

ВВОДНАЯ ЛЕКЦИЯ ОБЩАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА (конспективно)

1. Общие слова о физике

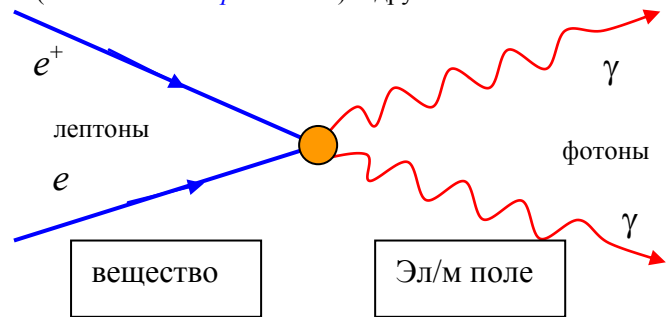
1.1. Физика – раздел естествознания, изучающий наиболее общие свойства и формы движения материи.

Под материей понимается и вещество, и различные поля. Поле и вещество взаимосвязаны.

Примеры вещества: твердые и жидкие тела, атомы и молекулы, электроны, протоны, нейтроны и другие элементарные частицы.

Примеры полей: электромагнитное поле (безмассовые переносчики электромагнитного взаимодействия - кванты поля – *фотоны*), гравитационное поле (кванты поля – *гравитоны*) и другие.

Пример взаимосвязи вещества и поля: аннигиляция электронно-позитронной пары с образованием квантов электромагнитного поля (см рисунок) и обратный аннигиляции процесс – рождение электронно-позитронной пары при взаимодействии кванта света с вакуумом (при наличии дополнительного тела).



1.2. Основные законы (или основные принципы).

В науке важно установить основные *законы* (или основные принципы) при изучении всякого круга явлений. Исходя из них, можно объяснить известные явления и предсказать новые явления. Родоначальником метода принципов был Исаак Ньютон, который установил основные законы механики.

Законы и принципы не выводятся, они не могут быть доказаны логически. Их доказательством является опыт. Отсюда следует, что *физика – наука экспериментальная*.

Законы выражаются в виде количественных соотношений (формулы).

Все физические законы носят *приближенный* характер, они ограничены. Более общие законы содержат в себе менее общие – частные, при этом частные законы и следствия из них могут быть получены из более общих принципов (основных) логическим путем.

1.3. Метод познания в физике.

Построение физики как науки носит модельный характер. При создании моделей принимаются во внимание только существенные для данного круга явлений свойства и связи, и пренебрегается остальными менее существенными.

Когда можно говорить о *появлении науки*? Наука характеризуется созданием принципов, из которых могут быть получены следствия и проверены на опыте. При построении теории или модели явления характерно несущественные связи отбрасывать, оставлять только существенные связи.

Упрощенно можно представить следующую *схему познания* в физике:

на первом этапе изучается физическое явление →
 далее строится физическая модель (или теория) явления →
 в рамках модели проявляются новые черты явления →
 проводится их проверка на опыте (направленная) →
 в процессе проверок происходит уточнение модели →
 появляются новые предсказания →
 снова опыты для проверки предсказаний →
 в модель включается новое, что не описывается старой теорией →
 расширение и уточнение теории →
 сравнение с экспериментом и т.д.

Нильс Бор в 1923 г. выдвинул *Принцип соответствия*, который состоит в следующем. Каждая новая теория, претендующая на более широкую область применимости, чем старая, должна включать последнюю как предельный случай.

2. Фундаментальные взаимодействия

Современные экспериментальные данные свидетельствуют, что существует только **четыре качественно различных вида взаимодействия**. Их называют **фундаментальными взаимодействиями**. Фундаментальные

взаимодействия переносятся квантами – переносчиками взаимодействий. Все остальные силы в нашем мире являются частными проявлениями этих фундаментальных взаимодействий.

