

Что такое

Физика Элементарных Частиц ?

(она же Физика Высоких Энергий)

Я.И. Азимов (ПИЯФ)

Школа ФКС-2015

Источник : из чего ВСЁ ?

- Предметы вокруг нас

погружаясь вглубь материи, обнаружим

- Молекулы

- Атомы («неделимые» ?)

В течение долгого времени

удобный инструмент для химиков,

но лишь гипотеза для физиков.

Дошли до дна ?

Серия открытий

- Открытие катодных лучей:
электроны (1897) (вырваны из атомов?)
- Открытие радиоактивности
(трансмутация элементов)
- Атомы имеют структуру !
(1904, модель Томсона;
1911, планетарная модель Резерфорда)

На этом уровне работает ФКС.

Дальше вглубь атома

- Трансмутация указывает, что и ядро имеет структуру (что может быть внутри него ?)
- Есть две частицы (элементарные?) :
 - протон (ядро водорода) – заряд +1, масса 1 а.е.
 - электрон - заряд -1, масса 1/2000 а.е.
- Резерфорд выбил протон из ядра азота (1919) (1-е расщепление ядра !)
- Вывод: внутри ядра есть протоны !

Простая и (вроде бы) красивая картина :

- Ядро содержит протоны и электроны.
- Протоны обеспечивают массу ядра.
- Электроны компенсируют часть заряда ядра.
- Остальной заряд ядра компенсирует оболочка.

На новом уровне возобновлена
старая гипотеза Праута (1816) :

все атомы составлены из атомов водорода

Теперь, наконец, дошли до дна ?

Остались «мутные пятнышки» :

- Положительный заряд тяжёлый, отрицательный заряд лёгкий. Почему?
- Какие силы держат протоны и электроны в ядре ?
(радиус атома $\sim 10^{-8}$ см, а ядра $\leq 10^{-12}$ см)
- Спектры α и γ дискретны, как у атома; спектр β сплошной. Несохранение энергии?
- Ядро азота должно содержать 14 протонов и 7 электронов $\rightarrow$ спин полуцелый; эксперимент даёт спин 1 («азотная катастрофа»).

«Протирка пятнышек»
сделала их «окнами»
в прежде скрытый,
совершенно **новый мир**.

Совершенно **неожиданный мир**,
который до того **никак не проявлялся**
и о существовании которого
никто даже не догадывался !

Новая серия открытий

- Уравнение **Дирака** (1928) предсказало (1930) существование античастиц:
 - положительного электрона (**позитрона**),
открыт в 1932 в космических лучах;
 - отрицательного протона (**антипротона**),
открыт в 1957 на ускорителе.
- Гипотеза **Паули** (1930): в β -распаде вылетает еще одна частица, нейтральная и легкая («нейтрон» Паули $\rightarrow$ нейтрино Ферми) ;
позволила **Ферми** построить теорию β -распада.
Прямое наблюдение **нейтрино** удалось лишь в 1956.

Новая серия открытий

- Чедвик открыл (1932) нейтрон.

Он предсказывался Резерфордом как ядро из протона и электрона, а оказался нейтральным и нестабильным аналогом протона (вместе нуклоны).

Стало ясно, что в ядре нейтроны (а не эл-ны).

- Тамм показал, что обмен парами (e , ν) порождает силы между протонами и нейтронами, (увы, недостаточные для удержания в ядре).
- Юкава оценил (1935) свойства частицы, обмен которой мог бы описать ядерные силы, предсказал ее массу ($\sim 200 m_e$); назвал мезотроном (теперь «мезон»).

Новая серия открытий

- Уже в 1936 в космических лучах нашли (нестабильную) частицу с подходящей массой. Назвали μ -мезотрон (μ -мезон). Но изучение его свойств показало, что это (всего-навсего) «тяжелый электрон» !?! (Теперь называют мюоном.)

«Кому и зачем это нужно ?»

