реакция возникает при условии, что $\nu_c = 1$. Следовательно, $l = 1/n_я \pi R^2 \approx 0{,}12$ м ($n_я = \rho N_A$, где N_A — число Авогадро, M — молярная масса, $R = 7{,}4 \cdot 10^{-15}$ кг/мі). Считая, что активная зона имеет форму куба со стороной l, можно оценить ***критическую массу***, необходимую для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции: $m_{кр} = \rho l^3 = 33{,}2$ кг.

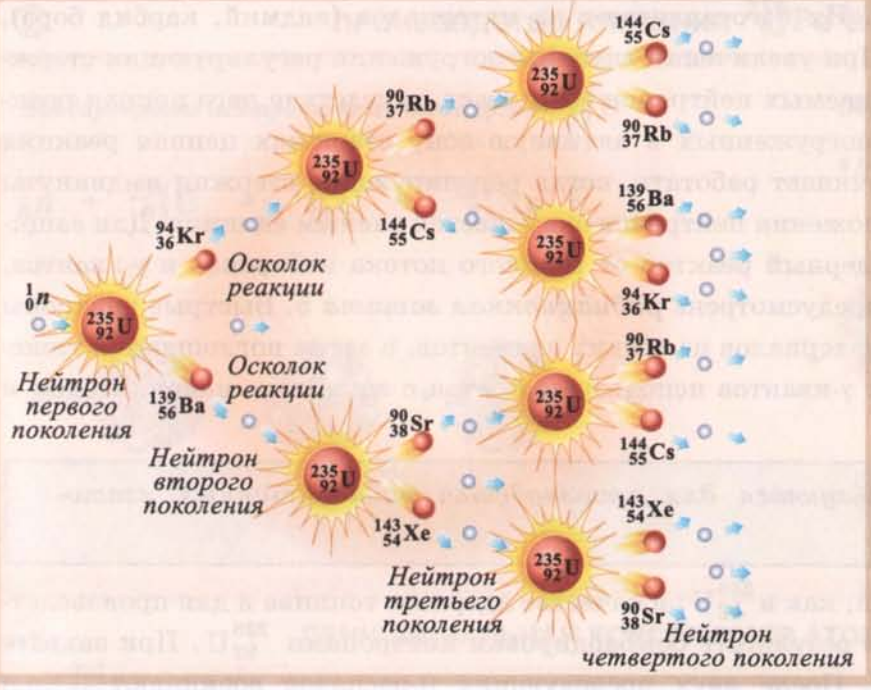
① ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Процесс деления ядра урана



Взаимодействие нейтрона с ядром — *Захват нейтрона ядром* — *Колебания возбужденного ядра* — *Образование осколков деления и нейтронов*

② ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР УРАНА $^{235}_{92}U$



③ СКОРОСТЬ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ

Коэффициент размножения нейтронов - *отношение числа нейтронов в данном поколении цепной реакции к их числу в предыдущем поколении*

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}},$$

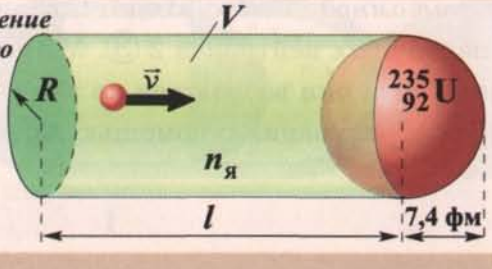
где N_i, N_{i-1} - число нейтронов в i и (i – 1) поколениях

Необходимое условие для развития цепной самоподдерживающейся реакции

$$k \geqslant 1$$

КРИТИЧЕСКАЯ МАССА

④ *Столкновение первичного нейтрона с ядром*



⑤ *Число столкновений в единицу времени при самоподдерживающейся реакции*

$$\nu_c = n_я V = n_я \cdot \pi R^2 l = 1$$

Критический размер активной зоны

$$l = \frac{1}{n_я \pi R^2} \approx 0,12\ м$$

Критическая масса $m_{кр} = \rho l^3 \approx 33\ кг$

§71. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Ядерный реактор — устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер ①.

Ядерное топливо (уран) располагается в активной зоне ядерного реактора в виде вертикальных стержней 1, называемых ***тепловыделяющими элементами*** (ТВЭЛ). Число ТВЭЛов определяет максимальную мощность реактора. В активной зоне реактора может находиться до 90 000 ТВЭЛов. Наиболее эффективное деление ядер $^{235}_{92}U$ происходит под действием медленных нейтронов. Однако вторичные нейтроны, образующиеся в результате реакции деления, являются быстрыми, обладая энергией порядка МэВ. Поэтому их замедляют для наиболее эффективного взаимодействия с ядрами, вводя в активную зону ***замедлитель*** 2 — вещество, уменьшающее кинетическую энергию нейтронов. В качестве замедлителя часто используется обычная (H_2O) и тяжелая (D_2O) вода. Это связано с тем, что ядром атома водорода в молекуле воды является протон, масса которого близка к массе нейтрона. В этом случае потери энергии нейтроном оказываются максимальными.

Хорошим замедлителем считается графит, ядра которого не поглощают нейтронов. Для уменьшения утечки нейтронов и увеличения коэффициента размножения активную зону окружают ***отражателем нейтронов*** 3 — оболочкой, отражающей нейтроны внутрь зоны. Управление скоростью цепной реакции осуществляется с помощью передвижения в активной зоне ***регулирующих стержней*** 4. Их изготавливают из материалов (кадмий, карбид бора), сильно поглощающих нейтроны. При увеличении глубины погружения регулирующих стержней в активную зону число поглощаемых нейтронов возрастает, вследствие чего цепная реакция ослабевает. При полностью погруженных в активную зону стержнях цепная реакция должна прекратиться. Реактор начинает работать, когда регулирующие стержни выдвинуты настолько, что коэффициент размножения нейтронов оказывается равным единице. Для защиты персонала, обслуживающего ядерный реактор от мощного потока нейтронов и γ-квантов, возникающих при делении ядер, предусмотрена ***радиационная защита*** 5. Быстрые нейтроны сначала замедляются с помощью материалов из легких элементов, а затем поглощаются тяжелыми элементами. Для защиты от γ-квантов используется бетон с железным наполнителем и соединениями бора.

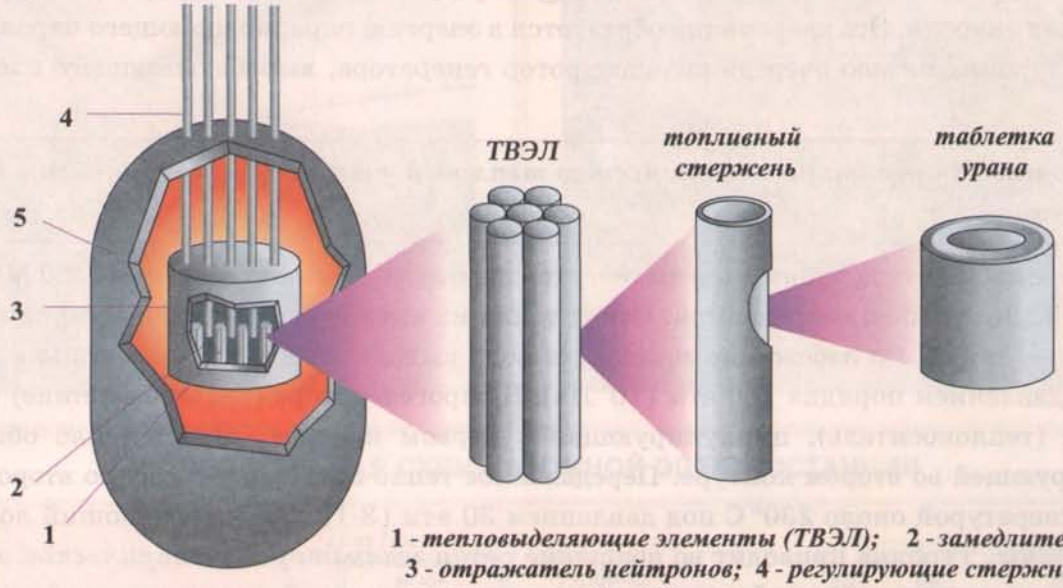
Ядерные реакторы используются для производства радиоактивных изотопов ②.

Плутоний $^{239}_{94}Pu$, используемый, как и $^{235}_{92}U$, в качестве ядерного топлива и для производства ядерного оружия, получается в результате бомбардировки нейтронами $^{238}_{92}U$. При захвате нейтрона образуется изотоп $^{239}_{92}U$. После двух последующих β-распадов возникают $^{239}_{93}Np$ и $^{239}_{94}Pu$.

В состав одной из возможных конструкций *атомной бомбы* входят два куска урана $^{235}_{92}U$ (или плутония $^{239}_{94}Pu$) 1, а также источник первичных нейтронов 2 ③. Масса каждого из этих кусков меньше критической, поэтому в отдельности они взорваться не могут. Однако их суммарная масса превышает критическую. После выстреливания с помощью ***запала*** 3 одного куска урана в другой бомба взрывается.

① СХЕМА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Ядерный реактор – *устройство, в котором выделяется тепловая энергия в результате управляемой цепной реакции деления ядер*

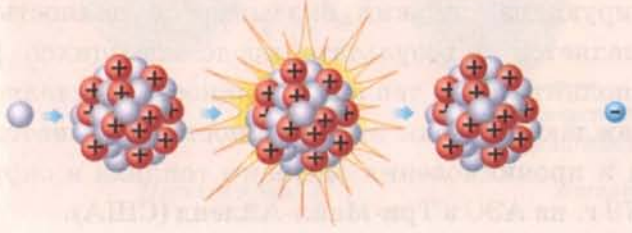


1 - тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ); 2 - замедлитель; 3 - отражатель нейтронов; 4 - регулирующие стержни; 5 - радиационная защита

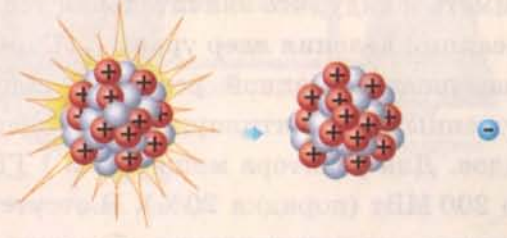
② ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ $^{239}_{94}Pu$ В РЕАКТОРЕ

Бомбардировка нейтронами изотопа урана $^{238}_{92}U$

$$^{1}_{0}n + {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e$$

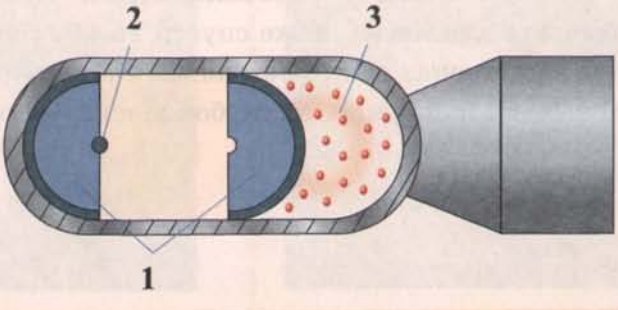


Образование плутония $^{239}_{94}Pu$ *в результате бета-распада*



$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e$$

③ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ АТОМНОЙ БОМБЫ



1 - куски урана $^{235}_{92}U$ *(или плутония* $^{239}_{94}Pu$*)*

2 - источники первичных нейтронов

3 - запал

§72. АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Ядерный реактор — основной элемент ***атомной электростанции*** (АЭС), преобразующей тепловую ядерную энергию электрическую ①. В результате деления ядер в реакторе выделяется тепловая энергия. Эта энергия преобразуется в энергию пара, вращающего паровую турбину. Паровая турбина в свою очередь вращает ротор генератора, вырабатывающего электрический ток.

> ***Мощность реактора — количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени.***

При каждом акте деления ядер выделяется значительная энергия (около 200 МэВ), поэтому стенки ТВЭЛов сильно нагреваются. Отвод тепла из активной зоны осуществляется ***теплоносителем*** — водой. Во избежание закипания вода выводится из активной зоны в ***парогенератор*** под давлением порядка 100 атм (10^7 Па). В парогенераторе (теплообменнике) радиоактивная вода (теплоноситель), циркулирующая в первом контуре, отдает тепло обычной воде, циркулирующей во втором контуре. Передаваемое тепло превращает воду во втором контуре в пар с температурой около 230° С под давлением 30 атм ($3 \cdot 10^6$ Па), вращающий лопатки ***паровой турбины***. Турбина приводит во вращение ротор ***генератора электрической энергии***. Охлаждение и конденсация отработанного пара происходит в ***конденсаторе*** и ***градирне***.

Первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт была построена в 1954 г. в нашей стране (г. Обнинск).

Коэффициент полезного действия АЭС зависит, в частности, от КПД парогенератора и турбины. КПД современных АЭС порядка одной трети.

Учитывая значительную величину тепловой энергии, выделяемой в ядерном реакторе АЭС, жизненно необходимо решение ***проблем контроля и ядерной безопасности***. Прежде всего следует иметь в виду, что значительная тепловая энергия выделяется не только в результате цепной реакции деления ядер урана $^{235}_{92}U$, но и вследствие β-распадов осколков реакции. Даже после завершения цепной реакции, когда регулирующие стержни оказываются полностью погруженными в активную зону, энергия выделяется в результате продолжающихся β-распадов. Для реактора мощностью 1 ГВт эта дополнительная тепловая мощность составляет около 200 МВт (порядка 20%). В отсутствие охлаждающей воды этой мощности оказывается достаточно для расплавления оболочки реактора и проникновения ядерного топлива в окружающую среду. Подобная авария произошла в 1979 г. на АЭС в Три-Майл-Айленд (США).

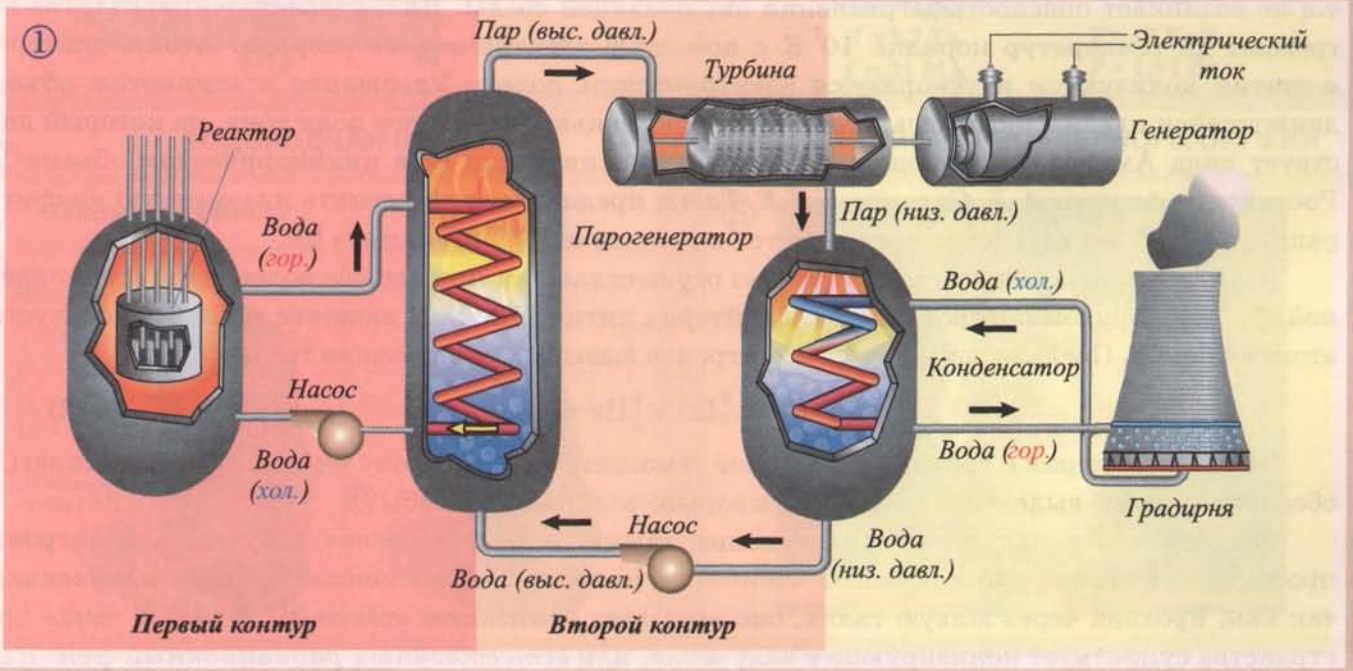
В 1986 г. избыточное удаление регулирующих стержней из активной зоны реактора третьего энергоблока Чернобыльской АЭС привело к увеличению мощности реактора в 10 000 раз за 4 с. Избыточное тепловыделение привело к выбросу в атмосферу радиоактивных веществ и радиационному загрязнению обширных территорий Украины, Белоруссии и России.

В результате работы АЭС возникают ядерные отходы. Радиоактивность отработавших ТВЭЛов остается высокой, представляя опасность для людей даже спустя 25 000 лет. Отработавшие ТВЭЛы обычно хранят в жидком виде в цистернах из нержавеющей стали, окруженных бетоном. Наиболее активные отходы остекловывают и помещают в глубокие шахты под землей.

ЗАЛ УПРАВЛЕНИЯ СТАНЦИЕЙ

ГЕНЕРАТОР

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ



ЗАМЕНА ТВЭЛ В РЕАКТОРЕ

ПАРОГЕНЕРАТОР

ГРАДИРНЯ

§73. ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выделение ядерной энергии может происходить не только при реакции деления ядер, но и при реакции соединения (синтеза) ядер ①. При соединении двух легких ядер, например, дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ и трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, синтезируется более тяжелое ядро ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ и вылетает нейтрон:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n\,. \qquad (1) $$

При синтезе легких ядер выделяется значительная энергия (17,6 МэВ), большая, чем при реакции деления тяжелых. Для слияния ядер они должны сблизиться до расстояний, меньших 10^{-14} м, где действуют силы ядерного притяжения. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер. Для его преодоления ядра должны обладать значительной кинетической энергией, соответствующей температуре, превышающей 10^{7} К.

Термоядерный синтез — реакция, в которой при высокой температуре, большей 10^{7} К, из легких ядер синтезируются более тяжелые.

При ***управляемом термоядерном синтезе*** (УТС) не образуются радиоактивные отходы, т.е не возникает опасность загрязнения окружающей среды. Для осуществления УТС газ нагревают до температур порядка 10^{7} К с помощью электрического разряда. Атомы дейтерия и трития ионизуются и ускоряются электрическим полем. Удержание в замкнутом объеме движущейся плазмы оказалось возможным с помощью магнитного поля тока, на который действует сила Ампера, сжимающая плазму и удерживающая ее в цилиндрическом объеме ②. Российские физики ***А.Д. Сахаров*** и ***И.Е. Тамм*** предложили применять плазменную конфигурацию в форме тора, которая используется в установке УТС «Токамак» ③.

Неуправляемый термоядерный синтез осуществляется при взрыве водородной (термоядерной) бомбы, зарядом которой является дейтерид лития LiD ④. В качестве запала используется атомная бомба. После ее взрыва поток нейтронов вызывает образование трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{6}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{1}\mathrm{H}\,. \qquad (2) $$

Наличие дейтерия и трития при высокой температуре инициирует термоядерную реакцию (1), обеспечивающую выделение энергии при взрыве водородной бомбы ⑤.

Радиоактивное излучение (включающее гамма- и рентгеновское излучение, электроны, протоны, α-частицы, ионы тяжелых элементов) называют также ***ионизирующим излучением***, так как, проходя через живую ткань, оно вызывает ионизацию атомов ⑥. В любой точке пространства существует ионизирующее излучение, или ***естественный радиационный фон***. Наибольший вклад в естественный радиационный фон вносит радиоактивный радон и продукты его распада. Вклад ***искусственных источников радиации*** (реакторы, ускорители, рентгеновские установки) в естественный радиационный фон — около 18%.

Доза поглощенного излучения — отношение энергии излучения $E_{изл}$, поглощенной облучаемым телом, к его массе m: $D = E_{изл}/m$ ⑦.

Единица D — ***грэй*** (1 Гр = 1 Дж/кг).

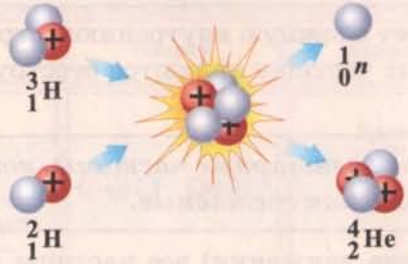
Эквивалентная доза поглощенного излучения H — произведение дозы поглощенного излучения на коэффициент качества k: $H = Dk$.

Коэффициент качества характеризует различие биологического действия различных видов излучения. Единица эквивалентной дозы поглощенного излучения — ***зиверт*** (1 Зв).