В настоящее время большое значение приобретает идея объединения фундаментальных взаимодействий, поэтому, строго говоря, фундаментальных взаимодействий стало меньше. Однако при энергиях, реализующихся в нашей обычной жизни, эти проявления фундаментальных взаимодействий имеют качественные и количественные различия, поэтому рассмотрим их в порядке увеличения интенсивности.

1) *Гравитационное взаимодействие*

Гравитационное взаимодействие присуще всем видам материи, имеет вид притяжения или тяготения и описывается Общей Теорией Относительности (ОТО – Альберт Эйнштейн 1915-16 г.г.). В случае пренебрежения всеми релятивистскими эффектами (т.е. в случае малых скоростей) и рассмотрения слабых стационарных гравитационных полей, ОТО сводится к Ньютонской *теории всемирного тяготения*. Тогда сила и энергия взаимодействия двух точечных частиц с массами m_1 и m_2 определяется:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}, \quad U(r) = G \frac{m_1 m_2}{r}$$

где r – расстояние между частицами, G – *Ньютоновская гравитационная постоянная*, играющая роль константы гравитационного взаимодействия. Константа G равна

$$G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{г}^2 = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

($\text{дин} = \text{г} \cdot \text{см} / \text{с}^2$ и $\text{Н} = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$).

Видно, что энергия взаимодействия убывает достаточно медленно с расстоянием между частицами – обратно пропорционально r . О таких силах, которые убывают с расстоянием обратно пропорционально квадрату расстояния, говорят, как о дальнедействующих силах. Радиус действия таких сил равен бесконечности.

Чтобы говорить о величине взаимодействия (интенсивности) удобно иметь безразмерную константу связи. Чтобы получить такую константу, можно использовать *фундаментальные постоянные*:

$$\text{постоянную Планка} \quad \hbar = 1,05459 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 1,05459 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

(напомним, что $\text{Дж} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ и $\text{эрг} = \text{г} \cdot \text{см}^2 / \text{с}^2$) и

$$\text{скорость света} \quad c = 2,9979 \cdot 10^{10} \text{ см} / \text{с} = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с},$$

а также ввести эталонную массу, например,

$$\text{массу протона} \quad m_p = 1,67265 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Тогда безразмерная константа связи гравитационного взаимодействия равна

$$\frac{G m_p^2}{\hbar c} \sim 6 \cdot 10^{-39},$$

что, конечно, является очень малой величиной. Гравитационные взаимодействия ответственны за силу тяготения на Земле, за образование звезд, планет, планетарных и звездных систем, галактик.

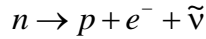
В квантовой теории тяготения переносчиками гравитационного взаимодействия являются *гравитоны* (или гравитационные волны) – безмассовые частицы $m_G = 0$. Гравитационные волны предсказываются *общей теорией относительности* и многими другими теориями гравитации, но ввиду их чрезвычайной малости не были зарегистрированы в течение 100 лет со времени их предсказания Эйнштейном.

14 сентября 2015 года в 5:51 утра по времени восточного побережья США коллаборация LIGO, в которую входят более 1000 человек (из 16 стран, в том числе из России), впервые наблюдала колебания пространства-времени — гравитационные волны, дошедшие до Земли от катастрофы, произошедшей далеко во Вселенной. Физики утверждают, что гравитационные волны возникли в результате слияния двух черных дыр и образования одной более массивной вращающейся черной дыры. Ранее столкновения двух черных дыр никогда не наблюдалось. Это открытие подтверждает одно из важных положений общей теории относительности Эйнштейна.

2) *Слабое взаимодействие.*

Слабые взаимодействия присущи всем элементарным частицам (кроме фотона, гравитона). Они ответственны за распад элементарных частиц, причем за счет этих сил происходит нарушение пространственной четности. Характерно, что, если в каком-либо процессе появляется или участвует элементарная частица *нейтрино* (или *антинейтрино*), то взаимодействие, определяющее этот процесс,

является слабым. Типичный пример: распад нейтрона (β -распад нейтрона) на протон, электрон и антинейтрино:



Существуют также слабые взаимодействия, не сопровождающиеся участием нейтрино или антинейтрино. Интенсивность слабого взаимодействия характеризуется константой связи Ферми G_F . Она размерная и, чтобы образовать безразмерную величину, необходимо использовать какую-нибудь эталонную массу, например, массу протона m_p ($1.67265 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1.67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$). Тогда безразмерная константа связи слабого взаимодействия будет равна

$$G_F m_p^2 \sim 10^{-5}.$$

Видно, что слабое взаимодействие гораздо интенсивнее гравитационного, однако, с другой стороны, оно является самым слабым взаимодействием, которое проявляется в распадах элементарных частиц.