- Дальнейшее изучение «скрытого мира» было задержано войной. Но после нее, в 1947, опять в космических лучах, все же нашлась «правильная» частица Юкавы - π -мезон, с близкой массой. Распадается $\pi \rightarrow \mu \nu$.

С тех пор объем знаний резко вырос.

Таблица 2014 г. содержит почти 1000 частиц.

Большинство из них имеют внутреннюю структуру, но считаются «элементарными» (ср. «атомы»).

Почти все нестабильны. Времена жизни меняются от 17 мин. (нейтрон) до 2.6×10^{-25} сек. (Z-бозон).

Вполне стабильны (с современной точностью) лишь протон, электрон, фотон и, может быть, нейтрино.

Значительная часть данных получена на ускорителях.

Отсюда 2-е название: «Физика Высоких Энергий».

Но по-прежнему важны исследования на реакторах и в космических лучах.

Все данные резюмируются Стандартной Моделью.

Стандартная Модель

Есть 3 «поколения»

точечных ($r < 10^{-17}$ см) фермионов ($S=1/2$).

В каждом поколении два лептона («родственники электрона»),
заряженный и нейтральный (нейтрино), и два кварка,
один с зарядом $+2/3$, другой с зарядом $-1/3$ (!!!),

Все они дополняются античастицами.

1-е поколение:

e^- (0.5 МэВ), ν_e ; u (~ 2 МэВ), d (~ 5 МэВ).

2-е поколение:

μ^- (105 МэВ), ν_μ ; c (~ 1.3 ГэВ), s (~ 100 МэВ).

3-е поколение:

τ^- (1777 МэВ), ν_τ ; t (176 ГэВ), b (~ 4.5 ГэВ).

Все нейтрино имеют массу < 0.2 эВ.

Стандартная Модель

Известны несколько типов взаимодействий:

- **Гравитация** очень важна в макромире, но в микромире практически не проявляется.
- **Электромагнитные взаимодействия**. В них участвуют все заряженные частицы (в частности, заряженные лептоны и кварки), а также нейтральные частицы, если они составлены из заряженных частей. Переносчик - **фотон γ** .
- **Слабые взаимодействия**. В них участвуют все лептоны и кварки. Переносчики - нейтральный массивный Z-бозон и заряженные массивные **W-бозоны**. Поэтому должны описываться совместно с электромагнетизмом (**электрослабые взаимодействия**). Необходимый элемент - **бозон(ы) Энглера-Браута-Хиггса** (см. лекцию ФКС-2014).

Стандартная Модель

- **Сильные взаимодействия.** В них участвуют только кварки. Каждый кварк несет трехзначное квантовое число – «цвет», преобразующееся по группе **SU(3)**. Взаимодействие описывается **Квантовой Хромодинамикой** – неабелевой локально-калибровочной теорией поля с цветовой группой **SU(3)**. Переносчики взаимодействия, **глюоны**, имеют 8 цветовых состояний. Теория сложная, нелинейная, и не все ее следствия поняты.
- Есть две группы сильно-взаимодействующих частиц (адронов): мезоны (из кварка и антикварка) и барионы (из 3-х кварков; в обоих случаях возможны добавочные глюоны и/или кварк-антикварковые пары).

Стандартная Модель

- Все адроны, наблюдаемые в природе, бесцветны. Это подсказывает, что цветные объекты не могут быть изолированы:
невылетание цвета (конфайнмент).
Вывести это свойство теоретически из **КХД** пока (?) не удалось !

Стандартная Модель

- Все переносчики (γ , W , Z , глюоны) - векторные.
Бозоны ЭБХ - бесспиновые (скалярные).
- Сильные и электромагнитные взаимодействия сохраняют симметрии относительно отражения пространства P , зарядового сопряжения C и обращения времени T .
- Слабое взаимодействие сохраняет лишь комбинацию CPT .
КХД могла бы нарушить T , но эффект не обнаружен.