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Термоядерный синтез

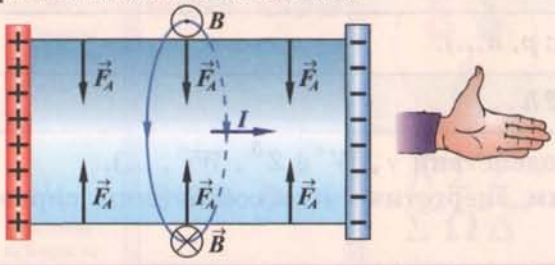
①



$$^2_1H + {}^3_1H \longrightarrow {}^4_2H + {}^1_0n$$

Удержание плазмы магнитным полем

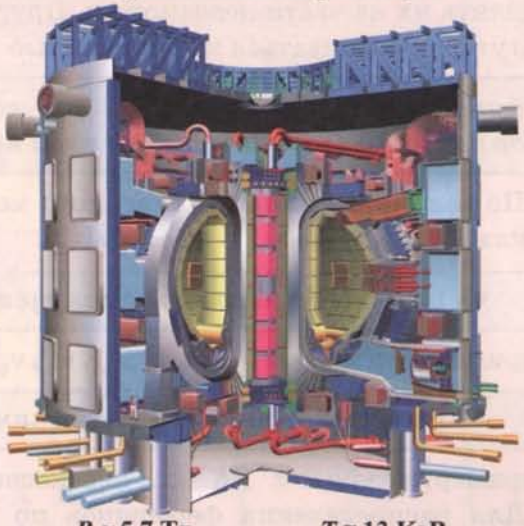
②



УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

③ **ТОКАМАК ITER**

Международный термоядерный экспериментальный реактор



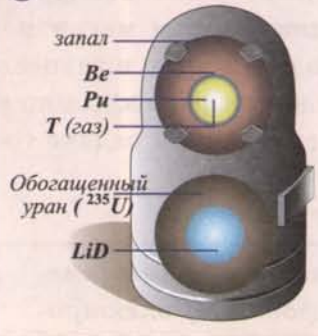
$B \approx 5{,}7$ Тл $\quad T \approx 13$ КэВ

$I \approx 21$ МА $\quad P \approx 1{,}5$ ГВт

ВОДОРОДНАЯ БОМБА

Конструкция бомбы

④



Термоядерная боеголовка

ИСПЫТАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

⑤

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

⑥ ***Вклад источников ионизирующего излучения в радиационный фон***

⑦ ***Доза поглощенного излучения***

$$D = \frac{E_{изл}}{m}$$

$E_{изл}$ – энергия излучения, поглощенная телом массой m

Единица – 1 Грей

Коэффициент качества ионизирующего излучения k

Ионизирующее излучение	Рентгеновское излучение, γ-излучение	e^-	n		p	α
			медленные	быстрые		
k	1	1–1,5	3–5	10	10	20

Эквивалентная доза поглощенного излучения

$$H = D \cdot k$$

Единица - 1 Зиверт

§74. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Элементарная частица — микрообъект, который невозможно расщепить на составные части.

Ряд элементарных частиц (например, нуклоны) имеет сложную внутреннюю структуру, но разделить их на части невозможно. Другие элементарные частицы являются бесструктурными и могут рассматриваться как первичные

фундаментальные частицы — бесструктурные элементарные частицы, которые до настоящего момента времени не удалось описать как составные.

По величине спина (собственного момента количества движения) все частицы делятся на два класса: ***фермионы*** ① и ***бозоны*** ②.

Фермионы — частицы с полуцелым спином: $\hbar/2$, $3\hbar/2$, ...

(например, лептоны: e^-, μ^-, τ^-, ν_e, ν_μ, ν_τ, барионы: p, n...).

Бозоны — частицы с целым спином: 0, $\hbar$, $2\hbar$, ...

(например, мезоны: π^+, K^-,..., переносчики взаимодействий γ, W^+, Z^0, W^-, ...).

Для распределения фермионов по возможным энергетическим состояниям справедлив ***принцип Паули***:

в одном и том же энергетическом состоянии могут находиться не более двух фермионов с противоположными спинами ③.

Античастица $\tilde{a}$ (элементарной частицы a) — элементарная частица, имеющая равную (по отношению к a) массу покоя, одинаковый спин, время жизни и противоположный заряд ④. Позитрон e^+ (от лат. positivus — положительный) — античастица электрона — был обнаружен в 1932 г. американским физиком ***Карлом Андерсоном*** ⑤. В перпендикулярном магнитном поле частица двигалась по окружности. Ее направление движения было неизвестно и зависело от знака заряда. Для определения направления движения частицы Андерсон разместил на ее пути свинцовую пластинку, тормозившую частицу. После прохождения пластинки радиус трека уменьшился. Это означало, что заряд частицы положительный.

При столкновении частицы и античастицы они исчезают (аннигилируют).

Аннигиляция — процесс взаимодействия элементарной частицы с ее античастицей, в результате которого они превращаются в γ-кванты (фотоны) электромагнитного поля или другие частицы.

При столкновении электрона и позитрона обе частицы исчезают, а рождаются два γ-кванта (фотона):

$$e^- + e^+ \to \gamma + \gamma.$$

Минимальная энергия излучения $E_{\text{изл}} = 2m_e c^2 = 1{,}02$ МэВ.

Рождение пары — процесс, обратный аннигиляции ⑥.

Электрон-позитронная пара может возникнуть, например, при взаимодействии γ-кванта с веществом. Электрически нейтральные кванты превращаются в частицы, общий заряд которых равен нулю:

$$\gamma + \gamma \to e^- + e^+.$$

Для рождения пары требуется минимальная энергия, равная сумме энергий покоя частиц $2m_e c^2 = 1{,}02$ МэВ. После рождения электрон-позитронной пары, попадающей в магнитное поле, сила Лоренца действует на разноименно заряженные частицы в противоположные стороны, чем и объясняется их закручивание в разных направлениях.

① ФЕРМИОНЫ (S = 1/2, 3/2, ...)

Фундаментальные частицы

Лептоны

Электрон e^- — ν_e *электронное нейтрино*

Мюон μ^- — ν_μ *мюонное нейтрино*

Таон τ^- — ν_τ *таонное нейтрино*

Кварки

u d

c s

t b

Элементарные частицы (Адроны)

Барионы

Протон ($u\,u\,d$)

Нейтрон ($u\,d\,d$)

$\Lambda^0\ \Sigma^+\Sigma^0$
$\Sigma^-\ \Omega^-\Delta^{++}$
.....

Мезоны

π^+ ($u\,\bar{d}$)

K^- ($u\,\bar{s}$)

$\pi^0\pi^-\ K^+$
$\eta^0\ K^0$....

② БОЗОНЫ (S = 0,1 , ...)

Переносчики взаимодействий

Сильное

Глюоны

Электромагнитное

Фотон γ

Слабое

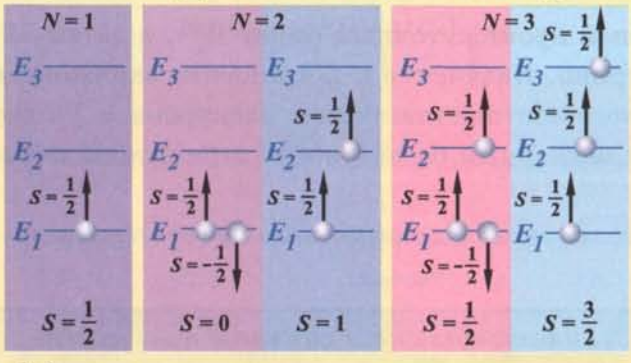
Промежуточные бозоны W^+ Z^0 W^-

Гравитационное

Гравитон

③ ПРИНЦИП ПАУЛИ

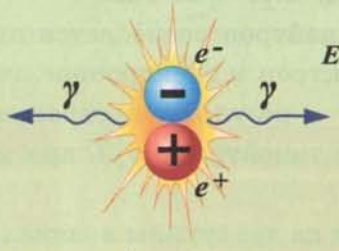
Распределение фермионов по энергетическим уровням



В одном и том же энергетическом состоянии могут находиться не более двух фермионов с противоположными спинами

④ АНТИЧАСТИЦЫ

Аннигиляция электрон-позитронной пары



$E_{изл}$ – *энергия излучения*

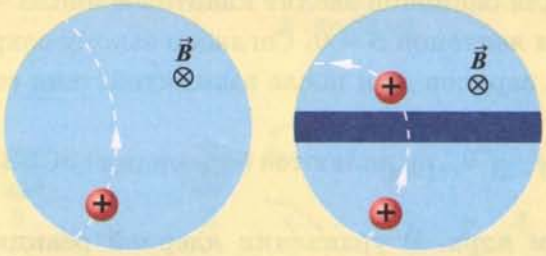
$$e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma$$

$$E_{изл} = 2m_e c^2 = 2 \cdot (9{,}1 \cdot 10^{-31})(3 \cdot 10^8)^2 =$$

$$= 1{,}64 \cdot 10^{-13}\ Дж = 1{,}02\ МэВ$$

⑤ ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА e^+

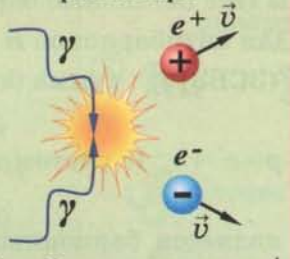
Трек позитрона в камере Вильсона в магнитном поле $\vec{B}$



без свинцовой пластинки *со свинцовой пластинкой*

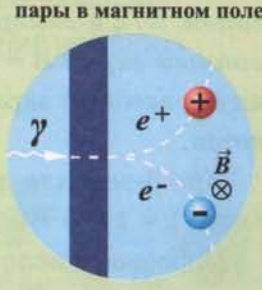
⑥ РОЖДЕНИЕ ПАРЫ

Рождение электрон-позитронной пары



$$\gamma + \gamma \longrightarrow e^- + e^+$$

Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле



§75. ЛЕПТОНЫ И АДРОНЫ

По отношению к сильному взаимодействию все элементарные частицы делятся на две большие группы: ***адроны*** (от греч. hadros — большой, сильный) и ***лептоны*** (от греч. leptos — легкий).

Адроны — элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

Лептоны — фундаментальные частицы, не участвующие в сильном взаимодействии ①.

К лептонам относят 12 частиц (6 частиц и 6 античастиц).

Все лептоны — фермионы — обладают полуцелыми спинами $\hbar/2$. Для лептонов вводят квантовое число — ***лептонный заряд*** $L = 1$, для антилептонов $L = -1$, для адронов $L = 0$. Согласно закону сохранения лептонного заряда (ЗСЛЗ) ②: сумма лептонных зарядов до и после взаимодействия сохраняется. Поэтому в реакциях слабого взаимодействия лептонов участвуют лептон-нейтринные дуплеты.

Для реакции β-распада $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$ ЗСЛЗ имеет вид: $0 = 0 + 1 - 1$,

Для реакции распада мюона $\mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$ ЗСЛЗ: $1 = 1 - 1 + 1$,

Для реакции распада таона $\tau^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$ ЗСЛЗ: $1 = 1 - 1 + 1$.

Слабое взаимодействие лептонов происходит посредством обмена виртуальными частицами — ***переносчиками взаимодействия*** ③. Их массу m_0 можно условно оценить с помощью правила квантования орбит Бора, полагая $v = c$: $m_0 R_{сл} c \approx \hbar$, где радиус слабого взаимодействия $R_{сл} \approx 10^{-18}$ м. Массы промежуточных векторных бозонов W^+, W^-, Z^0 соответствуют энергиям $m_W c^2 = 81 = 81$ ГэВ и $m_Z c^2 = 91$ ГэВ.

При β-распаде нейтрон распадается на протон и промежуточный бозон W^-, а затем W^- распадается на электрон и электронное антинейтрино. Излучение и поглощение заряженных векторных бозонов — результат превращения одного лептона (например, электрона e^-) в другой (электронное антинейтрино $\tilde{\nu}_e$), при котором векторный бозон уносит отрицательный заряд.

Адроны делятся на две группы в зависимости от значения их спина: ***мезоны*** (от греч. meso — средний) и ***барионы*** (от греч. barys — тяжелый) ④.

Мезоны — бозоны со спином, равным 0, $\hbar$, участвующие в сильном взаимодействии.

Барионы — фермионы со спином, равным $\hbar/2$, $3\hbar/2$, участвующие в сильном взаимодействии ⑤.

В свою очередь в группе барионов выделяют подгруппы: ***нуклоны*** (протоны, нейтроны) со спином $\hbar/2$ и ***гипероны*** (все остальные барионы). Для барионов вводят квантовое число — ***барионный заряд*** $B = 1$, для антибарионов $B = -1$, для лептонов $B = 0$. Согласно закону сохранения барионного заряда (ЗСБЗ) ⑥: сумма барионных зарядов до и после взаимодействия сохраняется.

При β-распаде $n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$ (с учетом того, что e^- и $\tilde{\nu}_e$ не являются барионами) ЗСБЗ имеет вид: $1 = 1 + 0 + 0$.

Массовое число A является барионным зарядом ядра. В уравнении ядерной реакции ⑦ сумма верхних индексов (барионный заряд) должна быть одинакова в обеих частях уравнения.

① ЛЕПТОНЫ

Дуплет	Название	Символ: частица	Символ: античастица	Масса: в m_e	Масса: МэВ	L	Время жизни, с
I	*Электрон*	e^-	e^+	1	0,511	±1	*Стабилен*
	Электронное нейтрино	ν_e	$\tilde{\nu}_e$	0	0(< 1,4 · 10^{-5})	±1	*Стабильно*
II	*Мюон*	μ^-	μ^+	207	105,66	±1	2,2 · 10^{-6}
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\tilde{\nu}_\mu$	0	0(< 0,25)	±1	*Стабильно*
III	*Таон*	τ^-	τ^+	3492	1784	±1	10^{-13}
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0(< 35)	±1	*Стабильно*

② ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЛЕПТОННОГО ЗАРЯДА

β^- - РАСПАД

$$n \longrightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$$
$$(L=0) \quad (L=0)\ (L=1)\ (L=-1)$$
$$0 = 0 + 1 - 1$$

РАСПАД МЮОНА

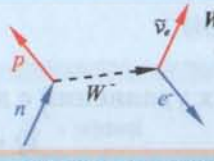
$$\mu^- \longrightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$
$$(L=1) \quad (L=1)\ (L=-1)\ (L=1)$$
$$1 = 1 - 1 + 1$$

РАСПАД ТАОНА

$$\tau^- \longrightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$$
$$(L=1) \quad (L=1)\ (L=-1)\ (L=1)$$
$$1 = 1 - 1 + 1$$

③ СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕПТОНОВ

ДИАГРАММА ФЕЙНМАНА

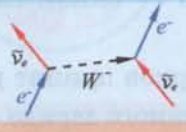


W^- – частица - переносчик слабого взаимодействия при β^- - распаде

МАССА ЧАСТИЦЫ - ПЕРЕНОСЧИКА

$$m_0 = \frac{\hbar}{R_{сл}\, c} = \frac{1{,}05 \cdot 10^{-34}}{10^{-18} \cdot 3 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^{-25}\ кг$$
$$m_0 c^2 \approx 200\ ГэВ$$

ВЗАИМОПРЕВРАЩЕНИЕ e^- И $\tilde{\nu}_e$



$m_W \approx 81\ ГэВ$

$m_Z \approx 91\ ГэВ$

АДРОНЫ

④ Барионы $B = 1$ ($S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$)

Название	Символ	Масса (МэВ)	Время жизни, с
Протон	p	938,3	*Стабилен*
Нейтрон	n	939,6	898
Лямбда-гиперон	Λ^0	1116	2,6 · 10^{-10}
Сигма + - гиперон	Σ^+	1189	0,5 · 10^{-10}
Дельта плюс плюс	Δ^{++}	1232	10^{-23}
Омега минус	Ω^-	1672	0,8 · 10^{-10}

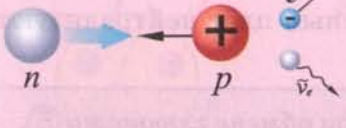
⑤ Мезоны $B = 0$ ($S = 0, 1$)

Название	Символ	Масса (МэВ)	Время жизни, с
Пи - ноль	π^0	135	0,87 · 10^{-16}
Пи - плюс	π^+	139,6	2,6 · 10^{-8}
Пи - минус	π^-	139,6	2,6 · 10^{-8}
Ка - плюс	K^+	493,7	1,24 · 10^{-8}
Ка - минус	K^-	493,7	1,24 · 10^{-8}
Эта - ноль	η^0	548,8	≈10^{-18}

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ БАРИОННОГО ЗАРЯДА

β^- - РАСПАД

⑥



$$n \longrightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$$
$$(B=1) \quad (B=1)\ (B=0)\ (B=0)$$
$$1 = 1 + 0 + 0$$

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

ОБРАЗОВАНИЕ НЕЙТРОНА

⑦ $^4_2\mathrm{He} + {}^9_4\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_6\mathrm{C} + {}^1_0n$

§76. КВАРКИ

Достаточно большие (в среднем) массы адронов по сравнению с массами лептонов позволили в 1963 г. американским физикам-теоретикам ***Мюррею Гелльману*** и ***Джорджу Цвейгу*** предположить, что адроны являются составными частицами. Изучение в 1969 г. рассеяния электронов на нейтронах и протонах подтвердило наличие трех заряженных частиц — ***кварков***. Каковы их основные характеристики?

Если предположить, что все кварки имеют одинаковый спин, то он обязательно должен быть полуцелым. Только при сложении трех полуцелых спинов кварков можно получить полуцелый спин нуклона.

Электрический заряд кварков может быть как положительным Q, так и отрицательным q. Если нейтрон состоит из одного кварка с зарядом Q и двух кварков с зарядом q, то протон будет иметь противоположный состав: два кварка с зарядом Q и один с зарядом q. Тогда заряд нейтрона и протона можно представить в виде:

$$0 = Q + 2q,$$
$$e = 2Q + q.$$

Решение системы двух уравнений с двумя неизвестными дает величины зарядов кварков:

$$Q = +\tfrac{2}{3}e,\ q = -\tfrac{1}{3}e.$$

Характерной особенностью кварков, не встречающейся у других частиц, является дробный электрический заряд ①.

Кварк с зарядом $+\frac{2}{3}e$ назвали u-кварком (от англ. up — вверх), а кварк с зарядом $-\frac{1}{3}e$ — d-кварком (от англ. down — вниз). Кварковый состав протона можно представить как (uud), а нейтрона — (udd).

Барионный заряд кварков принят равным $\frac{1}{3}$, что дает для барионов (протонов и нейтронов) $B = 1$ ②. Сохранение барионного заряда объясняет невозможность распада протона на более мелкие частицы. Для антикварков $\tilde{u}$ и $\tilde{d}$ электрические и барионные заряды имеют противоположные знаки. Вслед за u- и d-кварками были открыты еще четыре типа кварков: c (от англ. charmed — очарованный), s (от англ. strange — странный), t (от англ. truth — правда) и b (от англ. beauty — красота). Различные типы кварков называют ***ароматом***. Все кварки — фермионы.

Согласно кварковой модели Δ^{++}-барион состоит из трех одинаковых u-кварков, являющихся фермионами, что противоречит принципу Паули. Была выдвинута гипотеза, что эти u-кварки не одинаковы, а отличаются ***цветом***. Конкретный u-кварк несет один из трех цветовых зарядов: красный $u_к$, зеленый $u_з$ или синий $u_с$. Тогда состав бариона можно представить в виде ($u_к$, $u_з$, $u_с$). ***Антикварки*** имеют антицвет, как бы нейтрализующий цвет: антикрасный (фиолетовый), антизеленый (малиновый), антисиний (желтый).

Цветовой заряд является характеристикой взаимодействия кварков, но не адронов в целом. Все адроны цветонейтральны.

Мезоны имеют целый спин, т.е. состоят из кварка и антикварка ③.

Поглощение или излучение глюона (от англ. glue — клей), несущего цетовой заряд, изменяет цвет кварка, но не его аромат ④. При поглощении зеленым кварком $u_з$ глюона $g_{к\tilde{з}}$ (переносящего красно-антизеленый цветовой заряд) зеленый и антизеленый цвет нейтрализуются, а цвет кварка становится красным — $u_к$.

Сильное взаимодействие между кварками осуществляется при обмене глюонами ⑤.