Слабое взаимодействие в отличие от гравитационного является короткодействующим, характерный радиус действия сил $r \leq 10^{-15} \text{ см}$. Переносчиками слабых взаимодействий являются частицы конечной массы – заряженные W^\pm - *бозоны* и нейтральные Z^0 - *бозоны*. Это элементарные частицы со спином 1 и массами, равными по порядку величины $100m_p$ или $160000m_e$. Масса электрона $9.1095 \cdot 10^{-28} \text{ г}$. Если взять в качестве эталонной массы массу электрона, то безразмерная константа слабого взаимодействия примерно равна $G_F m_e^2 \sim 10^{-10}$.

Примечание 1. Можно оценить массу W - бозона, исходя из соотношения неопределенностей $pr \sim \hbar$, где $r \sim 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}$ - радиус действия сил и скорости движения бозона близкой к скорости света:

$$m_w \sim \frac{p}{c} \sim \frac{\hbar}{rc} \sim \frac{1.05 \cdot 10^{-27}}{2 \cdot 10^{-16} \cdot 3 \cdot 10^{10}} \sim 1.6 \cdot 10^{-22} \text{ г}.$$

3) Электромагнитное взаимодействие.

Электромагнитные взаимодействия проявляются при взаимодействии зарядов, магнитных моментов (токов) и электромагнитных полей. Они осуществляются квантами электромагнитного поля – *фотонами* (частицы-волны с массой покоя $m_\gamma = 0$).

Простейший пример: два покоящихся заряда q_1 и q_2 взаимодействуют с силой (сила Кулона)

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}; \quad \vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$

где r – расстояние между ними. Это означает, что взаимодействие является дальнедействующим (радиус действия сил $r \sim \infty$). Классическая теория электромагнитного взаимодействия является электродинамикой Максвелла. В качестве константы связи служит *заряд электрона* как минимальный обнаруженный заряд свободной частицы

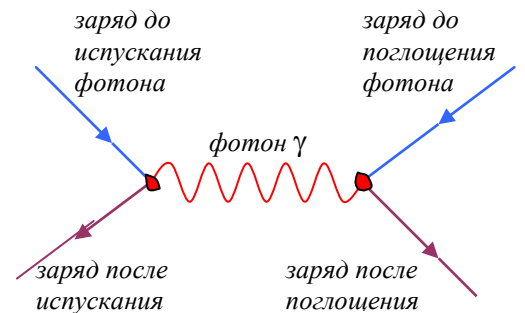
$$e = 4.8032 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГС} = 1.60219 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

В квантовой теории переносчиком электромагнитного взаимодействия является *фотон*, безмассовая частица со спином 1. Квантовое электромагнитное взаимодействие 2-х зарядов изображается следующим образом: заряд испускает фотон, в силу чего его состояние изменяется. Другой заряд поглощает этот фотон и также изменяет свое состояние.

Удобно ввести безразмерную константу связи электромагнитного взаимодействия, для чего используем фундаментальные постоянные \hbar и c . Эта константа называется *постоянной тонкой структуры*:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

Таким образом, безразмерная константа электромагнитного взаимодействия $\sim 10^{-2}$. Это означает, что электромагнитное взаимодействие значительно сильнее слабого и гравитационного взаимодействия.