Является ли Стандартная Модель
последним словом Природы ?

Стандартная Модель

- Теория предлагает различные пути выхода за Стандартную Модель.
- Эксперимент (пока ?) не подтверждает ни один из них.
Но...
- Если существует Темная Материя, то выход неизбежен (альтернативой могла бы быть модификация ОТО).
- Если существует стерильное нейтрино (или несколько их), то существуют новые взаимодействия, не учтенные в СМ.

Поиски и исследования продолжаются.

Применения Физики Частиц

Выдержка из Большой Советской Энциклопедии

****** год издания*

..... Продукт реакции мезонов, тиратронов, гиперонов, клистронов, экситонов, мегатронов и позитронов.

*Выделяющаяся энергия равна ***** электрон-вольт.*

Применяется в сельском хозяйстве для уничтожения вредителей.

Применения Физики Частиц

Выдержка из Большой Советской Энциклопедии

****** год издания*

..... Продукт реакции мезонов, тиратронов, гиперонов, клистронов, экситонов, мегатронов и позитронов.

*Выделяющаяся энергия равна ***** электрон-вольт.*

Применяется в сельском хозяйстве для уничтожения вредителей.

Выдержка из пародии на братьев Стругацких.

Применения Физики Частиц

В 1935 (после открытия нейтрона !) **А.Ф.Иоффе** подвергся жесткой критике на заседании АН СССР за то, что допустил в ЛФТИ проведение работ по физике ядра, которые никогда не смогут применяться в технике.

Это с еще большим правом казалось бы правильным для **Физики Элементарных Частиц**.

Но применения находятся, на уровне
и **«отходов производства»**,
и **сопутствующих идей**.

Применения Физики Частиц

- Промышленные ускорители (например, для дефектоскопии, для напыления покрытий и т.д.).
- Нейтронный каротаж (при поисках нефти и т.п.)
- Компьютерная томография (особенно, в медицине).
- Применение мюонов (в частности, μ SR) для изучения структуры материалов и хода химических реакций.
- Просвечивание Земли нейтринными пучками.
- Дистанционный анализ работы реакторов по их нейтринному излучению (в частности, для целей нераспространения ядерного оружия).
- Интернет сейчас отождествляют с Всемирной Паутиной (World Wide Web), придуманной для обеспечения работы современных Коллабораций в ФВЭ.

Контакты ФЭЧ с другими областями

Атомная физика

- Развитие сверхточной спектроскопии
для поисков эффектов несохранения четности P ,
для поисков электрического дипольного момента
электрона (несохранение CP).

Контакты ФЭЧ с другими областями

Физика атомного ядра

До 1956 ФЭЧ развивалась как часть Физики Ядра. Сейчас они разделены, но контактов так много, что организована специальная серия регулярных конференций CIPANP (Conferences on the Intersections of Particle And Nuclear Physics).

.

Контакты ФЭЧ с другими областями

Астрофизика

- Ранняя Вселенная.
- Барионная (и лептонная) асимметрия Вселенной
- Взрывы Сверхновых (роль нейтрино).
- Нейтронные звезды.
- Природа и свойства космических лучей.
- Природа и свойства Темной Материи.
- Природа и свойства Темной Энергии.

Контакты ФЭЧ с другими областями

ФКС

- Сходство теоретического аппарата:
Вторичное квантование;
Квантовая Теория Поля:
релятивистская (ФЭЧ) - нерелятивистская (ФКС);
Уравнение Дирака:
для релятивистского электрона (ФЭЧ)
- для электрона в графене (ФКС) .
- Сходство понятий (и объектов):
античастицы (ФЭЧ) - дырки (ФКС);
Майорановская частица (ФЭЧ) - нулевая мода
в бесщелевом сверхпроводнике (ФКС).

Контакты ФЭЧ с другими областями

Да здравствует
расширение контактов !

Спасибо за внимание