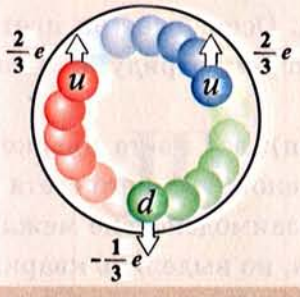
① КВАРК (АРОМАТ)	Электрический заряд q	Барионное число B
u	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$
d	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$
c	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$
s	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$
t	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$
b	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$

АНТИКВАРК (АРОМАТ)	Электрический заряд q	Барионное число B
$\tilde{u}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$
$\tilde{d}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$
$\tilde{c}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$
$\tilde{s}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$
$\tilde{t}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$
$\tilde{b}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$

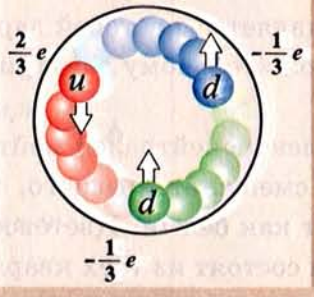
КВАРКОВАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ

② БАРИОНЫ

Протон

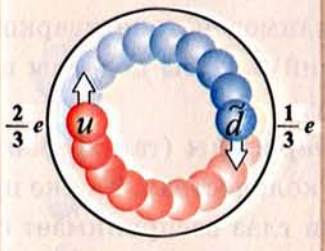


Нейтрон

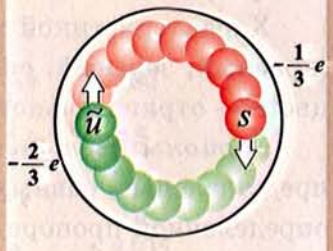


③ МЕЗОНЫ

π^+ - мезон

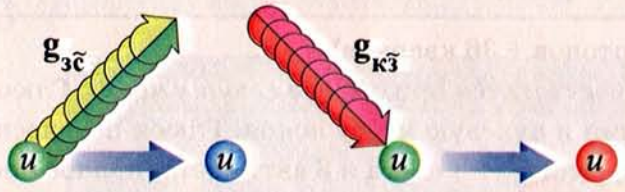


K^- - мезон



ГЛЮОН – ПЕРЕНОСЧИК СИЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

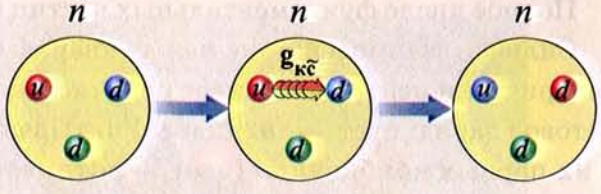
④ Изменение цвета кварка



Излучение глюона *Поглощение глюона*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КВАРКОВ В НЕЙТРОНЕ

⑤ Обмен глюоном между кварками



Изменение аромата кварка при β⁻- распаде

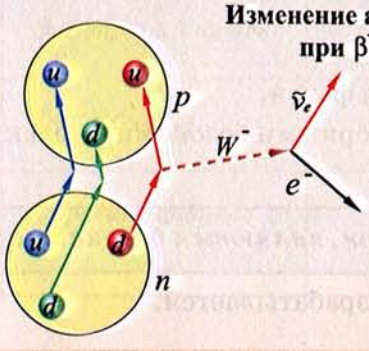
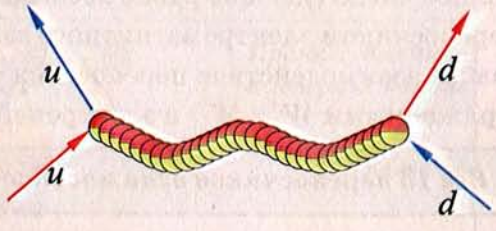


Диаграмма Фейнмана для взаимодействия кварков



§77. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Общая закономерность в систематике элементарных частиц заключается в том, что

все фундаментальные частицы являются фермионами, а все переносчики взаимодействия бозонами.

В настоящее время фундаментальными частицами считают кварки и лептоны, образующие начальный структурный уровень организации материи. Учитывая, что известно 6 ароматов кварков и 6 лептонов, можно говорить о кварк-лептонной симметрии мира.

Полное число лептонов (6 лептонов + 6 антилептонов) = 12.

Соответствующие пары кварков и лептонов образуют три поколения фундаментальных частиц ①. Все стабильные структуры окружающего нас сравнительно низкотемпературного мира состоят из фундаментальных частиц первого поколения: двух стабильных лептонов (электрона и электронного нейтрино) и двух кварков (u и d). При более высоких температурах и больших энергиях существуют второе и третье поколения нестабильных частиц, которые рождались на ранних этапах возникновения горячей Вселенной. В настоящее время такие частицы возникают в результате сильных и слабых взаимодействий в мощных ускорителях заряженных частиц.

Характеристикой взаимодействия кварков является цветовой заряд. Основные три цвета (красный, зеленый, синий) как бы подобны положительному электрическому заряду, а антицвета — отрицательному.

Барионы цветонейтральны (так же как электронейтрален нейтрон): все цвета кварков представлены в равных количествах. Также при смешении красного, зеленого и синего света в определенной пропорции глаз воспринимает свет как белый. Цветовое взаимодействие между барионами не наблюдается. Протоны и нейтроны состоят из трех кварков, но выделить кварки нельзя. Отдельный кварк имеет цвет и поэтому не может существовать в свободном состоянии. Мезоны, как и все адроны, цветонейтральны и состоят из кварка и антикварка с противоположными цветовыми зарядами.

Полное число кварков (6 кварков + 6 антикварков) × 3 цвета = 36.

Полное число фундаментальных частиц (12 лептонов + 36 кварков) = 48.

Сильное взаимодействие между кварками осуществляется при обмене ***глюонами*** ②. Глюон электрически нейтрален, имеет целочисленный спин и нулевую массу покоя. Глюон переносит цветовой заряд: цвет — антицвет. Учитывая, что существует 3 цвета и 3 антицвета, полное число их парных комбинаций (цвет — антицвет) (3 цвета × 3 антицвета) = 9. Однако комбинации: красный — антикрасный, зеленый — антизеленый, синий — антисиний — бесцветны. Поэтому цветовой заряд несут лишь 6 глюонов. Как следует из теории, называемой квантовой хромодинамикой (от греч. chroma — цвет), бесцветных глюонов — 2.

Полное число глюонов равно восьми.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия является фотон.

Слабое взаимодействие переносится промежуточными векторными бозонами — электрически заряженными W^+, W^- и электронейтральными Z^0.

Все 13 переносчиков взаимодействия, включая гравитон, являются бозонами.

Теория элементарных частиц в настоящее время активно разрабатывается.

ТРИ ПОКОЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ – ФЕРМИОНОВ (ВСЕГО – 48)

①

Поколение	Частица		Цвет	q	m, ГэВ
I	*Кварк*	u		$\frac{2}{3}e$	0,330
		d		$-\frac{1}{3}e$	0,333
	Лептон	e^-		$-e$	$5{,}11 \times 10^{-4}$
		ν_e		0	$< 1{,}4 \times 10^{-8}$
II	*Кварк*	c		$\frac{2}{3}e$	1,65
		s		$-\frac{1}{3}e$	0,486
	Лептон	μ^-		$-e$	0,106
		ν_μ		0	$< 2{,}5 \times 10^{-4}$
III	*Кварк*	t		$\frac{2}{3}e$	> 80
		b		$-\frac{1}{3}e$	4,5
	Лептон	τ^-		$-e$	1,78
		ν_τ		0	< 0,035

ПЕРЕНОСЧИКИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ – БОЗОНЫ (ВСЕГО – 13)

②

Взаимодействие	Переносчики взаимодействий
Сильное	*антицвет* з̄ с̄ к̄ с̄ к̄ з̄ *цвет* к к з з с с — *Глюоны*
Электромагнитное	γ — *Фотон*
Слабое	W^+ Z^0 W^- — *Промежуточные векторные бозоны*
Гравитационное	$S = 2$ — *Гравитон*

§78. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Астрономические объекты распределены в пространстве неравномерно. Их скопление в пределах определенного расстояния друг от друга характеризует ту или иную астрономическую структуру.

Астрофизика — раздел астрономии, изучающий физические свойства астрономических объектов.

Удобной масштабной единицей, используемой в астрофизике, является средний размер планетной системы (10^{16} м) и одновременно ***световой год*** — расстояние, проходимое световым лучом за один год (1 св.г. $= c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ м $\approx 10^{16}$ м).

В таблице приведены средние размеры основных астрономических структур в порядке возрастания их размера.

Средний размер астрономических структур

Астрономическая структура	Планетная система	Ближайшие звезды	Звездное скопление	Галактика	Скопление галактик	Сверхскопления галактик	Наблюдаемая Вселенная
Средний масштаб (св. лет)	1	10	100	100 000	10 млн	100 млн	14 млрд

На рисунках показано взаимное пространственное (3-D) расположение некоторых астрономических структур во Вселенной по мере удаления от Солнца.

На рисунке ① (см. также стр. 184) показано пространственное расположение 22 ближайших к Солнечной системе звезд. Звезды, расположенные не далее 250 св. лет от Солнца, изображены на рисунке ② (см. также стр. 184).

Солнечная система, находясь в рукаве Ориона на расстоянии $r = 28\,000$ св. лет от центра нашей Галактики — Млечный путь, совершает один оборот вокруг него за период $T = 230$ млн лет ③ (см. также стр. 185). По этим данным можно оценить массу M_G Галактики, примерное число N звезд в ней. Второй закон Ньютона для Солнца массой $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ кг имеет вид:

$$M_\odot = \frac{4\pi^2}{T^2} r = G \frac{M_O M_G}{r^2}.$$

Следовательно,

$$M_G = 4\pi^2 \frac{r^3}{GT^2} = 2 \cdot 10^{41} \text{ кг}.$$

Тогда примерное число звезд с массой Солнца в Галактике оказывается порядка

$$N = \frac{M_G}{M_\odot} = 10^{11}.$$

Местная группа галактик, включающая Млечный Путь, насчитывает около сорока ближайших галактик ④ (см. также стр. 185). Внутри местной группы Млечный Путь движется в сторону туманности Андромеды со скоростью 50 км/с.

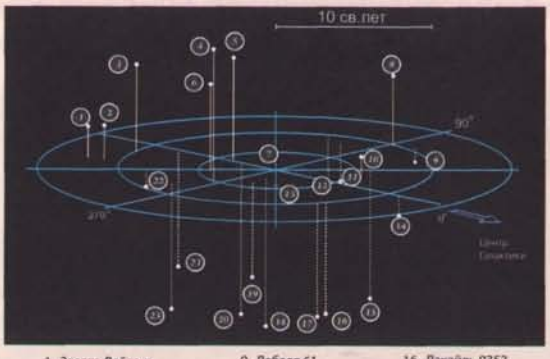
Местная группа входит в состав сверхскопления Девы ⑤ (см. также стр. 185), перемещающегося в направлении ближайшего сверхскопления со скоростью 400 км/с.

Сверхскопления галактик, наиболее отдаленные от сверхскопления Девы, наблюдаются на расстоянии около 14 млрд световых лет ⑥ (см. также стр. 186).

10 св. лет — БЛИЖАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ

ЗВЕЗДЫ, БЛИЖАЙШИЕ К СОЛНЦУ

①

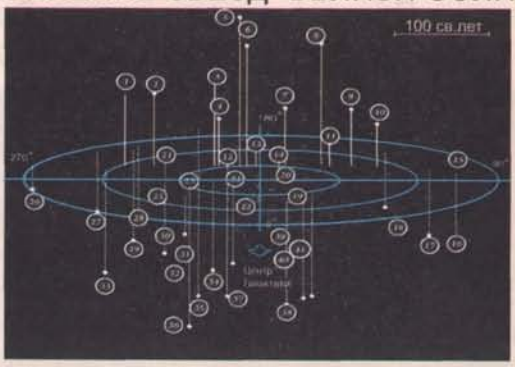


1. Звезда Лейтена
2. Процион
3. G51 -15
4. Росса 128
5. Лаланд 21185
6. Вольф 359
7. Солнце
8. Струве 2398
9. Лебедя 61
10. Звезда Барнарда
11. Росса 248
12. Грумбридж 34
13. Проксима (α Центавра)
14. Росса 154
15. L789-6
16. Лакайль 9352
17. ε Индейца
18. L725-32
19. L726-8
20. τ Кита
21. ε Эридан
22. Сириус
23. L372-58

100 св. лет — ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ

СКОПЛЕНИЕ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ СОЛНЦА

②

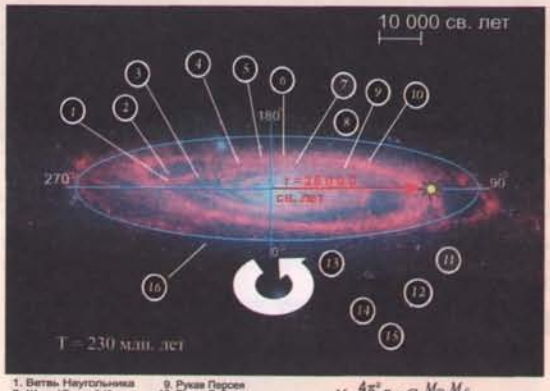


1. α Гидры
2. γ Ворона
3. γ Льва
4. μ Близнецов
5. μ Большой Медведицы
6. α Рыси
7. β, γ, δ, ε, ζ, η, α Большой Медведицы
8. ε Волопаса
9. ε Малой Медведицы
10. γ Дракона
11. η Возничего
12. Солнце
13. Арктур
14. Капелла
15. α Кассиопеи
16. η Пегаса
17. β Пегаса
18. β Андромеды
19. Скопление Гиады
20. Вега
21. Альдебаран
22. ε Стрельца
23. γ Ориона
24. γ Центавра
25. β Кили
26. N Паруса
27. τ Кормы
28. γ Треугольника
29. ε Зайца
30. α Жертвенника
31. γ Эридана
32. Ахернар
33. γ Южной гидры
34. α Павлина
35. α Тукана
36. γ Феникса
37. β Журавля
38. γ Журавля
39. φ Стрельца
40. σ Стрельца
41. α Кита

100000 св. лет — ГАЛАКТИКА

МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

③



1. Ветвь Наугольника
2. Щит–Южный Крест
3. M 68
4. Рукав Стрельца
5. Рукав Ориона
6. M 5
7. Солнце
8. M13
9. Рукав Персея
10. Рукав Лебедя
11. M 15
12. M 2
13. M 30
14. Карликовая Галактика Стрельца
15. M 75
16. Шаровое скопление

$$M_{\odot}\frac{4\pi^2}{T^2}r = G\frac{M_{\odot}M_{\odot}}{r^2}$$

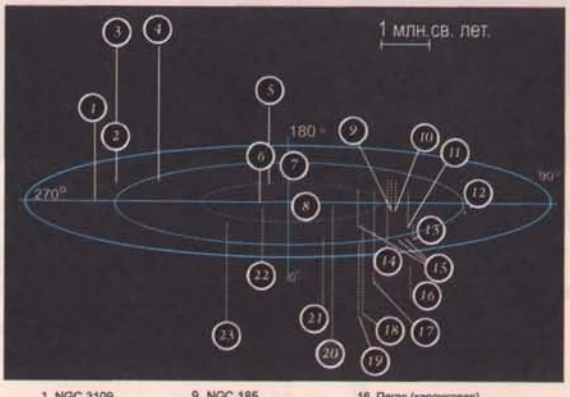
$$M_{\odot} = 2\cdot 10^{41}\text{ кг}$$

$$N = \frac{M_{\odot}}{M_{\odot}} = 10^{11}$$ число звезд в Галактике

10 млн. св. лет — СКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК

МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК

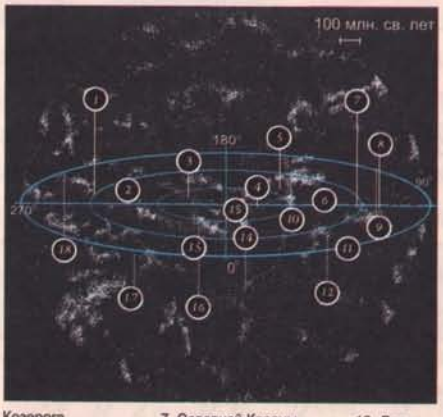
④



1. NGC 3109
2. Насос (карликовая)
3. Секстант А
4. Секстант В
5. А Льва
6. I Льва
7. II Льва
8. Млечный Путь
9. NGC 185
10. NGC 147
11. NGC 205
12. IC 10
13. Галактика Андромеды
14. Галактика Треугольника
15. I, II и III Андромеды
16. Пегас (карликовая)
17. LGS 3
18. Водолей (карликовая)
19. Стрелец (карликовая неправильная)
20. WLM
21. Кит (карликовая)
22. Феникс (карликовая)
23. Тукан (карликовая)

100 млн. св. лет — СВЕРХСКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

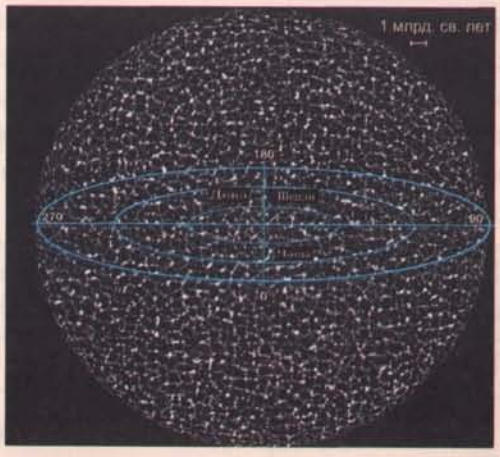
⑤



1. Козерога
2. Скульптора
3. Павлина—Индуса
4. Центавра
5. Геркулеса
6. Шепли
7. Северной Короны
8. Волопаса
9. Большой Медведицы
10. Волосы
11. Льва
12. Секстанта
13. Девы
14. Гидры
15. Персея—Рыб
16. Голубя
17. Часов
18. Рыб—Кита

14 млрд. св. лет — НАБЛЮДАЕМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

⑥



На больших расстояниях Вселенная однородна и изотропна

§79. ЗАКОН ХАББЛА

Астрофизические исследования спектров излучения и поглощения астрономических объектов позволили выяснить их химический состав, плотность, температуру, скорость движения.

В 1929 году американский астроном ***Эдвин Хаббл***, изучая с помощью телескопа диаметром 2,5м характер и скорость движения 18 галактик, получил неожиданный результат.

Галактики разбегаются от Земли и скорость v этого убегания пропорциональна расстоянию r до них ①. $v = H_0 \cdot r,$ (1)

где $H_0 = 70$ км/с/Мпк — постоянная Хаббла. (В астрономии расстояние часто измеряют в *парсеках* (пк) 1 пк = 3,26 св. г. $= 3{,}09 \cdot 10^{16}$ м).

Закон Хаббла означает, что галактика, находящаяся от Земли на расстоянии 1 Мпк, удаляется от Земли со скоростью 70 км/с. Чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Разбегание галактик, или расширение Вселенной, наблюдается не только с Земли, но и из любой другой точки Вселенной. На рисунке ② показано движение галактик относительно Земли и относительно соседней галактики A. В астрофизике скорость движения источника света измеряется с помощью ***эффекта Доплера*** ③. При этом длина волны λ_0 спектральной линии излучения неподвижного атома сравнивается с длиной волны λ, воспринимаемой наблюдателем, рассчитываемой по формуле:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + v/c) \quad (\text{при } v << c) \qquad (2)$$

Таким образом длина волны λ оказывается больше длины волны, излучаемой источником, на величину

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 v / c \qquad (3)$$

Возникает сдвиг спектра излучения в сторону больших длин волн (в красную область) — ***«красное смещение»***. Красное смещение спектральных линий возрастает при увеличении скорости движения источника излучения. Как видно из формулы (3) при $v/c << 1$ красное смещение пропорционально скорости источника относительно приемника.

Таким образом скорость галактики находится из формулы (3):

$$v = c \cdot \Delta\lambda / \lambda \qquad (4)$$

В данный момент времени Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях для наблюдателей во всех галактиках. Это означает, что

на больших масштабах (порядка 1 млрд световых лет) Вселенная однородна и изотропна.

Вселенная однородна, если в произвольных одинаковых объемах содержится равное число галактик. Вселенная изотропна, если в разных направлениях находится одинаковое число галактик.

Если закон Хаббла, т.е. пропорциональность скорости разбегания галактик расстоянию до них, выполняется при наблюдении с Земли, то он также выполняется и при наблюдении из произвольной Галактики ④. Можно сказать, что закон Хаббла является следствием однородности и изотропности Вселенной.

Закон Хаббла позволяет оценить время разлета самых отдаленных Галактик, или время расширения Вселенной ⑤:

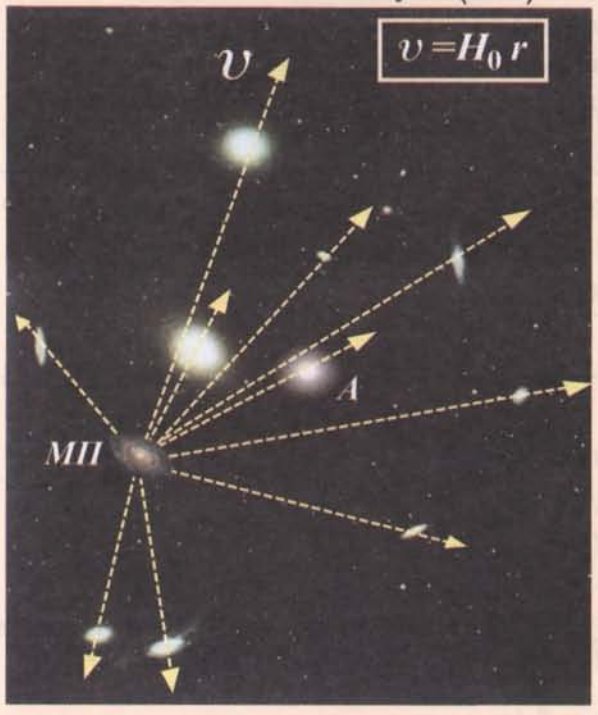
$$t = r/t = 1/H_0 = \frac{1}{70\dfrac{10^3}{10^6 \cdot 3{,}26 \cdot 3 \cdot 10^8}} \approx 14 \text{ млрд лет.}$$

Это время примерно характеризует ***возраст Вселенной***.