С современной точки зрения электромагнитное и слабое взаимодействия представляют собой различные стороны единого *электрослабого взаимодействия*. Создана объединенная теория электрослабого взаимодействия – теория Вайнберга- Салама- Глэшоу, объясняющая с единых позиций все аспекты электромагнитных и слабых взаимодействий. Пока энергии взаимодействия достаточно малы электромагнитное и слабое взаимодействия отделены и не влияют друг на друга. С ростом энергии начинается их взаимовлияние, и при достаточно больших энергиях эти взаимодействия сливаются в единое. Характерная энергия объединения оценивается по порядку величины как $10^2 \text{ ГэВ} = 10^{11} \text{ эВ}$ (электронвольт $\rightarrow 1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Для сравнения отметим, что энергия связи атома водорода $\sim 10^{-8} \text{ ГэВ}$, а энергия связи атомного ядра $\sim 10^{-2} \text{ ГэВ}$ существенно меньше характерной энергии объединения. По этой причине электромагнитное и слабое взаимодействия не проявляют в обычных физических явлениях своей единой сущности.

4) *Сильное взаимодействие.*

Сильное взаимодействие ответственно за устойчивость атомных ядер, проявляются в ядерных реакциях, т.е. описывают взаимодействие между *нуклонами* и *гиперонами* (*адроны* – сильно взаимодействующие элементарные частицы n, p, λ, \dots). Сильное взаимодействие зарядонезависимое, т.е. одинаково для протонов и нейтронов.

Классическая квантовая теория ядра описывала сильные взаимодействия как обмен π - *мезонами*. Поскольку масса π - мезона конечная, то и радиус действия ядерных сил конечен $r \leq 10^{-13} \text{ см}$. Безразмерная *константа сильного взаимодействия* ~ 1 , т.е. сильное взаимодействие является, в самом деле, наиболее сильным из всех фундаментальных взаимодействий.

Примечание 2. Оценка массы π - мезона. Пользуясь волной де Бройля, укладываемой на орбите одного нуклона вокруг другого или, что то же самое, соотношением неопределенностей, имеем:

$$m_{\pi} \sim \frac{p}{c} \sim \frac{\hbar}{cr} \approx \frac{1.05 \cdot 10^{-27}}{3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-13}} \approx 0.3 \cdot 10^{-24} \text{ г} \approx 300m_e$$

Современная квантовая теория – *квантовая хромодинамика*. Согласно этой теории, все адроны состоят из кварков. *Кварки* – элементарные частицы со спином $1/2$, ненулевой массы и с дробным электрическим зарядом по отношению к электронному заряду. Кварки формируются в три пары (дублеты) и записываются парами в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

Каждый тип кварков принято называть *ароматом* (6 ароматов). При этом u -, c -, t - кварки имеют электрический заряд $\frac{2}{3}|e|$, а d -, s -, b - кварки $-\frac{1}{3}|e|$. Кроме того, каждый кварк (каждый аромат) может обладать разным *цветом* (так называют их различные характеристики – квантовые числа). Их три: желтый, синий и красный. Каждому кварку соответствует *антикварк*, имеющий по отношению к данному кварку, противоположный электрический заряд и антицвет. Итого существует 36 кварков и антикварков.

Силы между кварками осуществляются квантами сильных взаимодействий – *глюонами* (переносчики сильных взаимодействий со спином 1 и массой равной 0). При этом в процессе взаимодействия цвета кварков могут меняться. Все наблюдаемые частицы (адроны) – бесцветны, т.е. они есть объединение как минимум 3-х разноцветных кварков. Мезоны также бесцветные частицы, но они образуются двумя кварками с одним цветом и антицветом.

Отличительная черта кварк-кваркового взаимодействия через глюоны состоит в том, что с уменьшением расстояния между кварками их взаимодействие ослабляется, а с ростом расстояния растет. Внутри адрона кварки можно рассматривать как свободные частицы (понятие *асимптотической свободы*), но они не могут вылетать из адронов. Поэтому одиночные кварки и глюоны, как частицы, обладающие цветом, не могут существовать как свободные частицы. Явление удержания элементарных частиц, обладающих цветом, внутри адронов получило название *конфайнмента*.