РАЗБЕГАНИЕ ГАЛАКТИК

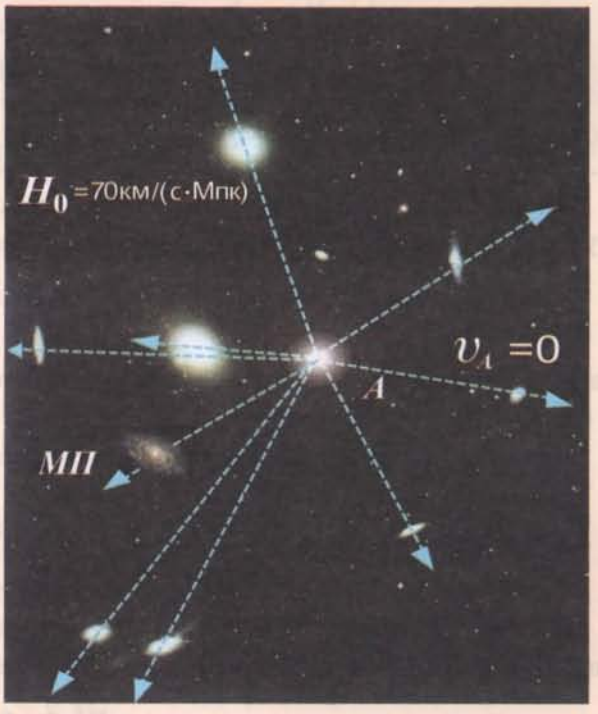
Наблюдение расширения Вселенной из Млечного Пути (МП)

①



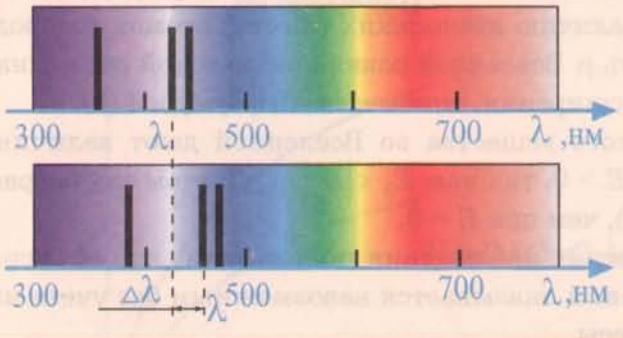
Наблюдение расширения Вселенной из галактики А

②



ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ГАЛАКТИК

③ „Красное смещение" спектральных линий.



Использование эффекта Доплера

При удалении источника света со скоростью υ от наблюдателя

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{\upsilon}{c}\right)$$

Длина волны λ, воспринимаемая наблюдателем, оказывается больше λ_0 – длины волны, излучаемой источником.

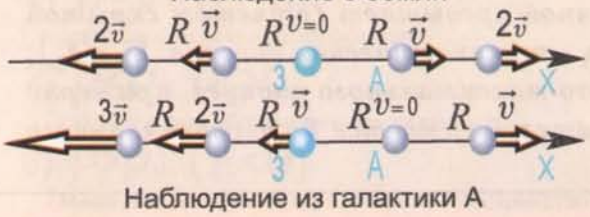
„Красное смещение" $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{\upsilon}{c}$

Скорость галактики находится из формулы: $\upsilon = c\,\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$

СЛЕДСТВИЯ ЗАКОНА ХАББЛА

④ Однородность и изотропность Вселенной

Наблюдение с Земли



Наблюдение из галактики А

⑤ Возраст Вселенной

Время расширения Вселенной

$$t = \frac{r}{\upsilon} = 1/H_0 = \frac{1}{\frac{10^3}{70 \frac{10^6 \cdot 3{,}26 \cdot 3 \cdot 10^8}{10^6 \cdot 3{,}26 \cdot 3 \cdot 10^8}}} = 14 \text{ млрд лет}$$

§80. МОДЕЛЬ ФРИДМАНА

Математическая модель, впервые (до опыта Хаббла) предсказавшая теоретически расширение Вселенной, была предложена в 1922 г. российским ученым ***Александром Александровичем Фридманом***.

В модели Фридмана отдельные галактики представляются как пробные материальные частицы, непрерывно распределенные в пространстве. Вселенная рассматривается как совокупность расширяющихся сферических слоев с центром в т. О, где находится наблюдатель ①.

Энергия внешней оболочки массой m_0, расширяющейся с начальной скоростью υ в поле внутреннего шара массой М и радиусом r, была представлена в виде $E_k + E_p = E$:

$$\frac{m_0\upsilon^2}{2} - G\frac{m_0 M}{r} = E \qquad (1)$$

где E — полная механическая энергия оболочки (нуль отсчета потенциальной энергии принят на бесконечности).

Характер эволюции Вселенной зависит от величины и знака E ②.

1) При $E = 0$ $\qquad \upsilon^2 = 2GM/r \qquad (2)$

Подставим $\upsilon = r'$ в (2): $\qquad (r')^2 = 2GM/r \qquad (3)$

Из (3) следует, что радиус Вселенной возрастает с течением времени ③ (кривая 1).

Для однородной и изотропной Вселенной $\upsilon = H_0 \cdot r$. Учитывая, что масса M Вселенной связана с ее плотностью ρ ($M = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$), и подставляя υ и M в (2), получаем:

$$H_0^2 r^2 = 2G \cdot \rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 / r\,.$$

Тогда $\qquad \rho = \dfrac{3H_0^2}{8\pi G} = \rho_c \qquad (4)$

где ρ_c — ***критическая плотность*** Вселенной. Подстановка значений H_0 и G в формулу (4) дает: $\rho_c \approx 10^{-26}$ кг/м^3. По величине она соответствует наличию нескольких (шести) атомов водорода в одном кубическом метре. Если реальная плотность ρ Вселенной равна критической ρ_c, полная механическая энергия $E = 0$ и реализуется закон расширения, описываемый формулой (3).

2) Многочисленные оценки плотности видимого вещества во Вселенной дают величину $\rho < 0{,}1\rho_c$. Если $\rho < \rho_c$, из формулы (1) следует, что $E > 0$, так как $E_k < |E_p|$ ④. В этом случае расширение Вселенной происходит быстрее (кривая 2), чем при $E = 0$.

3) Тем не менее многочисленные астрономические наблюдения показывают, что объяснение движения отдельных звезд и звездных скоплений оказывается невозможным без учета наличия дополнительной, невидимой, «скрытой» массы.

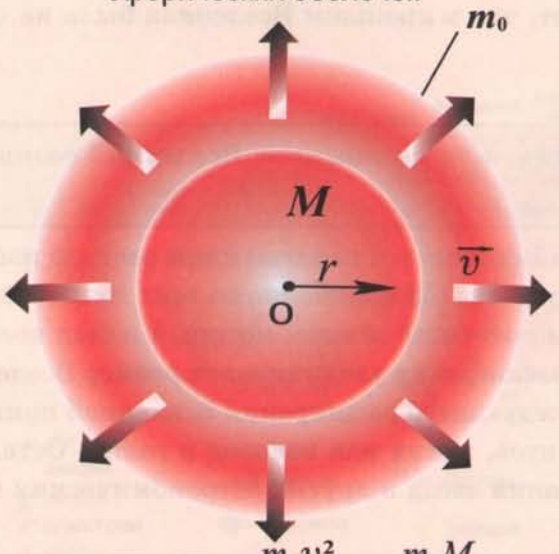
Физическая природа скрытой массы (темного вещества) пока однозначно не выяснена. Существуют предположения о барионных объектах на периферии Вселенной, ненаблюдаемых черных дырах, наличии массы покоя у нейтрино. От величины скрытой массы зависит сценарий дальнейшего развития Вселенной.

Если результирующая плотность ρ Вселенной превышает (с учетом скрытой массы) критическую плотность ρ_c, т. е. $\rho > \rho_c$, то кинетическая энергия $E_k < |E_p|$, а $E < 0$. Вселенная расширяется до некоторого максимального радиуса, примерно вдвое большего, чем наблюдается теперь, а затем сжимается до первоначального состояния (кривая 3).

РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Вселенная как совокупность расширяющихся сферических оболочек

①



$$E=E_к+E_р=\frac{m_0 v^2}{2}-G\frac{m_0 M}{r}$$

Характер расширения Вселенной зависит от величины и знака E

КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

②

При $E=0$

$$v^2=\frac{2GM}{r}$$

Для однородной и изотропной Вселенной $v=H_0 r$ (закон Хаббла)

$$M=\rho_c\cdot\frac{4}{3}\pi r^3$$

Тогда

$$H_0^2 r^2=\frac{2G\,\rho_c\cdot\frac{4}{3}\pi r^3}{r}$$

Критическая плотность Вселенной

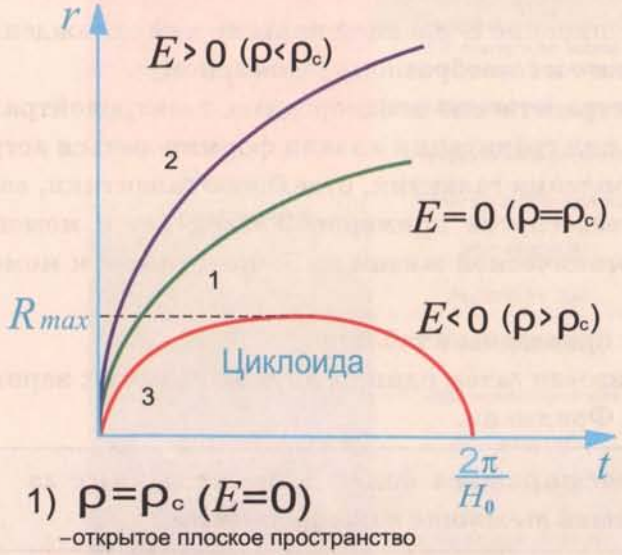
$$\rho_c=\frac{3H_0^2}{8\pi G}\simeq 10^{-26}\ кг/м^3$$

соответствует нескольким атомам водорода в 1 м^3

ЗАВИСИМОСТЬ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ ОТ ЕЕ РЕАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

③

Изменение радиуса Вселенной со временем



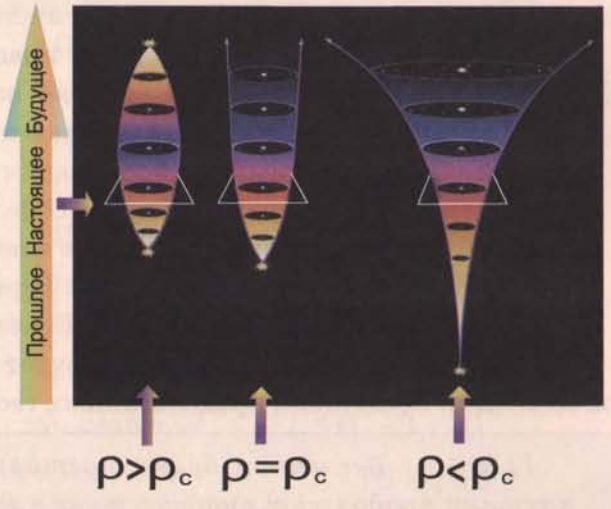
1) $\rho=\rho_c$ ($E=0$)
–открытое плоское пространство

2) $\rho<\rho_c$ ($E>0$)
–открытое гиперболическое пространство

3) $\rho>\rho_c$ ($E<0$)
–замкнутое, конечное, сферическое пространство

④

Варианты эволюции Вселенной



Расширение Вселенной при различных возможных плотностях

§81. ПЕРИОДЫ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

Разлет галактик, подтверждаемый экспериментально законом Хаббла, означает, что в прошлом они были ближе друг к другу, а плотность Вселенной была больше. В то же время расширение приводит к охлаждению. Это означает, что в прошлом Вселенная была не только более плотной, но и более горячей, чем теперь.

В конце 40-х годов XX века

российский физик Георгий Гамов предположил, что расширение Вселенной возникло в результате Большого Взрыва ①.

Согласно приведенным выше оценкам возраста Вселенной и наблюдениям распада изотопов Большой Взрыв произошел около 14 млрд лет тому назад одновременно во всех точках Вселенной. Если Вселенная конечна, Взрыв произошел в точечном объеме, который и был всей Вселенной. Ничего больше не существовало. По мере расширения увеличивался размер Вселенной.

Огромные температуры во время взрыва и последующего расширения Вселенной привели к термоядерному синтезу легких химических элементов, таких как водород и гелий. Остальные элементы были синтезированы в процессе образования звезд и других астрономических структур.

Особенности эволюции объектов во Вселенной являются предметом изучения космологии (от греческого κοσμολογια — изучение мира).

Космология — теоретическая астрофизика мегамасштабов.

Современная космология выделяет несколько характерных периодов эволюции Вселенной. Однако укрупненно принято считать, что таких важнейших периодов было три ②.

I. В период ранней Вселенной (спустя 2–3 минуты от Большого Взрыва) образовались элементарные частицы вещества в плазменном состоянии, из которых практически состоит Вселенная и в настоящее время: протоны, нейтроны, электроны, нейтрино, переносчики взаимодействий, α-частицы.

II. На протяжении следующих 350 тысяч лет расширение Вселенной привело к ее охлаждению и изменению состояния вещества от плазменного к газообразному (атомарному).

III. В течение следующего миллиарда лет из пространственно неоднородных электронейтральных облаков водорода и гелия под действием сил гравитации начали формироваться астрономические структуры: сверхскопления и скопления галактик, отдельные галактики, звезды, планеты. Солнечная система образовалась спустя примерно 9 млрд лет с момента Большого Взрыва. Наиболее ранние следы органической жизни на Земле относят к моменту времени 10 млрд лет от Большого Взрыва.

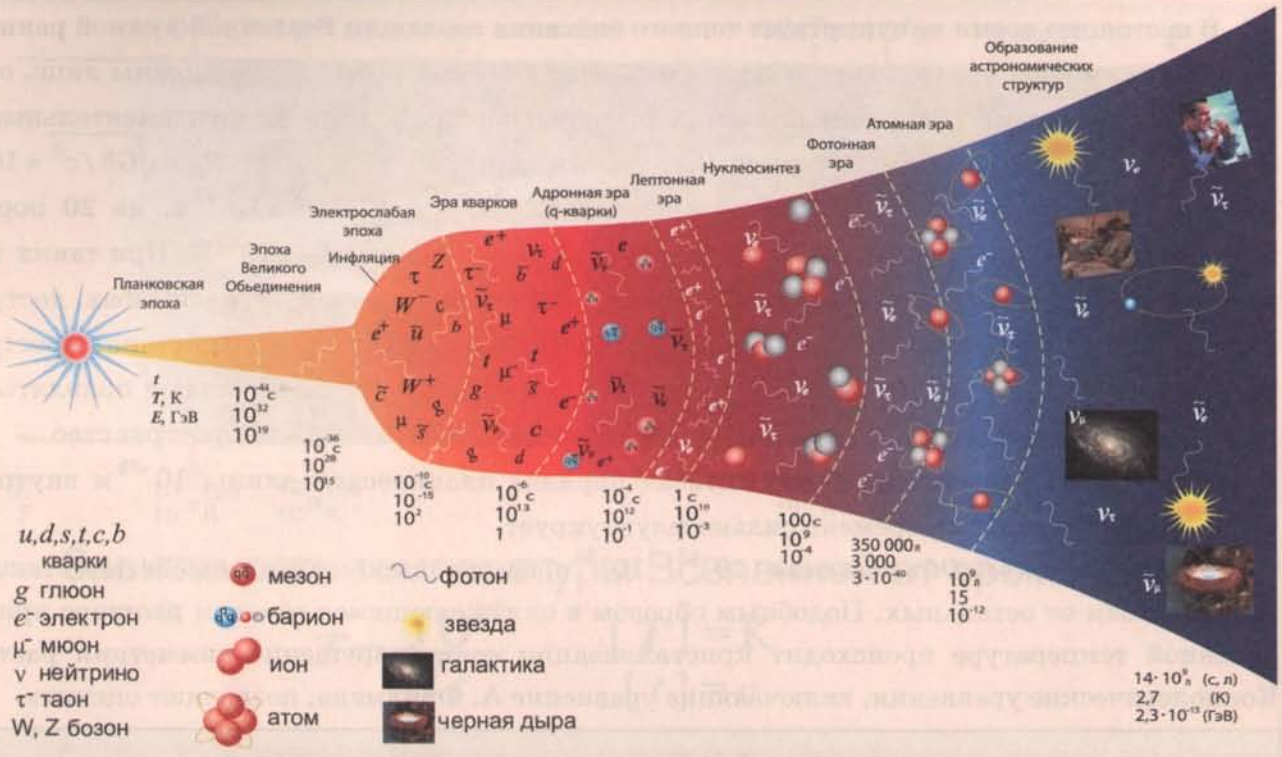
Более детально периоды эволюции Вселенной приведены в таблице.

Можно примерно предвидеть, как будет реализован затем один из двух возможных вариантов эволюции Вселенной, предсказанных теорией Фридмана.

1) $\rho \le \rho_c$. ***Вселенная будет постоянно расширяться далее, и безжизненные галактики продолжат путешествие в замерзшей темноте к концу времени.***

2) $\rho > \rho_c$. ***Вселенная прекратит расширяться, коллапсирует и погибнет в состоянии, подобном началу Большого Взрыва, в котором время теряет его последовательную определенность.***

① БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ. РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ



РАЗЛЕТ ГАЛАКТИК ОЗНАЧАЕТ, ЧТО В ПРОШЛОМ ОНИ БЫЛИ БЛИЖЕ ДРУГ К ДРУГУ, А ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ БЫЛА БОЛЬШЕ. РАСШИРЕНИЕ ПРИВОДИТ К ОХЛАЖДЕНИЮ И УМЕНЬШЕНИЮ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА. РАННЯЯ ВСЕЛЕННАЯ БЫЛА БОЛЕЕ ПЛОТНОЙ И БОЛЕЕ ГОРЯЧЕЙ, ЧЕМ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

② ОСНОВНЫЕ ПЕРИОДЫ ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ

	Период	Возраст Вселенной	Температура, К
Ранняя Вселенная	Планковская эпоха (квантовая гравитация)	$0–10^{-43}$ с	10^{32}
	Эпоха Великого объединения	$(10^{-43}–10^{-36})$ с	$10^{32}–10^{28}$
	Инфляционная фаза	$(10^{-36}–10^{-34})$ с	$10^{28}–10^{27}$
	Электрослабая эпоха	$(10^{-34}–10^{-10})$ с	$10^{27}–10^{15}$
	Эра кварков	$(10^{-10}–10^{-6})$ с	$10^{15}–10^{13}$
	Адронная эра	$(10^{-6}–10^{-4})$ с	$10^{13}–10^{12}$
	Лептонная эра	$(10^{-4}–1)$ с	$10^{12}–10^{10}$
	Эра нуклеосинтеза	(1–200) с	$10^{10}–10^{9}$
Образование атомов	Фотонная эра	200 с–350 000 лет	$10^{9}–3 \cdot 10^{3}$
	Атомная эра	350 000 лет–100 млн лет	$3 \cdot 10^{3}–200$
Образование астрономических структур	Образование звезд	100 млн лет–500 млн лет	200–3
	Образование галактик	500 млн лет–5 млрд лет	
	Образование Солнечной системы	10 млрд лет–11 млрд лет	
	Возникновение жизни на Земле	0,7 млрд лет	

§82. РАННЯЯ ВСЕЛЕННАЯ

В настоящее время не существует точного описания эволюции Вселенной в самой ранней фазе — ***Планковской эпохе***, начинающейся в момент Большого Взрыва. Возможны лишь оценки характерных параметров с помощью метода размерностей, используя фундаментальные константы G, $\hbar$, c. Минимальный размер Вселенной (планковский радиус) $R_P = \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 10^{-35}$ м, в конце Планковской эпохи в момент времени $t_P = R_P/c = \sqrt{G\hbar/c^5} \approx 10^{-43}$ с, на 20 порядков меньше размера протона. Температура Вселенной в этот момент $T_P \approx 10^{32}$ К. При таких температурах все фундаментальные взаимодействия были неразличимы ①. В масштабах, доступных современной физике, порядка 10^{-18} м (радиус действия слабого взаимодействия) пространство — время является гладким ②. На расстояниях порядка 10^{-32} м начинают появляться начальные флуктуации. На плоскости, изображающей четырехмерное пространство — время возникает заметный рельеф. На масштабах порядка планковской длины 10^{-35} м внутренняя структура пространства–времени сильно флуктуирует.

В ***эпоху Великого Объединения*** ($10^{-43} - 10^{-36}$ с) гравитационное взаимодействие становится независимым от остальных. Подобным образом в охлаждающемся солевом растворе при определенной температуре происходит кристаллизация соли (нарушение симметрии раствора). Космологические уравнения, включающие уравнение А. Фридмана, позволяют оценить

зависимость температуры T (в К) Вселенной от времени t (в с):

$$T = 10^{10}/\sqrt{t}. \qquad (1)$$

В ***инфляционную фазу*** ($10^{-36} - 10^{-34}$ с) сильное взаимодействие отделилось от электрослабого (электромагнитного и слабого) ③. Выделение энергии при таком фазовом переходе привело к резкому экспотенциальному росту масштаба Вселенной. Благодаря инфляции истинный размер Вселенной оказывается в миллион раз больше, чем ее видимый размер порядка 14 млрд световых лет.

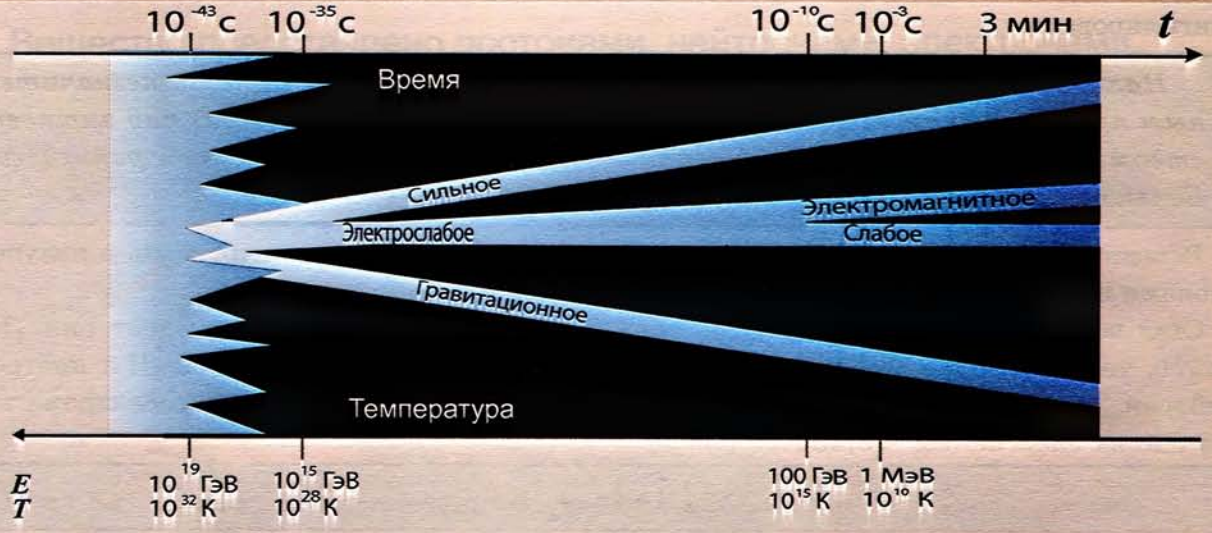
В ***электрослабую эпоху*** ($10^{-34} - 10^{-10}$ с) разделяются электромагнитное и слабое взаимодействия. При температурах, больших критической $T_c \approx 3 \cdot 10^{15}$ К ≈ 200 ГэВ, взаимодействия подобны друг другу (симметричны) и подчиняются закону Кулона.

В ***эру кварков*** ($10^{-10} - 10^{-6}$ с) Вселенную заполняет смесь кварков — антикварков, лептонов и антилептонов, частиц — переносчиков взаимодействий.

В ***адронную эру*** ($10^{-6} - 10^{-4}$ с) свободные кварки объединяются в мезоны или барионы в диапазоне температур 10^{-13} К $- 10^{-12}$ К (см. формулу (1) ④. Ввиду того, что Вселенная, расширяясь, продолжала охлаждаться, адроны (барионы и мезоны) не могли распасться на кварки в результате обратного процесса.

В конце ***лептонной эры*** ($10^{-4} - 1$ с) температура охлаждающейся Вселенной оказывается недостаточной для рождения пары электрон–позитрон, так как энергия кванта теплового излучения kT оказывается меньше, чем энергия покоя рожденных частиц $kT < m_e c^2$ ⑤. Поэтому как соответствующая пара частица-античастица, так и антивещество, исчезает в результате реакций аннигиляции.

① РАЗДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

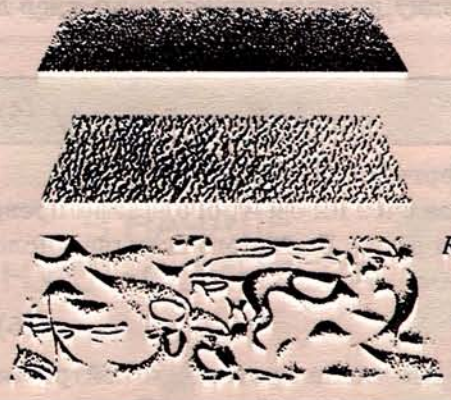


Зависимость температуры Вселенной от времени:

$$T = \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}, \quad [T] = \text{K}, \quad [t] = \text{c}$$

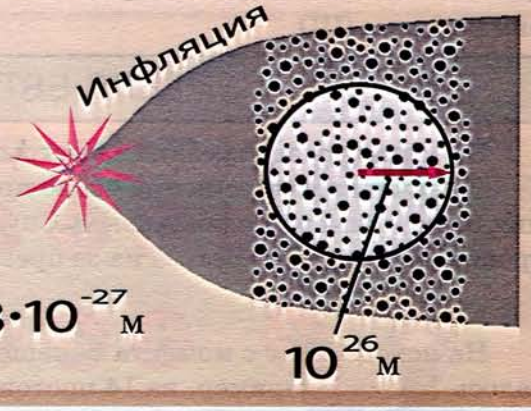
② ПЛАНКОВСКАЯ ЭПОХА ($t < 10^{-43}$ с)

Квантовый вакуум пространства–времени на разных масштабах



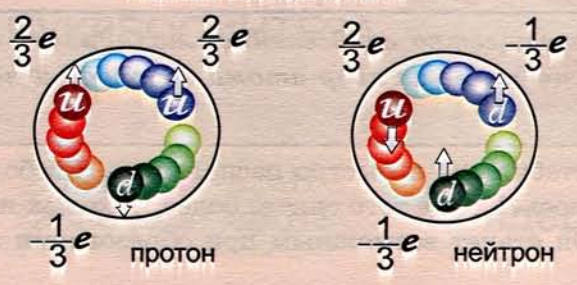
③ ИНФЛЯЦИОННАЯ ФАЗА ($10^{-36} - 10^{-34}$ с)

Истинные размеры Вселенной превышают видимый горизонт 10^{26} м

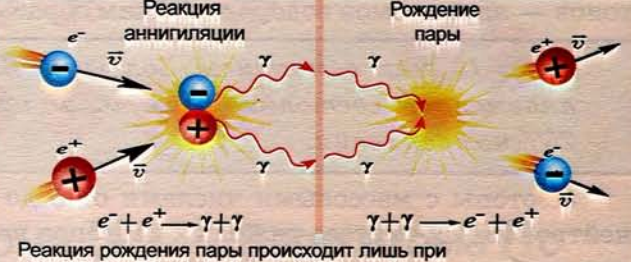


④ АДРОННАЯ ЭРА ($10^{-6} - 10^{-4}$ с)

Кварковая структура нуклонов



⑤ ЛЕПТОННАЯ ЭРА ($10^{-4} - 1$ с)



Реакция рождения пары происходит лишь при

$kT \geq mc^2 = kT_*$

T_* – пороговая температура рождения пары частица– античастица

§83. ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Спустя чуть более 1 с с момента Большого Взрыва антивещество во Вселенной полностью аннигилировало.

Наличие вещества в современном мире можно объяснить лишь незначительным преобладанием вещества (протонов, нейтронов, электронов) над антивеществом (антипротонами, антинейтронами, позитронами) в самой ранней фазе Большого Взрыва.

Вещество осталось представленным протонами, нейтронами, электронами, а излучение — фотонами и нейтрино.

Стал возможен ***нуклеосинтез***, т.е. образование более сложных ядер: дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ ①. Нуклеосинтез начинается с объединения протона ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ и нейтрона ${}^{1}_{0}n$ в дейтрон — ядро дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, сопровождающимся испусканием кванта γ электромагнитного излучения с энергией $E_\gamma = 2{,}22$ МэВ (I).

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma \qquad (1) $$

При обратной реакции, если энергия кванта E_γ оказывается больше 2,22 МэВ, дейтрон под действием излучения распадается на протон и нейтрон:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + \gamma \rightarrow n + p \qquad (2) $$

В этот момент времени из-за охлаждения Вселенной энергия фотонов оказывается недостаточной для диссоциации (2) дейтрона.

Второй этап процесса — взаимодействие двух дейтронов ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ с образованием трития ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ и протона ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ с выделением энергии 4,03 МэВ (II).

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{2}_{1}n \qquad (3) $$

Образование ядер гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ на третьем этапе происходит при взаимодействии ядер дейтерия и трития (III).

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n \qquad (4) $$

В результате этой реакции быстрый нейтрон уносит энергию 17,59 МэВ.

До начала нуклеосинтеза число протонов и нейтронов за счет их быстрого взаимопревращения было примерно одинаковым. Спустя несколько секунд после Большого Взрыва число нейтронов начало уменьшаться из-за превращения их в протоны:

$$ n \rightarrow p + e^{-} + \tilde{\nu}_e \,. \qquad (5) $$

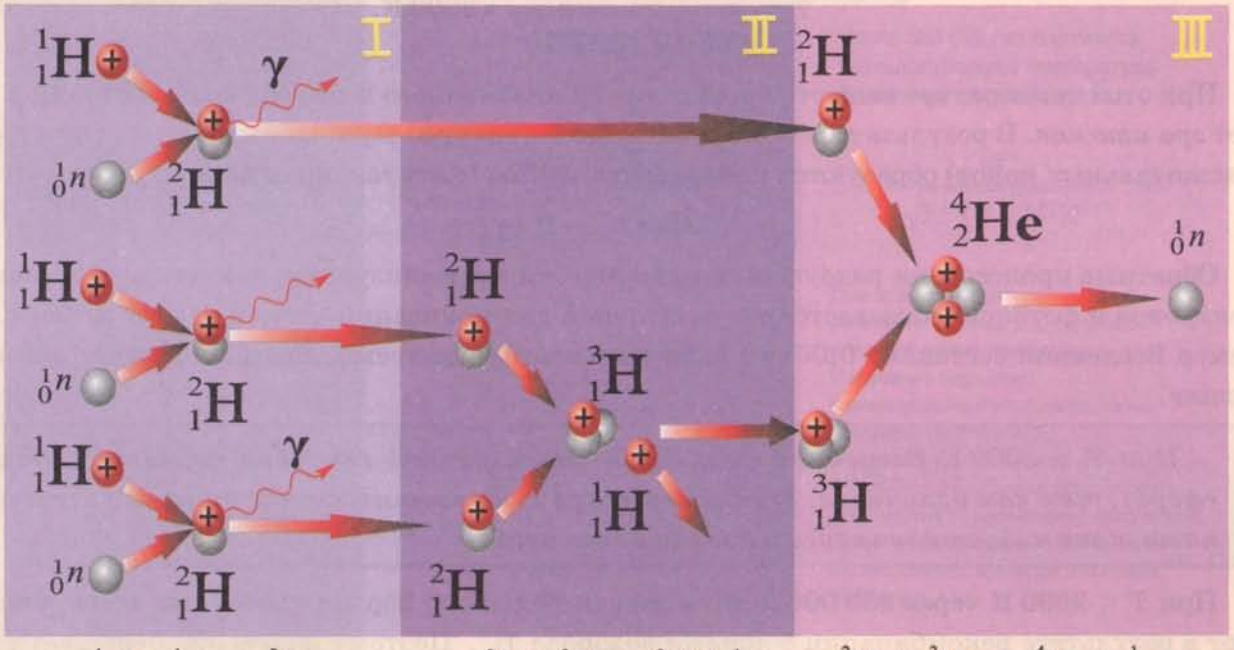
На исходе 225 с с момента Большого Взрыва соотношение числа протонов и нейтронов оказалось 7:1 ②. Например, на 14 протонов приходилось в среднем два нейтрона. Такое соотношение привело к образованию первичного газа, состоящего из водорода и гелия. При синтезе ядер гелия (α-частиц) два нейтрона объединялись с двумя протонами. Свободными остались 12 протонов — ядра атомов водорода. Таким образом,

через 15 мин с момента Большого Взрыва вещество во Вселенной находилось в плазменном состоянии и состояло на 75% по массе из ядер атома водорода и на 25% из ядер гелия.

Изотопы с массовыми числами от 5 до 8 нестабильны и быстро распадались. Свободных нейтронов для синтеза тяжелых изотопов не осталось. Кроме того синтез более тяжелых изотопов требует существенно больших температур. Он станет возможным при образовании звезд миллиарды лет спустя.

① НУКЛЕОСИНТЕЗ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ (1-100 с)

Вещество представлено протонами, нейтронами, электронами, а излучение – фотонами и нейтрино



$^1_1H + {}^1_0n \rightarrow {}^2_1H + \gamma$ $E\gamma = 2{,}22$ МэВ

$^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_1H + {}^1_1H$ $\Delta E_{II} = 4{,}03$ МэВ

$^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$ $\Delta E_{III} = 17{,}59$ МэВ

② ОБРАЗОВАНИЕ ВОДОРОДНО-ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ (100 с – 15 мин)

$N_p : N_n = 7:1$

В НАЧАЛЕ НУКЛЕОСИНТЕЗА

В КОНЦЕ НУКЛЕОСИНТЕЗА

75% по массе – ядра H
25% по массе – ядра He

Состав плазмы

§84. РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Температура вещества Вселенной, существовавшего в виде водородно-гелиевой плазмы, через 350 000 лет из-за ее расширения оказывается порядка ①:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{3{,}5 \cdot 10^5 \cdot 3{,}15 \cdot 10^7}} \approx 3000 \text{ К}.$$

При этой температуре вещество переходит из плазменного в газообразное состояние: наступает ***эра атомов***. В результате рекомбинации (объединения) заряженных частиц (электронов и положительных ионов) образуются нейтральные атомы (с испусканием фотона γ):

$$H^+ + e^- \rightarrow H + \gamma \qquad (1)$$

Обратные процессы их разрушения практически не реализуются, так как средняя энергия электронов и фотонов оказывается недостаточной для ионизации атомов. В этот момент, когда размер Вселенной составлял 0,001 ее размера в настоящее время, Вселенная изменилась даже внешне.

> ***При $T > 3000$ К Вселенная выглядела непрозрачной (подобно туманной атмосфере), так как излучение, взаимодействуя с заряженными частицами (электронами, ионами), отклонялось и поглощалось ими.***

При $T < 3000$ К через 350 000 лет с момента Большого Взрыва свободные электроны исчезают в результате рекомбинации с ионами водорода H^+. Поэтому излучение перестает взаимодействовать с веществом, свободно (изотропно) распространяясь во всех направлениях. Вселенная становится прозрачной для теплового излучения.

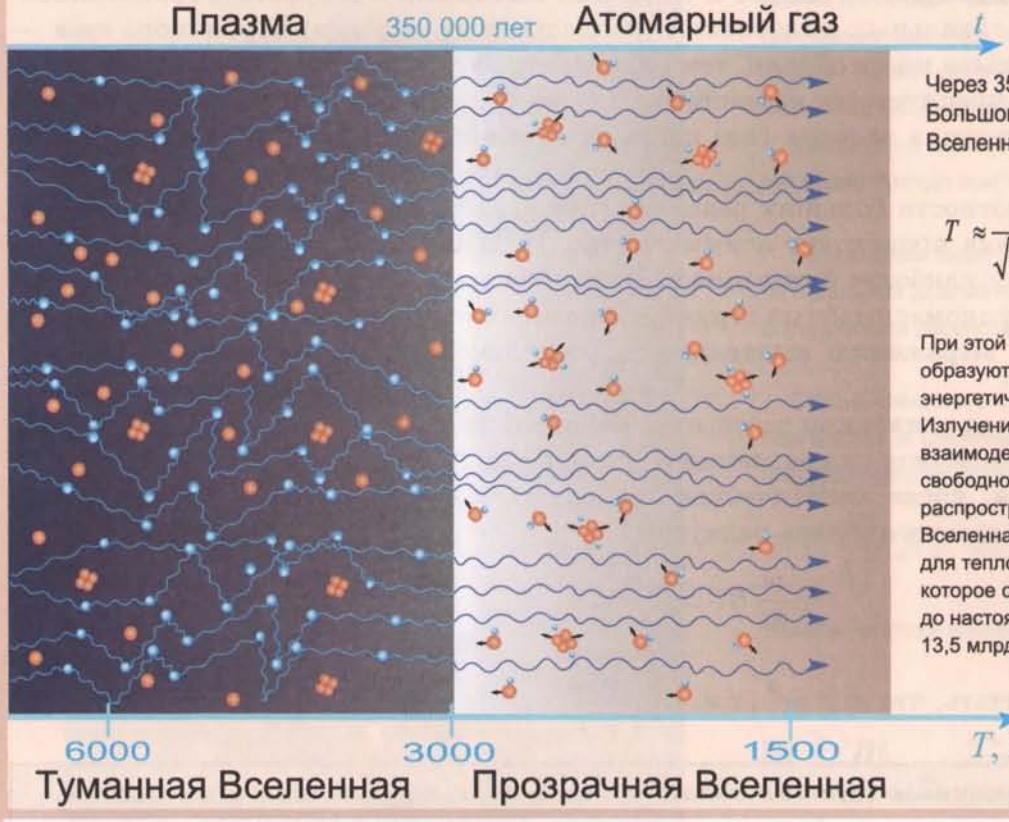
Модель Большого Взрыва, предложенная в 1948 году ***Георгием Гамовым***, предсказывала, что это тепловое излучение сохранилось с тех времен до настоящего времени в течение 14 млрд лет. Поэтому часто такое излучение называют ***реликтовым***. Вследствие расширения Вселенной температура реликтового излучения должна была уменьшиться примерно в 1000 раз, т.е. быть порядка 3 К. Длина волны 1 мм, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения при такой температуре, находится в СВЧ-диапазоне.

> ***Открытие в 1964 году американскими астрофизиками Арно Пензиасом и Робертом Уилсоном изотропного реликтового СВЧ-излучения, приходящего извне в нашу Галактику, стало вторым экспериментальным подтверждением модели Большого Взрыва (вслед за эффектом Хаббла).***

Измеренная интенсивность излучения действительно соответствовала излучению абсолютно черного тела, имеющего температуру 2,73 К. Изотропность и однородность реликтового излучения дополнительно подтверждают предположения об однородности и изотропности Вселенной на больших пространственных масштабах.

Измерения спектра реликтового излучения с большой точностью космическим аппаратом WMAP в 2001 г. показали ***анизотропию излучения***, т.е. различие его температуры в различных направлениях от наблюдателя ②. Области с большей температурой (большей энергией фотонов) соответствуют областям с повышенной плотностью вещества в ранней Вселенной. Подобные уплотнения первичного газа (водорода и гелия), соизмеримые с размерами сверхскоплений галактик, подтверждают гипотезу об образовании астрономических структур во Вселенной.

① ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



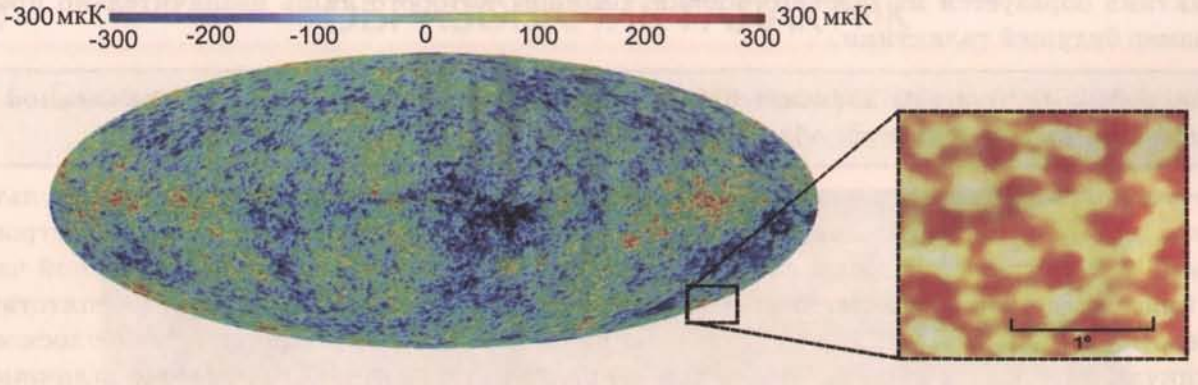
Через 350 000 лет с момента Большого Взрыва температура Вселенной оказывается:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{3{,}5\cdot 10^5 \cdot 3{,}15\cdot 10^7}} \approx 3000\ \text{K}$$

При этой температуре образуются атомы с дискретным энергетическим спектром. Излучение перестает взаимодействовать с веществом, свободно (изотропно) распространяясь во всех направлениях. Вселенная становится прозрачной для теплового реликтового излучения, которое сохранилось с тех времен до настоящего времени в течение 13,5 млрд лет

② АНИЗОТРОПИЯ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Тепловое реликтовое излучение в диапазоне длин волн 3 – 14 мм, зафиксированное WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) – космическим аппаратом, запущенным в 2001 г.



Области красного цвета имеют бóльшую температуру (а вещество – бóльшую плотность), чем области синего цвета. Пространственные масштабы флуктуаций плотности вещества оказываются порядка размера сверхскоплений галактик, т. е. около 100 млн св. лет.

Участок неба при бóльшей разрешающей способности (около 7′)

§85. ОБРАЗОВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В течение миллиарда лет с момента Большого Взрыва формировались условия для образования первоначальных астрономических структур (сверхскоплений галактик, скоплений галактик, галактик) и объектов (звезд, планет и т.д.). Они возникали в результате гравитационного сжатия случайных локальных уплотнений (неоднородных облаков) первичного газа — водорода и гелия. Чем больше масса облака, тем сильнее его гравитационное сжатие. Процессу гравитационного сжатия препятствует возрастание давления газа внутри облака. Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа сравнивается с потенциальной гравитационной энергией газового облака.

При флуктуациях плотности больших размеров (порядка сверхскопления галактик) сжатие первоначального облака происходит асимметрично ①. Наибольшее гравитационное притяжение возникает между наиболее близкими частями облака в направлении минимального размера. В результате крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определенных плоскостях (по меткому выражению выдающегося российского физика ***Якова Борисовича Зельдовича*** «как блины»).