В настоящее время существует тенденция объединения всех фундаментальных взаимодействий в одно с единой константой. Создана модель *великого объединения*, в рамках которой объединяются сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия и при этом характерная энергия объединения оказывается $\sim 10^{15} \text{ ГэВ}$.

Отметим, что наибольшая энергия, достижимая на современных ускорителях, не превышает 10^3 ГэВ. Проблема объединения всех фундаментальных взаимодействий остается открытой.

4. Кратко об общей картине мира

Согласно физическим представлениям о мире получаем следующую иерархию объектов по мере уменьшения их размеров:

Вселенная → Галактики → Звезды и звездные системы → Планеты → Макротела → Микроструктуры → Макромолекулы → Наноструктуры → Молекулы и атомы → Ядра → Элементарные частицы.

4.1. Предельные размеры и времена жизни изучаемых объектов

- 1) Размер Вселенной 10^{28} см = 10^{10} световых лет \Leftrightarrow радиус элементарных частиц 10^{-17} см. (1 световой год равен $\approx 10^{18}$ см).
Единица расстояния 1 Парсек = $3.0857 \cdot 10^{18}$ см.
- 2) Времена: время жизни Вселенной 10^{10} лет \Leftrightarrow время жизни некоторых частиц и резонансов $10^{-24} \div 10^{-25}$ с.
- 3) Массы: масса млечного пути (галактика) $4 \cdot 10^{44}$ г \Leftrightarrow масса Солнца $2 \cdot 10^{33}$ г \Leftrightarrow масса электрона $0.91 \cdot 10^{-27}$ г.
- 4) Размер Вселенной $\sim 10^{28}$ см, возраст $\sim 10^{18}$ секунд.
- 5) Число атомов в видимой части Вселенной $\sim 10^{80} \div 10^{82}$. Число атомов в Солнце $\sim 10^{57}$, Земли $\sim 4 \cdot 10^{51}$.
- 6) Общее число звезд $\sim 10^{23}$, в нашей Галактике $\sim 10^{11}$.
- 7) Средняя плотность вещества $\rho \sim 10^{-30}$ г/см³.
- 8) Галактики и метagalктики.
- 9) Образование Вселенной – взрыв – особая точка.
- 10) Открыта вспышка сверхновой звезды – 23 февраля 1987г

4.2. Макрофизика

Космофизика – за последние 20 лет произошла подлинная революция, обнаружены интереснейшие объекты.

А) *Нейтронные звезды* – состоят в основном из нейтронов, образуются в результате гравитационного коллапса: средняя плотность $\rho \sim 2 \cdot 10^{17}$ кг/м³, средний радиус $r \sim 20$ км, масса $M < 2M_{\odot}$. Черные дыры – особые сильно сжатые объекты, нейтронные звезды, которые поглощают все, что на них попадает.

Б) *Пульсары* – нейтронные звезды, испускающие импульсное излучение (за счет аккреции вещества).

В) *Барстеры* – двойные системы (звезда + нейтронная звезда) с периодическим излучением в рентгеновской области.

Г) *Квazarы* – объекты, обладающие самым мощным излучением (в основном в радиодиапазоне) во Вселенной. Размер квазаров – несколько парсек.

Вселенная замкнута или нет? Это вопрос остается открытым до настоящего времени. Более того, последние измерения скорости разбегания галактик приводят к новым загадочным явлениям во Вселенной.

Тёмная материя в астрономии и космологии — это гипотетическая форма материи, которая не испускает **электромагнитного излучения** и не взаимодействует с ним. Это свойство данной формы вещества делает невозможным её прямое наблюдение. Однако возможно обнаружить присутствие тёмной материи по создаваемым ею **гравитационным эффектам**. Обнаружение тёмной материи поможет решить проблему **скрытой массы**, которая, в частности, заключается в аномально быстрой скорости вращения внешних областей **галактик**.