Со временем такая среда неизбежно разобьется на отдельные фрагменты (облака), размеры которых определяются равенством сил давления и гравитации.

Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа сравнивается с потенциальной гравитационной энергией газового облака радиусом r:

$$\frac{m}{M}RT \simeq G\frac{m^2}{r}.$$

Для оценки будем считать, что $m \simeq \rho r^3$, т.е. $r = \left(\frac{m}{\rho}\right)^{1/3}$, $M = M_H = 10^{-3}$ кг/моль.

Процесс гравитационного сжатия облака начинается только, если его масса m оказывается больше некоторой минимальной массы Джинса $m_Д$, названной в честь английского астрофизика Джеймса Джинса: $m \geq m_Д \simeq \sqrt{\frac{1}{\rho}\left(\frac{RT}{GM_H}\right)^3}$.

Галактика образуется из газового облака, размеры которого лишь незначительно превышают размер будущей галактики.

Эволюция галактики зависит от начальных условий образования: начальной скорости вращения газового облака и его массы ②.

В отсутствие начального вращения гравитация равномерно сжимает облако. В результате образуется эллиптическая галактика с сильной концентрацией звезд к центру. В быстровращающемся облаке гравитационное сжатие также приводит к образованию сферической части (гало) в виде звезд первого поколения. Однако концентрации вещества в центре препятствуют центробежные силы инерции. В результате газ концентрируется в галактической плоскости, перпендикулярной оси вращения. Образуется спиральная галактика. ***Спиральные галактики***, к которым относится наша Галактика — Млечный путь, составляют 70% всех галактик, ***эллиптические*** — примерно 25%. Остальные 5% галактик составляют так называемые ***неправильные галактики***.

Чем больше начальная масса галактики, тем больше гравитационное сжатие, тем быстрее образуется галактика.

При последующем сжатии облака образуются первые звезды.

① ОБРАЗОВАНИЕ СВЕРХСКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Сжатие неоднородного облака водорода и гелия

Гравитационное сжатие первоначального облака происходит асимметрично. Наибольшее притяжение возникает между наиболее близкими частями облака, расстояния между которыми постоянно уменьшаются.

В результате крупномасштабные структуры возникают прежде всего в определенных плоскостях.

Со временем такая среда неизбежно разбивается на отдельные фрагменты, размеры которых определяются равенством сил давления и гравитации.

Сжатие прекращается, когда кинетическая энергия газа массой m сравнивается с потенциальной энергией газового облака радиусом r

$$\frac{m}{M} RT \simeq G\frac{m^2}{r}$$

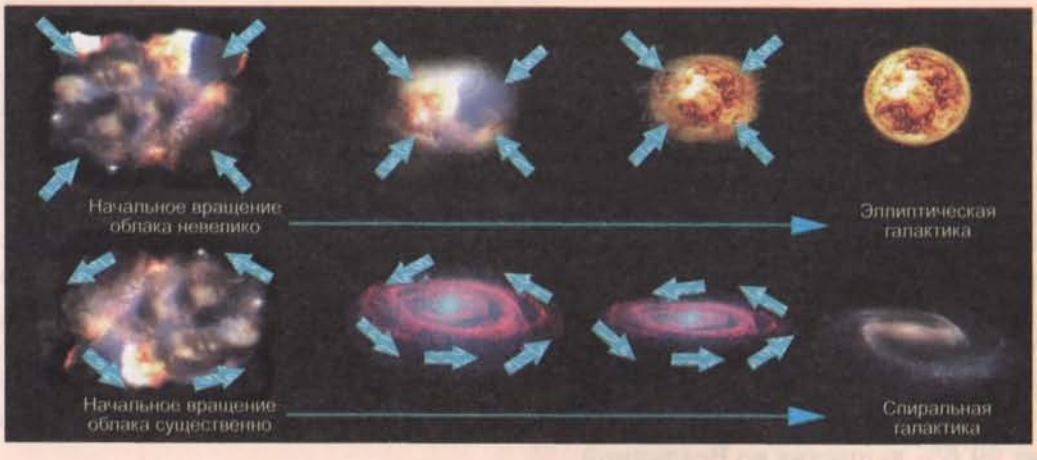
Сжатие облака начинается, если

$$m \geq m_{\text{Дж}} \simeq \sqrt{\frac{1}{\rho}\left(\frac{RT}{G M_H}\right)^3},$$

где $M_H = 10^{-3}$ кг/моль

② ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛАКТИК

Эволюция галактики зависит от начальных условий образования: начальной скорости вращения газового облака и его массы



§86. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

При температуре порядка 12–15 млн К, до которой нагревается облако водородной плазмы при его гравитационном сжатии, становятся возможными реакции термоядерного синтеза ядер гелия из ядер водорода — протонов.

Наиболее вероятной цепочкой реакций с превращением четырех протонов в одно ядро гелия является ***протон-протонный цикл***, предложенный немецким физиком ***Хансом Бете*** в 1939 г.①.

$$ {}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \to {}_2^1\mathrm{H} + e^+ + \gamma \qquad (0{,}42\ \text{МэВ}) $$
$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \to {}_2^3\mathrm{He} + \gamma \qquad (5{,}49\ \text{МэВ}) $$
$$ {}_2^3\mathrm{He} + {}_2^3\mathrm{He} \to {}_2^4\mathrm{He} + 2{}_2^1\mathrm{H} \qquad (12{,}86\ \text{МэВ}) $$

В скобках показана энергия, выделяющаяся в результате реакции.

Первая реакция — образование дейтрона ${}_1^2\mathrm{H}$ при столкновении двух протонов (I) проходит с очень малой вероятностью: каждый протон вступает в эту реакцию в среднем за 10 млрд лет. Однако благодаря огромному числу протонов $N_p = m/m_p$ «узкое место» цикла преодолевается (для Солнца $N_{p\odot} = M_\odot / m_p = 10^{57}$).

Вторая (II) и третья (III) реакции протекают значительно быстрее: за время 10 с и 10^6 лет.

Вводя стехиометрический коэффициент 2 для первых двух реакций и суммируя левые и правые части протон-протонного цикла, получаем

$$ 4\,{}_1^1\mathrm{H} \to {}_2^4\mathrm{He} + 2e^+ + 2\upsilon_e + 2\gamma\,. \qquad (1) $$

Оценим энергию, выделяющуюся в результате протон-протонного цикла②:

$$ (2 \cdot 0{,}4 + 2 \cdot 5{,}49 + 12{,}86)\ \text{МэВ} = 24{,}7\ \text{МэВ}. $$

Каждый из двух позитронов быстро аннигилирует с электроном с выделением энергии $2m_e c^2 = 1{,}02$ МэВ. Таким образом при реакции (1) выделяется энергия

$$ E_{pp} = (24{,}7 + 2 \cdot 1{,}02)\ \text{МэВ} = 26{,}7\ \text{МэВ}. $$

Тогда полная термоядерная энергия $E_{\text{тя}}$, которая может выделиться на Солнце в результате синтеза ядер гелия из четырех ядер водорода, равна

$$ E_{\text{тя}} = \tfrac{1}{4} N_{pO} \cdot E_{pp} = \tfrac{1}{4} \cdot 10^{57} \cdot 26{,}7 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \approx 10^{44}\ \text{Дж}. $$

Время, за которое будет израсходована термоядерная энергия Солнца:

$$ \tau_{\text{тя}} = E_{\text{тя}} / P_{\text{изл}} = 10^{44} / (4 \cdot 10^{26} \cdot 3{,}16 \cdot 10^7) \approx 10\ \text{млрд лет}. $$

Термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звезд③.

От массы звезды существенно зависит срок ее существования, а также конечный результат ее эволюции.

Чем больше масса звезды, тем сильнее и быстрее ее гравитационное сжатие, большая энергия выделяется в единицу времени, выше температура в центре, интенсивнее идет термоядерный синтез, в процессе которого образуются более тяжелые химические элементы④.

Температура внутри звезды убывает по мере удаления от ее центра. Поэтому на разной глубине одновременно проходят различные ядерные реакции синтеза и образуются слои, состоящие из химических элементов, последовательно выгоравших в звезде.

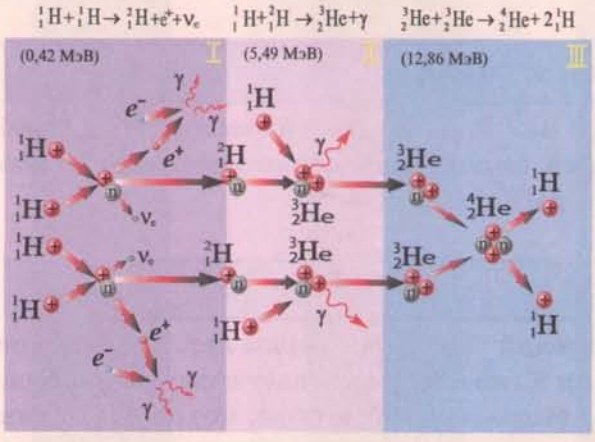
Взрыв сверхновых изменяет состав первичного газа, состоявшего на 75% по массе из водорода и на 25% из гелия, добавляя в него тяжелые элементы. Всего девять химических элементов составляет 99,6% вещества во Вселенной.

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗД

ПРОТОН-ПРОТОННЫЙ ЦИКЛ

①

Ханс Бете, 1939 г.



$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$\Delta E = 1{,}02 \text{ МэВ}$$

ВРЕМЯ СВЕЧЕНИЯ СОЛНЦА

②

Энергия, выделяющаяся при свечениии Солнца
Результирующая реакция при протон-протонном цикле

$$4\,{}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$$

Энергия, выделяющаяся в результате протон-протонного цикла:

$$E_{pp} = (2\cdot 0{,}42 + 2\cdot 5{,}49 + 12{,}86)\text{МэВ} = 24{,}7\text{ МэВ}$$

При аннигиляции двух позитронов выделяется дополнительная энергия

$$2m_e c^2 = 1{,}02\text{ МэВ, т.е.}$$

$$E_{pp} = (24{,}7 + 2\cdot 1{,}02)\text{ МэВ} = 26{,}7\text{ МэВ}$$

Число протонов $N_{p\odot}$ на Солнце

$$N_{p\odot} = \frac{M_\odot}{m_p} = \frac{2\cdot 10^{30}}{1{,}6\cdot 10^{-27}} \approx 10^{57}$$

Полная термоядерная энергия $E_{тя}$, которая может выделиться на Солнце в результате синтеза ядра гелия из четырех ядер водорода

$$E_{тя} = \frac{1}{4} N_{p\odot} \cdot E_{pp} \approx 10^{44}\text{ Дж}$$

Время, за которое будет израсходована термоядерная энергия при мощности излучения $P_{изл}$

$$\tau_{тя} = \frac{E_{тя}}{P_{изл}} = \frac{10^{44}}{4\cdot 10^{26}\cdot 3{,}16\cdot 10^{7}} \approx 10 \text{ млрд. лет}$$

Термоядерные реакции синтеза являются основным источником энергии звезд

ОСНОВНЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

③

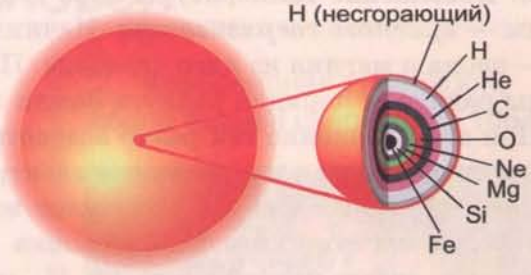
Минимальная начальная масса звезды, $M_\odot$	Термоядерная реакция в ядре звезды	Последний синтезируемый химический элемент	Минимальная температура синтеза, млн К
0,1	$4\,{}_1^1H \rightarrow$	${}_2^4He$	10
2	${}_2^4He \rightarrow {}_4^8Be + {}_2^4He \rightarrow$ ${}_6^{12}C + {}_2^4He \rightarrow$	${}_6^{12}C$ ${}_8^{16}O$	100
4	${}_6^{12}C \rightarrow {}_2^4He +$	${}_{10}^{20}Ne$	600
5	${}_6^{12}C \rightarrow$	${}_{12}^{24}Mg$	740
8	${}_8^{16}O \rightarrow {}_2^4He +$	${}_{14}^{28}Si$	1500
15	${}_{14}^{28}Si \rightarrow$	${}_{26}^{56}Fe$	4000
20	${}_{26}^{56}Fe + \gamma \rightarrow$	$13\,{}_2^4He + 4\,{}_0^1n$	6000

Чем больше минимальная начальная масса звезды, тем тяжелее последний синтезируемый химический элемент в звезде

СИНТЕЗ ТЯЖЕЛЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

④

Ядро предсверхновой звезды



Процентный состав химических элементов примерно такой же, как на Земле

Процентное содержание основных химических элементов межзвездного вещества

Химический элемент	H	He	O	C	Ne	N	Fe	Mg	Si
Процентное содержание	70%	28%	0,7%	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%	0,05%	0,05%

§87. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД РАЗЛИЧНОЙ МАССЫ

От массы звезды зависит срок ее существования и конечный результат эволюции.

Чем больше масса звезды, тем быстрее ее гравитационное сжатие, выше температура в центре, интенсивнее термоядерный синтез, в процессе которого образуются более тяжелые химические элементы.

Рассмотрим последовательно эволюцию звезд различных масс ①.

Если масса звезды

$$m < 0{,}08\,M_\odot \ (M_\odot \text{ — масса Солнца}),$$

температура в центре протозвезды будет меньше 10 млн К — пороговой температуры, необходимой для начала термоядерного протон-протонного цикла. Такая протозвезда, называемая ***коричневым карликом***, излучает преимущественно в ИК диапазоне.

Если

$$m \approx M_\odot,$$

водород в центре звезды полностью превращается в гелий через миллиарды лет. Когда температура при сжатии гелиевого ядра возрастет до 100 млн К, из гелия начинает синтезироваться углерод. Силы гравитации сжимают углерод до такой высокой температуры, что звезда начинает расширяться и излучать красный свет из-за охлаждения ее поверхности. Внешняя поверхность звезды (например, Солнца), называемой ***красным гигантом***, может достигнуть орбиты Земли. Ядро звезды сжимается так, что электронные оболочки соседних атомов начинают перекрываться. Звезда становится ***белым карликом***, остывающим миллиарды лет, излучая энергию в 1000 раз меньшую, чем Солнце.

Если

$$m \approx 10M_\odot,$$

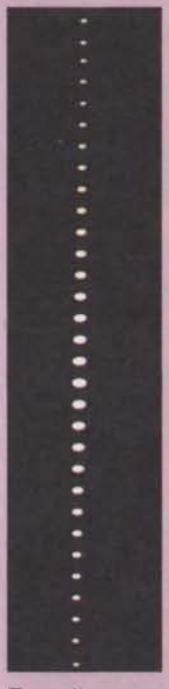
водород за 10 млн лет синтезируется в гелий, а температура и давление в центре звезды уменьшается. Затем звезда в течение нескольких десятков тысяч лет сжимается гравитацией. При температуре свыше 100 млн К начинаются реакции синтеза ядер углерода и кислорода из ядер гелия. Повышение температуры ядра ведет к разогреванию и расширению внешней оболочки звезды — ***красного сверхгиганта***. Начинается синтез ядер более тяжелых химических элементов — неона и магния из ядер углерода. При синтезе ядер кислорода образуется кремний. Ядро звезды радиусом порядка радиуса Земли за доли секунды сжимается в шар радиусом около 10 км. При этом давление так резко возрастает, что электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны с испусканием электронного нейтрино. Такую звезду называют ***нейтронной звездой***. После сжатия возникает волна расширения сжатого шара ядерного вещества. Происходит гигантский взрыв-вспышка ***сверхновой*** звезды ②. Сверхновая 1054 г. оставила нейтронную звезду массой около 2,5 $M_\odot$ и крабовидную туманность ③.

Если

$$m \approx 30M_\odot$$

термоядерные реакции, характерные для звезды массой $10M_\odot$, в начальной фазе эволюции протекают ускоренно. Однако избыток массы приводит к сжатию кремниевого ядра и повышению его температуры до 4 млрд К, при которой ядра кремния синтезируются в ядро железа — самое тяжелое ядро, синтез которого происходит с выделением энергии. Не выдерживая огромного гравитационного давления, железное ядро быстро коллапсирует. В результате на месте взорвавшейся сверхновой остается ***черная дыра***. Взрыв сопровождается мощным потоком нейтронов из железного ядра. Присоединение нейтронов к ядрам приводит к образованию тяжелых химических элементов, рассеянных во Вселенной взрывами сверхновых. Именно поэтому такие элементы входят в состав Земли.

① НАЧАЛЬНАЯ МАССА ЗВЕЗДЫ

< 0,08 $M_\odot$	0,3 $M_\odot$	$M_\odot$	10 $M_\odot$	30 $M_\odot$
				
Коричневый карлик 100 трлн лет	Белый карлик 800 млрд лет	Белый карлик 10 млрд лет	Нейтронная звезда 100 млн лет	Черная дыра 60 млн лет
Последний синтезируемый химический элемент				
He	He	C	Si	Fe

ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

② Вспышка сверхновой

Масса нейтронной звезды после взрыва сверхновой 1054 г. составила 2,5 $M_\odot$

③ Крабовидная туманность после взрыва сверхновой 1054 г.

При вспышках сверхновых во Вселенной образовались практически все атомы химических элементов, более тяжелых, чем гелий

§88. ОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Около 4,6 млрд лет тому назад гигантское газопылевое облако образовалось в одном из спиральных рукавов нашей Галактики. (Подобное облако наблюдается в созвездии Ориона). Масса облака примерно в миллион раз превосходила массу Солнца, имело нерегулярную структуру и состояло из ряда неоднородных по размеру областей. Одна из областей уплотнения вещества массой $(1{,}5–2)\,M_\odot$ могла образовать Солнечную систему ①.

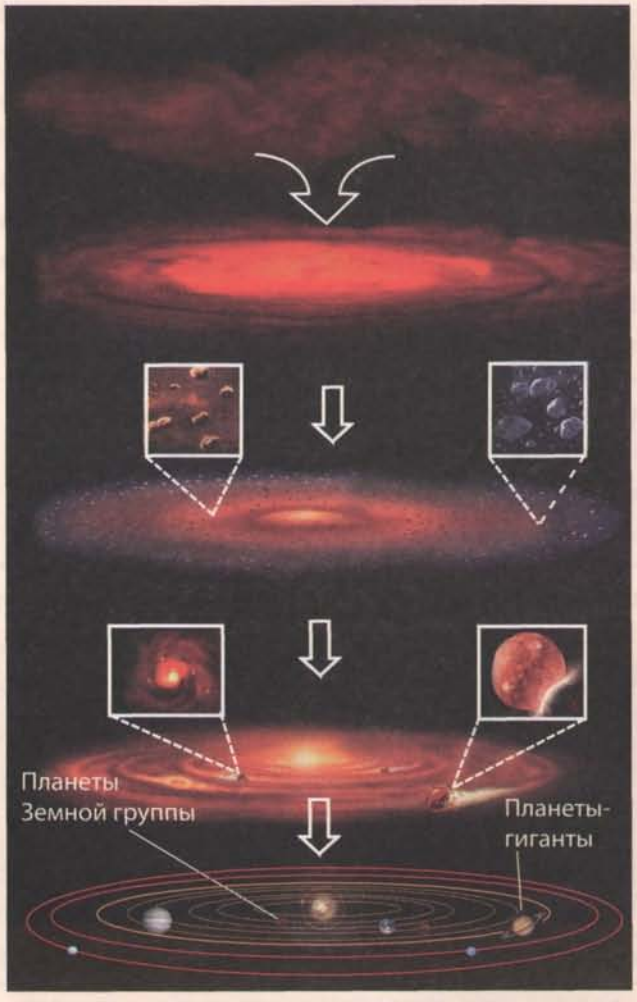
Гравитационное сжатие уменьшило размер центральной части уплотнения в 100 000 раз. В центре уплотнения оказалось прото-Солнце массой около $0{,}1\,M_\odot$, принявшее сферическую форму, излучавшее в красной области спектра ②. Остальная часть вещества образовала в течение 100 000 лет диск, вращавшийся вокруг прото-Солнца и состоявший на 98,5% по массе из газа и 1,5% пыли, взвешенной в газе. Начальное вращение облака при уменьшении его размеров приводит к значительному увеличению скорости вращения (подобно фигуристу, увеличивающему скорость вращения приближением рук к корпусу). Вращение предотвращало полный коллапс. Внешние зоны удалялись от центра. Зоны диска, ближайшие к прото-Солнцу, втягивались внутрь, пополняя массу до $M_\odot$. Турбулентность в газе уменьшалась, и пыль оседала в его плоскости в течение нескольких тысяч лет. Наличие пылевого диска наблюдается в настоящее время у звезды β-Пикторис в стадии ее образования. Температура пыли убывала с расстоянием от прото-Солнца. В районе планет земной группы $(0{,}8 \div 1{,}3)$ а. е. температура менялась в пределах $(900 \div 1400)$ К ③. В этом диапазоне температур пыль состояла из зерен железа и силикатов, но не могла содержать испаряющуюся воду и летучие вещества. В области нынешних планет-гигантов на расстоянии, большем 5 а. е., при температуре, меньшей 225 К, вода и летучие органические вещества не испаряются, существуя только в твердой фазе. Присутствие льда увеличивало массу твердого вещества и гравитационное притяжение частиц, что способствовало появлению гигантского Юпитера. В пылевом диске образовались гигантские плотные кольца вокруг Солнца. Гравитационное притяжение частиц и их столкновения между собой приводили в течение 100 000 лет к образованию зерен (укрупнению частиц пыли). Через 10 000 лет в плоскости протопланетного диска образовалось около 100 млрд объектов неправильной формы размером от 1 до 10 км ***планетезимали*** (зародыши планет) ④. Состав планетезималей зависел от их температуры, т. е. от их расстояния от Солнца.

На расстояниях (30 – 1000) а. е., т. е. практически за планетами, на периферии находится гигантский койперовский пояс ледяных планетезималей, названный в честь американского ученого ***Джеральда Койпера***. При попадании планетезимали внутрь Солнечной системы в результате изменения ее траектории она приобретает хвост кометы. Планетезимали, окруженные газом (99% (H + He), 1% CO, N_2, CNO), вращались в одну сторону вокруг Солнца, сталкиваясь при небольших относительных скоростях. Выделение тепла при неупругих столкновениях способствовало их слипанию в более массивные объекты. Чем больше диаметр объекта и соответственно его масса, тем чаще он испытывает столкновения и растет в размерах. Так образуется ***протопланета*** (планета в стадии образования).

Спустя примерно миллион лет от начала образования Солнечной системы в результате объединения при столкновениях планетезималей и протопланет начинают образовываться ядра планет и сами планеты ⑤.

Подтверждением изложенной гипотезы образования Солнечной системы являются наблюдения газопылевых дисков в созвездии Ориона ⑥ и у звезды β Пикторис ⑦.

ГРАВИТАЦИОННОЕ СЖАТИЕ ГАЗОПЫЛЕВОГО ОБЛАКА



① Вращающееся газопылевое облако

② Образование газопылевого диска и прото–Солнца

③ Укрупнение частиц пыли

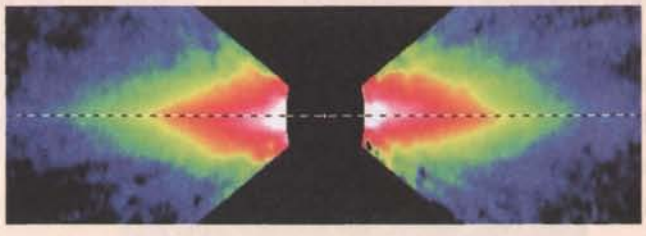
④ Возникновение планетезималей и протопланет

⑤ Образование Солнца и планет

ГАЗОПЫЛЕВЫЕ ДИСКИ У МОЛОДЫХ ЗВЕЗД В СТАДИИ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

⑥ Газопылевые диски в созвездии Ориона

⑦ Газопылевой диск у звезды β Пикторис (фотография с телескопа Хаббла)



В центральной области находится яркая звезда и ближайшая к ней планета

§89. ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Спустя примерно миллион лет с начала образования Солнечной системы в зоне между нынешним Меркурием и Марсом возникло около 20 протопланет массами между Луной и Меркурием и миллионы меньших по размеру планетезималей, состоящих из силикатов и железа. Столкновения протопланет с планетезималями приводило либо к укрупнению планет ①, либо к фрагментации планетезималей. Из-за столкновений с планетезималями на поверхности планеты плавились силикаты, железо. Более тяжелая железная лава оседала к центру планеты, застывая на глубине. Ядра планет Земной группы Меркурия, Венеры, Земли состоят из железа, а мантии в основном из силикатов железа и магния ②. Ядро Марса состоит из смеси железа и сульфида железа. У Луны железное ядро практически отсутствует.

Согласно одной из современных гипотез Луна могла возникнуть при нецентральном столкновении Земли с протопланетой размера Марса, в результате которого часть силикатной мантии Земли была выброшена на Земную орбиту ③. Из нее вследствие гравитационного притяжения образовалась Луна.

Изотопный анализ образцов старейших лунных пород показал, что Луна возникла примерно через 10 млн лет после формирования Земли. Через 500 млн лет от начала образования Солнечной системы бомбардировка Земли планетезималями практически прекратилась и значительно ослабели бомбардировки ***кометами***-планетезималями диаметром от 5 до 500 км, покрытыми льдом, принесшими на Землю воду и атмосферу.

Атмосфера Венеры и Марса в настоящее время (так же как и Земли 4 млрд лет назад) в основном состоит из углекислого газа CO_2.

Массы Меркурия и Луны недостаточны для удержания существенной атмосферы.

На расстояниях от Солнца, больших 5 а. е., частицы межпланетной пыли были в несколько раз тяжелее, чем в области планет Земной группы, из-за снега органических веществ и льда на их поверхности. Здесь возникали планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун ④. В течение миллиона лет вследствие гравитационного притяжения и столкновений частиц образовалось металло-силикатное ядро Юпитера (содержащее также углерод и кислород) массой $m = 12m_\oplus$ ⑤. Мощный гравитационный центр укрупнился ($m_я = 29m_\oplus$) в результате многочисленных столкновений с планетезималями и протопланетами, быстро захватывая атмосферу, состоящую из водорода и гелия и имеющую массу $317m_\oplus$. Гравитационное поле Юпитера отбрасывало планетезимали в ***область Оорта*** ⑥ (в честь голландского астронома ***Яна Оорта***), на расстояние около 50 000 а. е. от Солнца, где находится большинство комет. В области между Марсом и Юпитером столкновения планетезималей вызывали их фрагментацию, приводя к образованию ***пояса астероидов*** ⑦ (см. так же стр. 186). Образование Сатурна происходило аналогично, но более медленно: около 2 млн лет. Сатурн аккумулировал атмосферу массой $80m_\oplus$. Кольца Сатурна состоят из независимо двигающихся отдельных обломков водяного льда размерами от долей миллиметра до 10–25 м. Размер колец Сатурна около 60 000 км, а толщина не более 20 м. Образование Урана и Нептуна происходило заметно медленнее. Меньшие массы ядер этих планет не позволили аккумулировать значительные атмосферы.

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

①

Планеты земной группы

②

Процентное соотношение массы ядра и мантии планет земной группы и Луны

Планета	$m/M_\oplus$	$m_я/m,\%$	$m_м/m,\%$
Меркурий	0,053	60,4	39,6
Венера	0,715	39,9	60,1
Земля	1,0	38,0	62,0
Марс	0,107	26,2	73,8
Луна	0,012	0	100

ОБРАЗОВАНИЕ ЛУНЫ И МЕРКУРИЯ

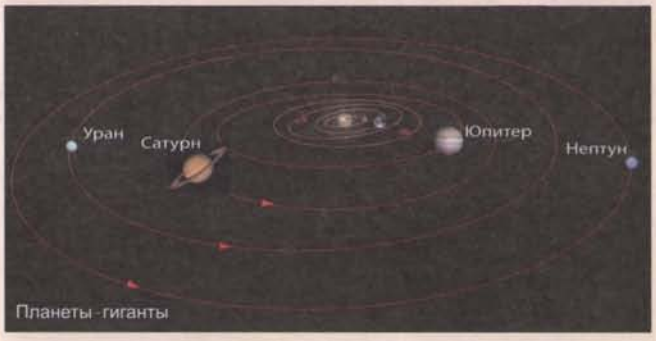
③ Нецентральное столкновение Земли с протопланетой размером с Марс (50 млн. лет после образования Солнечной системы)

Анализ проб лунного грунта показал его подобие земному грунту, который был расплавлен, а затем охлажден

Центральное столкновение Меркурия с протопланетой

В результате столкновения увеличилась относительная масса ядра Меркурия

④ ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ



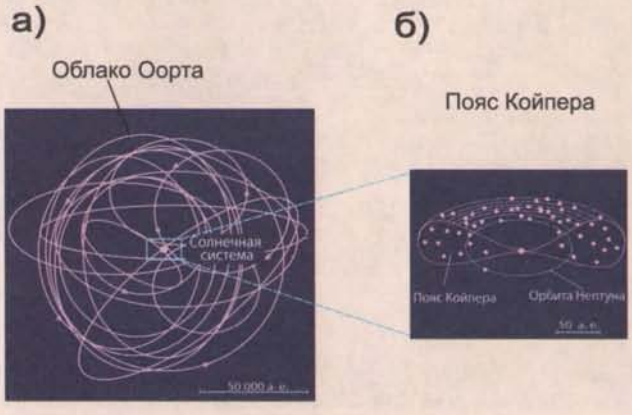
Планеты-гиганты

Формирование ядер планет-гигантов завершилось примерно через 15 млн лет с начала образования Солнечной системы

⑤ СООТНОШЕНИЕ МАССЫ ЯДРА И ГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ

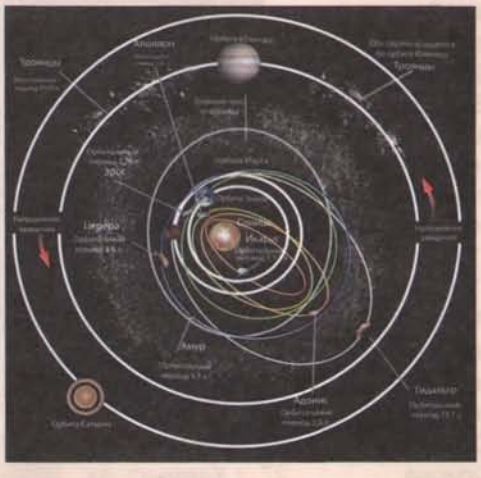
Планета	$m/M_\oplus$	$m_я/m,\%$	$m_о/m,\%$
Юпитер	317	9,0	91
Сатурн	94	20	80
Уран	14,6	89	11
Нептун	17,3	89	11

⑥ КОМЕТЫ



Области локализации комет в Солнечной системе:
а) кометы с большим периодом обращения в сферическом слое,
б) кометы с малым периодом обращения в плоскости эклиптики

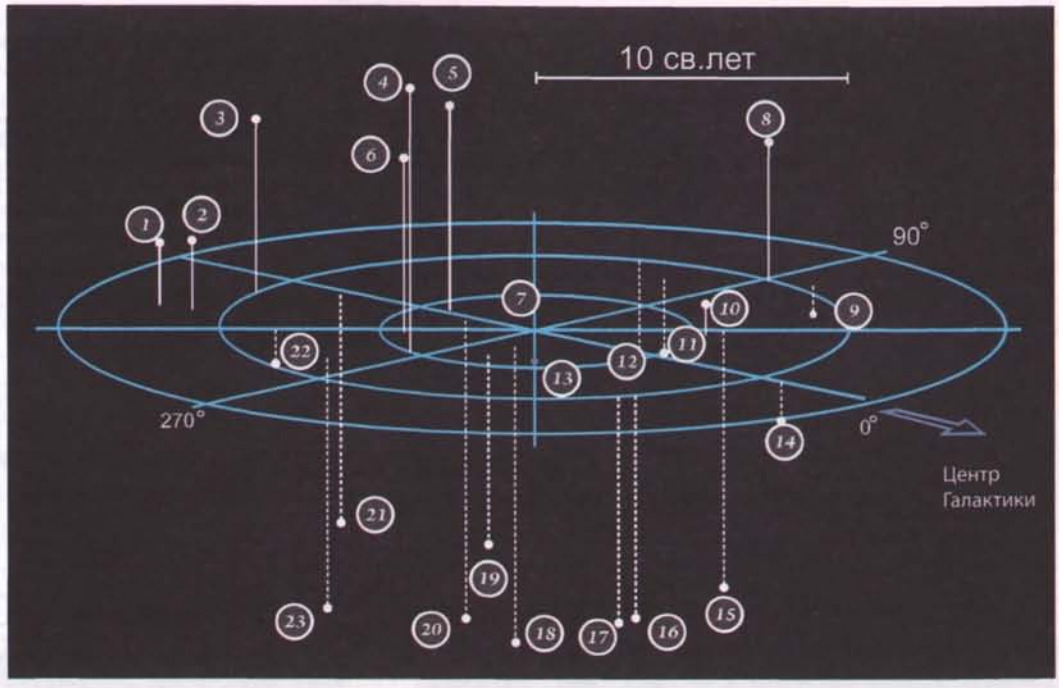
⑦ АСТЕРОИДЫ



Орбиты астероидов и главный пояс астероидов, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, лежат практически в плоскости эклиптики

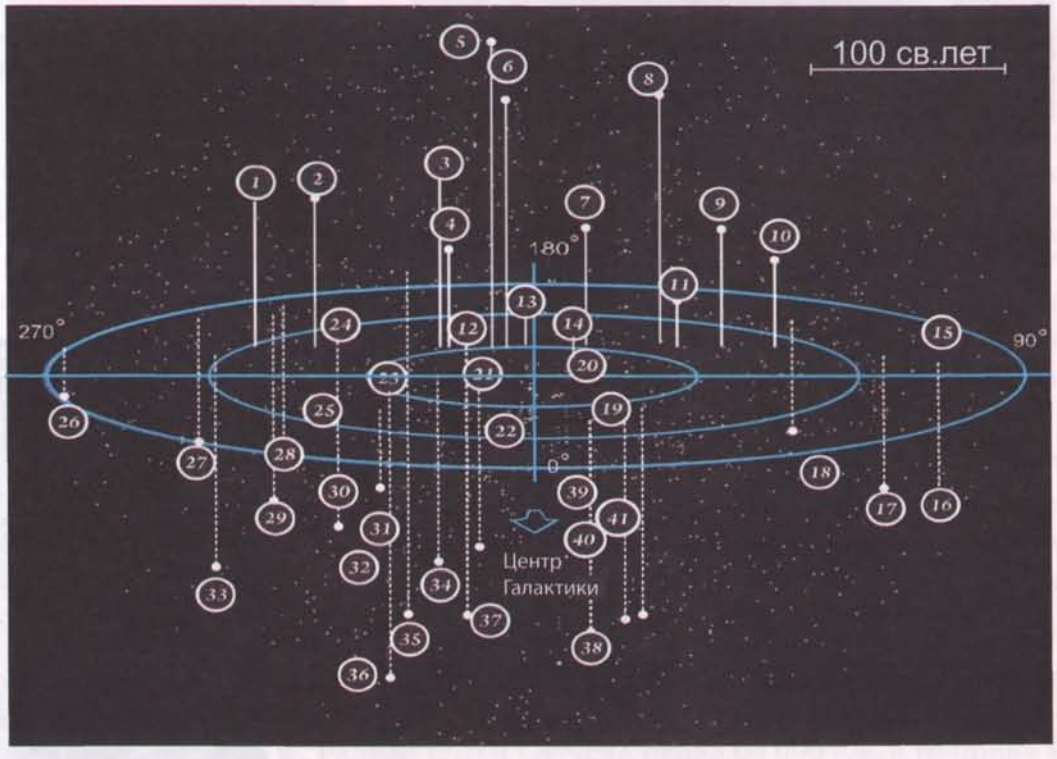
ЗВЕЗДЫ, БЛИЖАЙШИЕ К СОЛНЦУ

1. Звезда Лейтена
2. Процион
3. G51-15
4. Росса 128
5. Лаланд 21185
6. Вольф 359
7. Солнце
8. Струве 2398
9. Лебедя 61
10. Звезда Барнарда
11. Росса 248
12. Грумбридж 34
13. Проксима (α Центавра)
14. Росса 154
15. L789-6
16. Лакайль 9352
17. ε Индейца
18. L725-32
19. L726-8
20. τ Кита
21. ε Эридан
22. Сириус
23. L372-58



СКОПЛЕНИЕ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ СОЛНЦА

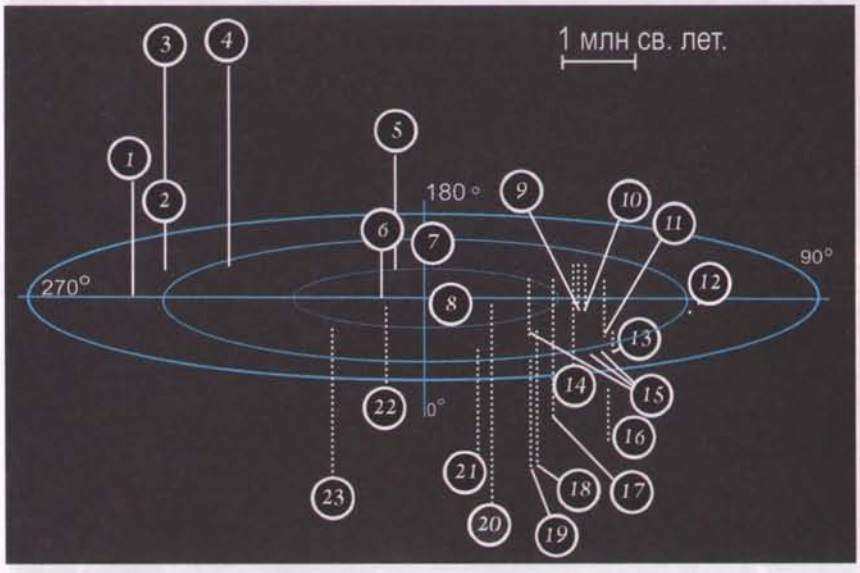
1. α Гидры
2. γ Ворона
3. γ Льва
4. μ Близнецов
5. μ Большой Медведицы
6. α Рыси
7. β, γ, δ, ε, ζ, η, α Большой Медведицы
8. ε Волопаса
9. ε Малой Медведицы
10. γ Дракона
11. η Возничего
12. Солнце
13. Арктур
14. Капелла
15. α Кассиопеи
16. η Пегаса
17. β Пегаса
18. β Андромеды
19. Скопление Гиады
20. Вега
21. Альдебаран
22. ε Стрельца
23. γ Ориона
24. γ Центавра
25. β Киля
26. N Паруса
27. τ Кормы
28. γ Треугольника
29. ε Зайца
30. α Жертвенника
31. γ Эридана
32. Ахернар
33. γ Южной Гидры
34. α Павлина
35. α Тукана
36. γ Феникса
37. β Журавля
38. γ Журавля
39. φ Стрельца
40. σ Стрельца
41. α Кита



ГАЛАКТИКИ

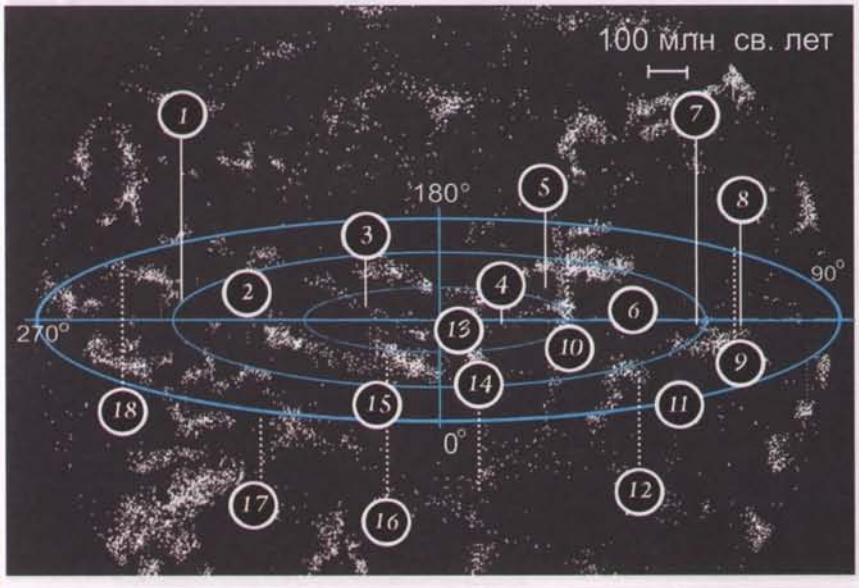
МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

1. Ветвь Наугольника
2. Щит — Южный Крест
3. M 68
4. Рукав Стрельца
5. Рукав Ориона
6. M 5
7. Солнце
8. M 13
9. Рукав Персея
10. Рукав Лебедя
11. M 15
12. M 2
13. M 30
14. Карликовая Галактика Стрельца
15. M 75
16. Шаровое скопление



МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК

1. NGC 3109
2. Насос (карликовая)
3. Секстант A
4. Секстант B
5. A Льва
6. I Льва
7. II Льва
8. Млечный путь
9. NGC 185
10. NGC 147
11. NGC 205
12. IC 10
13. Галактика Андромеды
14. Галактика Треугольника
15. I, II и III Андромеды
16. Пегас (карликовая)
17. LGS 3
18. Водолей (карликовая)
19. Стрелец (карликовая неправильная)
20. WLM
21. Кит (карликовая)
22. Феникс (карликовая)
23. Тукан (карликовая)