Тёмная энергия (*dark energy*) в космологии — феномен, объясняющий факт, что Вселенная расширяется с ускорением. На основании проведённых в конце 1990-х годов наблюдений **сверхновых звёзд** типа Ia был сделан вывод, что расширение Вселенной ускоряется со временем. Затем эти наблюдения были подкреплены другими источниками: измерениями **реликтового излучения**, **гравитационного линзирования**, **нуклеосинтеза Большого Взрыва**.

Существует два варианта объяснения сущности тёмной энергии:

- тёмная энергия есть *космологическая константа* — неизменная энергетическая плотность, равномерно заполняющая пространство *Вселенной* (другими словами, постулируется ненулевая энергия вакуума);
- тёмная энергия есть некая квинтэссенция — динамическое поле, энергетическая плотность которого может меняться в *пространстве* и *времени*.

Окончательный выбор между двумя вариантами требует высокоточных измерений скорости расширения Вселенной, чтобы понять, как эта скорость изменяется со временем. Темпы расширения Вселенной описываются *космологическим уравнением состояния*. Разрешение уравнения состояния для тёмной энергии является одной из самых насущных задач современной наблюдательной космологии.

Тёмная энергия также должна составлять значительную часть так называемой *скрытой массы* Вселенной.

4.3. Микрофизика

За последние 20-25 лет в микрофизике также произошла революция, поменялись многие привычные представления в цепочке:

А Т О М \Rightarrow Я Д Р О \Rightarrow ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

(доп. литература: Л.И.Сарычева “Структура материи”. Соросовский общеобразовательный журнал 2000, т.6, с. 113-120).

Элементарные частицы. Стандартная модель.

Свойства бозона Хиггса

Бозон Хиггса, Хиггсовский бозон, хиггсбон (*Higgs boson*) – элементарная частица (бозон), квант поля Хиггса, с необходимостью возникающий в Стандартной модели физики элементарных частиц вследствие хиггсовского механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии. В рамках этой модели отвечает за инертную массу элементарных частиц. По построению хиггсовский бозон является скалярной частицей, то есть обладает нулевым спином.

Постулирован британским физиком Питером Хиггсом в его фундаментальных статьях, вышедших в 1964 году. Предсказанный первоначально в теории, после нескольких десятков лет поисков, 4 июля 2012 года, в результате исследований на БАК, был обнаружен кандидат на его роль — новая частица с массой около 125—126 ГэВ/c². Имелись веские основания считать, что эта частица является бозоном Хиггса. В марте 2013 года появились сообщения от отдельных исследователей ЦЕРНа, что найденная полугодом ранее частица действительно является бозоном Хиггса.

В апреле 2014 года коллаборация CMS сообщила, что ширина распада этого бозона меньше 17 МэВ. Обладает нулевыми спином, электрическим зарядом, цветным зарядом.

Стандартная модель предсказывает существование поля (называемого Поле Хиггса), которое имеет ненулевую амплитуду в основном состоянии, то есть ненулевое вакуумное ожидаемое значение. Существование ненулевого вакуумного ожидаемого значения приводит к спонтанному нарушению электрослабой калибровочной симметрии (см. хиггсовский механизм).

5. Проблемы в современной физике

- 1) Единая теория поля. Связанная с этим проблема квантования пространства, т.е. наличие фундаментальной длины.
- 2) Теория физического вакуума.
- 3) Космология – настоящее и будущее Вселенной.
- 4) Проблема темной материи и темной энергии.
- 5) Масса нейтрино.
- 6) Термоядерный синтез (энергетика будущего).
- 7) Высокотемпературная сверхпроводимость. Скачок произошел в 86-87 гг., когда нашли соединения (керамические соединения) с температурой сверхпроводящего перехода ~ 90 К.
- 8) Лазеры высоких энергий.
- 9) Поведение вещества в сверхсильных полях.
- 10) Создание новых материалов с заданными свойствами.
- 11) Кластеры и фуллерены.
- 12) Наночастицы, наноструктуры, нанотехнологии.
- 13) Атомные ячейки памяти.
- 14) Физика открытых систем.
- 15) И другие