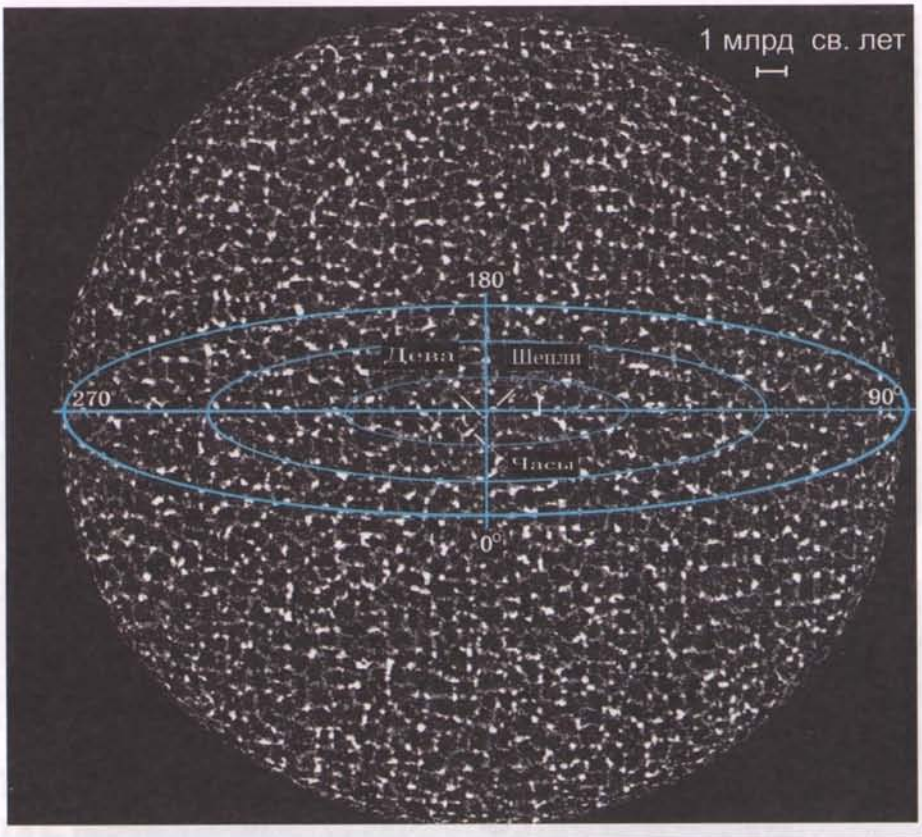


СВЕРХСКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК

1. Козерога
2. Скульптора
3. Павлина – Индуса
4. Центавра
5. Геркулеса
6. Шепли
7. Северной Короны
8. Волопаса
9. Большой Медведицы
10. Волосы
11. Льва
12. Секстанта
13. Девы
14. Гидры
15. Персея – Рыб
16. Голубя
17. Часов
18. Рыб – Кита

НАБЛЮДАЕМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

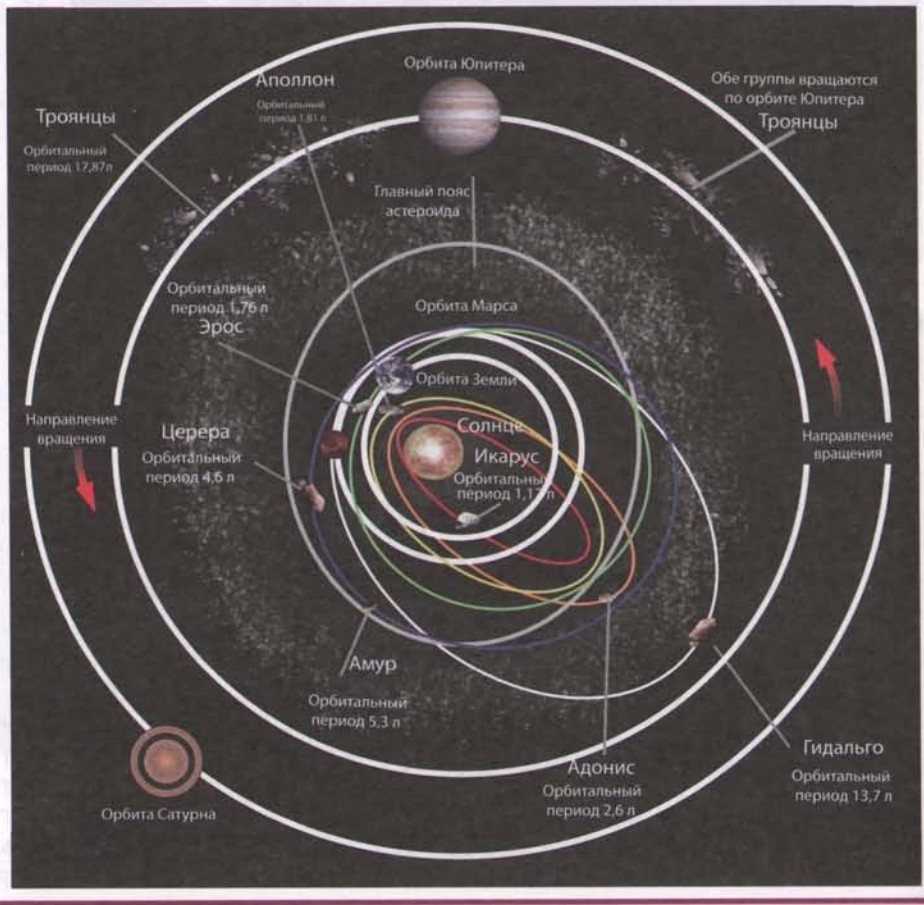
На больших масштабах Вселенная однородна и изотропна.



АСТЕРОИДЫ

Пересечение орбит астероидов может приводить к столкновениям, увеличению числа астероидов и уменьшению среднего размера.

Орбиты астероидов и главный пояс астероидов, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, лежат практически в плоскости эклиптики.



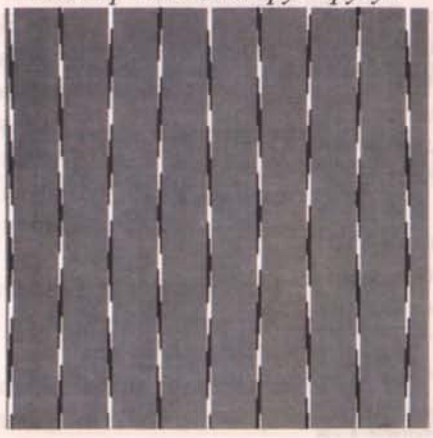
ОПТИЧЕСКИЕ ИЛЛЮЗИИ

СПИРАЛЬ ФРЭЗЕРА

Линия на чертеже – спираль? Или это концентрические окружности?

"СОГНУТЫЕ" ПРОВОДА

Провода согнуты или параллельны друг другу?

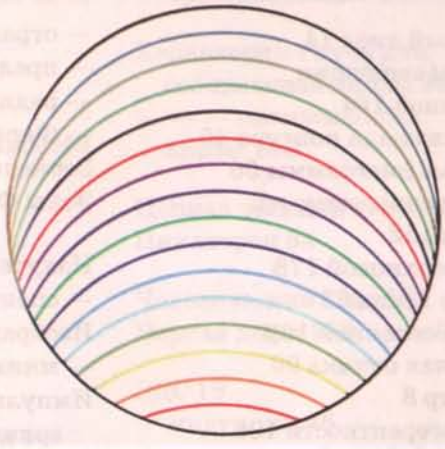


"МИГАЮЩАЯ" РЕШЕТКА

Мигают ли кружки, когда взгляд переводится по плоскости клеток?

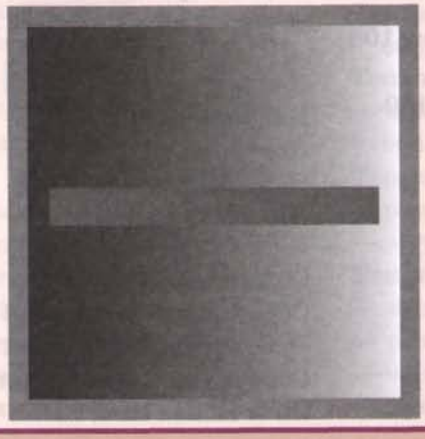
ДЕЛЕНИЕ ОТРЕЗКА ПОПОЛАМ ДУГАМИ

Дуга какого цвета проходит через центр круга?



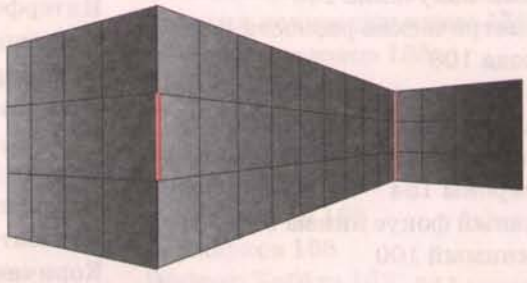
ОДНОВРЕМЕННЫЙ КОНТРАСТ

Одинаков ли оттенок цвета у всей центральной горизонтальной полосы?



СРАВНЕНИЕ ДЛИН ОТРЕЗКОВ

Какой из оранжевых отрезков длиннее?



Абсолютно черное тело 118
Абсолютный показатель преломления среды 88
Адроны 154
Активность радиоактивного вещества 142
Альфа-распад 140
Ампер 38
Амперметр 8
Анизотропия реликтового излучения 172
Аннигиляция 152
Антикварки 156
Античастицы 152
Ароматы 156
Астрофизика 160
Атомная бомба 146
— электростанция 148

Барионный заряд 154
Барионы 154
Белый карлик 178
Бета-распад 140
Бипризма Френеля 110
Близорукость 102
Бозоны 152

Вакуумный диод 14
Варианты эволюции Вселенной 164
Вектор площади контура 40
Векторные диаграммы 56
Взаимопревращаемость частиц 152
Взрыв сверхновой 178
Вибратор Герца 68
Возраст Вселенной 162
Волоконная оптика 90
Вольтметр 8
Время когерентности 106
— релаксации 50

Галактики спиральные 174
— эллиптические 174
— неправильные 174
Гамма-излучение 140
Геометрическая разность хода 108
Генератор переменного тока 46
Главная оптическая ось 94
— плоскость линзы 94
Гипероны 154
Главный фокус линзы 96
— мнимый 100
Глюоны 156

Давление электромагнитной волны 72
Дальнозоркость 102
Детектирование 82
Диамагнетик 42
Дисперсия света 92
Дифракционная решетка 116
Дифракция 112
— света на щели 114
Длина волны 70
— де Бройля 124
— когерентности 106
Доза поглощенного излучения 150
— эквивалентная 150
Дырка 12
Дырочная проводимость 12

Естественный радиационный фон 150

Зависимость от температуры удельного сопротивления проводника 10
— — — — —полупроводника 12
Закон Джоуля–Ленца 20
— Ома для замкнутой цепи 18
— — — участка цепи 8
— отражения света 84
— преломления света 88
— радиоактивного распада 140
— Фарадея–Максвелла 48
Зеркало Ллойда 110
Зоны Френеля 114

Излучение индуцированное 132
— спонтанное 132
Изображение действительное 98
— мнимое 86
Импульс электромагнитной волны 72
Индуктивность контура 40
Индукция собственная 30
— магнитного поля 24
Интенсивность излучения 70
Интерференция 106
Интерференционная картина 108
Инфляционная фаза 168
Ионизирующее излучение 150
Источник тока 18

Кварки 156
Когерентные волны 106
Колебательный контур 60
Коричневый карлик 178
Корпускулярно-волновой дуализм 122
Космология 166
Коэффициент размножения нейтронов 144
— трансформации 52
«Красное смещение» галактик 162
Красный гигант 178
— сверхгигант 178
Кривая намагничивания 42
Критическая плотность Вселенной 164

Лавинная ионизация газа 14
Лазер 132
Лептонный заряд 154
Лептоны 154
Линза 94
— рассеивающая 94
— собирающая 94
— тонкая 94
Линии индукции магнитного поля 26
Лупа 104
Луч 84

Магнитная проницаемость среды 42
Магнитное поле 22
— — в веществе 42
— — электрического тока 24
— однородное 30
Магнитные ловушки 36
— полюса 22
Магнитоэлектрическая индукция 68
Масс-спектрограф 34
Мезоны 154
Модель Фридмана 164
Модуляция сигнала амплитудная 80
— — частотная 80
Момент импульса 128
Монохроматическая волна 92
Мощность полезная 54
— реактора 148
— электрического тока 20

Направленная скорость 6
Напряжение 8
Нейтрон 136
Нейтронная звезда 178
Нуклеосинтез 170

Область Оорта 182
Образование галактик 174
— Солнечной системы 180
Обратимость световых лучей 84
Оптическая сила 96

Однородный проводник 104
Оптический микроскоп 104
— телескоп-рефрактор 104
Оптическое усиление 132
Опыт Резерфорда 126
— Юнга 110
Остаточная намагниченность 44

Парамагнетик 42
Переносчики взаимодействий 158
Период полураспада 142
Петля гистерезиса 42
Планетарная модель атома 126
Планетезимали 180
Планковская эпоха 168
Плоскость поляризации 70
Поворотная призма 90
Полное внутреннее отражение 90
Полупроводник *n*-типа 12
— *p*-типа 12
Поперечное увеличение линзы 98
Постоянный магнит 22
— ток 6
Постулат Бора первый 128
— второй 130
Потери мощности 54
Поток жидкости 40
— магнитный 40
Пояс астероидов 182
Правило буравчика для прямого тока 24
— — — витка с током 26
— квантования орбит Бора 130
— левой руки 28
— правой руки для прямого тока 24
Преломление волны 88
Примесная проводимость 64
Принцип Гюйгенса 84
— — — Френеля 114
— Паули 152
— суперпозиции 26
Просветление оптики 110
Протон 136
Протон-протонный цикл 176
Протопланеты 180

Работа выхода 120
Радиационные пояса Земли 36
Радиоактивное семейство урана 142
Радиолокация 76
Радиоприем 76
Радиосвязь 76
Радиотелефонная связь 76
Радиус кривизны линзы 94
— ядра 136
Радиоактивность 140
— естественная 140
— искусственная 144
Радиоактивный распад 140
Размер астрономических структур 160
Разряд дуговой 14
— искровой 14
— самостоятельный 14
— тлеющий 14
Рамка с током в магнитном поле 30
Реликтовое излучение 172
Рентгеновская трубка 134
Рождение пары 152
Ротор 46

Самоиндукция 50
Сила Ампера 28
— Лоренца 32
— оптическая 96
— тока 6
Соединение проводников последовательное 16
— — параллельное 16
— — смешанное 16
Соленоид 50
Соотношение неопределенностей Гейзенберга 124
Сопротивление 8
— емкостное 58
— индуктивное 58
— удельное 8
— электрическое 8
Спектр линейчатый 130
— сплошной 130
— электромагнитных волн 74
Спектральная чувствительность глаза 102
Спин 42

Температурный коэффициент сопротивления 10
Тепловое излучение 118
— действие электрического тока 20
Термоэлектронная эмиссия 14
Термоядерный синтез 150
— — управляемый 150
Ток замыкания 50
— индукционный 50
— размыкания 50
— электрический 6
— смещения 68
Транзистор 66
Трансформатор повышающий 52
— понижающий 52
Триод 14

Угловое увеличение 104
Угол полного внутреннего отражения 88
Удельная энергия связи 138
Уравнение бегущей волны 70
— Эйнштейна для фотоэффекта 120
Условие интерференционных максимумов 108
— — минимумов 108

Фермионы 152
Ферромагнетики 42
— магнито-жесткие 42
— магнито-мягкие 42
Фокусное расстояние 96
Формула линзы 100
Фотоэффект 120
Фронт электромагнитной волны 70
Фундаментальная частица 152

Характерные лучи для собирающей линзы 96
— — — рассеивающей линзы 100

Цепная реакция деления 144
Циклотрон 34

Человеческий глаз 102
Черная дыра 178

ЭДС 18
— индукции 46
Электрический пробой газа 14
Электромагнитная волна 68
— индукция 48
Электронная проводимость полупроводника 64
Элементарная частица 152
Энергия ионизации атома 130
— связи нуклонов 138
Эпоха Великого Объединения 168
— электрослабая 168
Эра адронная 168
— лептонная 168
— кварков 168
Эффект Хаббла 162

Явление насыщения 42
Ядерный реактор 146

Приложение III

Ампер Андре 11

Андерсон Карл 74

Басов Николай Г. 64

Бете Ханс 86

Больцман Людвиг 57

Бор Нильс 62

де Бройль Луи 60

Гамов Георгий 81

Ган Отто 70

Гейгер Ханс 61

Гейзенберг Вернер 60

Геллман Мюррей 76

Генри Джозеф 23

Герц Генрих 23

Гильберт Уильям 9

Гюйгенс Христиан 40

Декарт Рене 9

Джинс Джеймс 85

Джоуль Джеймс 8

Зельдович Яков Б. 85

Койпер Джерард 88

Лебедев Петр Н. 72

Ленц Эмиль Х. 8

Ллойд Хэмфри 53

Лоренц Хендрик 14

Максвелл Джеймс 32

Маркони Гульельмо 36

Марсден Эрнест 61

Оорт Ян 89

Пензиас Арно 84

Планк Макс 57

Попов Александр С. 36

Прохоров Александр М. 64

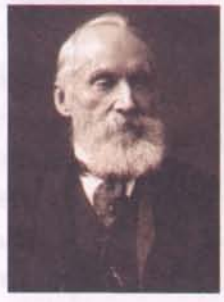
Пуассон Симон-Дени 54

Резерфорд Эрнест 61

Сахаров Андрей Д. 73

Тамм Игорь Е. 73

Таунс Чарльз 64

Томсон Уильям 28


Уилсон Роберт 84

Фарадей Майкл 22

Фейнман Ричард 66

Френель Огюстен 53

Фридман Александр А. 80

Хаббл Эдвин 79

Цвейг Джордж 76

Чедвик Джеймс 66

Штрассман Фритц 70

Эрстед Ханс 10

Юнг Томас 53

Учебное издание

Касьянов Валерий Алексеевич

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ АТЛАС ПО ФИЗИКЕ

11 класс

Издательство «*ЭКЗАМЕН*»

Гигиенический сертификат
№ 77.99.60.953.Д.000454.01.09 от 27.01.2009 г.

Главный редактор *Д.В. Яновский*
Художественный редактор *Л.В. Демьянова*
Технический редактор *Т.В. Фатюхина*
Корректор *И.В. Русанова*
Дизайн обложки *Л.В. Демьянова*
Компьютерная верстка *Н.Н. Балахонцева*

105066, Москва, ул. Нижняя Красносельская, д. 35, стр. 1.
www.examen.biz
E-mail: по общим вопросам: info@examen.biz;
по вопросам реализации: sale@examen.biz
тел./факс 641-00-30 (многоканальный)

Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, том 2; 953005 — книги, брошюры, литература учебная

Отпечатано по технологии CtP
в ОАО «Печатный двор» им. А.М. Горького
197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15

По вопросам реализации обращаться по тел.: 641-00-30 (многоканальный).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ И СОЛНЦА

Тело Солнечной системы	♃ ЮПИТЕР JUPITER	♄ САТУРН SATURN	♅ УРАН URANUS	♆ НЕПТУН NEPTUNE	☉ СОЛНЦЕ HELIOS
Фотография					
Масса (в массах Земли, $м_{\oplus}$)	318	95,2	14,5	17,1	332000
Радиус (в радиусах Земли, $R_{\oplus}$)	11,2	9,5	4,0	3,9	109
Средняя плотность, 10^3 кг/м^3	1,33	0,7	1,32	1,64	1,4
Среднее расстояние от Солнца, а.е.	5,2	9,54	19,2	30,1	-
Среднее расстояние от Солнца, млн. км	778	1426	2869	4,496	-
Звездный период обращения вокруг Солнца, годы	11,86	29, 46	84,01	164,7	-
Средняя орбитальная скорость, км/с	13,1	9,65	6,8	5,43	-
Звездный период вращения вокруг оси	9,93 ч	10,6 ч	17,2 ч	16,1 ч	25,4 д
g, м/с^2	25,8	11,3	9,0	11,6	274
v_{II}, км/с	60,4	36,2	21,4	23,8	620
Температура поверхности, К	125	95	60	60	6000
Наклон оси плоскости орбиты	87°	63,5°	– 8°	61°	82,8°
Число спутников (на 2008 г.)	63	50	27	13	-
Состав атмосферы	H_2 (86%) He (14%)	H_2 (92,4%) He (7,4%) CH_4 (0,2%)	H_2 (84%) He (14%) CH_4 (2%)	H_2 (84%) He (13%) CH_4 (3%)	H_2 (65%) He (35%)

"Иллюстрированный Атлас по физике»" – уникальное учебное пособие, не имеющее аналогов в мировой и отечественной учебной литературе, сочетающее достоинства интересного, доказательного учебника и красочного альбома наглядных иллюстраций, помогающих глубже понять суть физических явлений и легче запомнить их взаимосвязи.

"Иллюстрированный Атлас по физике»" может использоваться как основное учебное пособие для изучения физики на базовом уровне.

Простота и лаконичность изложения курса физики 11 класса делает «Иллюстрированный Атлас по физике» незаменимым при подготовке к контрольным работам, экзаменам и ЕГЭ.

«Атлас» можно использовать совместно с любым УМК, а также как раздаточный материал к учебным таблицам по физике КПСО «СПЕКТР», содержательно включенным в состав «Атласа» к комплектам:

- Физика. 11 класс. Арт. 5-8616-015
- Физика. Постоянный ток. Арт. 5-8623-008
- Физика. Электродинамика. Арт. 2-090-667
- Физика. Магнитное поле. Арт. 5-8669-012
- Физика. Электромагнетизм. Арт. 5-8624-008
- Физика. Излучение и прием электромагнитных волн. Арт. 5-8668-008
- Физика. Геометрическая и волновая оптика. Арт. 5-8670-018
- Физика. Квантовая физика. Арт. 5-8548-008
- Физика. Физика высоких энергий. Арт. 5-8675-012
- Физика. Эволюция Вселенной. Арт. 5-8676-012

ISBN 978-5-377-02835-2

ЭКЗАМЕН