

Физика элементарных частиц

С точки зрения экспериментатора

Смирнова Лидия Николаевна,
профессор, доктор физ.-мат. наук

Личное участие : методики и эксперименты

- искровые камеры
- ядерные фотоэмульсии
- большие пузырьковые камеры – 2-м пропановая камера ОИЯИ, жидководородная камера «Мирабель», 15-футовая камера ФНАЛ
- Европейский Гибридный Спектрометр EHS
- LHC - ATLAS – эксперимент на Большом адронном коллайдере ЦЕРН, Женева, Швейцария

Введение

- 1. Физику движет эксперимент - пример: открытие электрона; открытие атомного ядра - Резерфорд 1911г. , и т.д.
- Предсказательная способность теории движет эксперимент - открытие слабых токов (1973г.), тяжелых кварков: с- 1974г., b- 1977г., t- 1995г.
- Изменился характер эксперимента - от лабораторного к индустриальному, современная лаборатория физики высоких энергий это ускорительный комплекс с детектирующими установками

Особенности современных методик:

- Физика на расстоянии - с середины 20 века, начало положено обработкой данных с больших пузырьковых камер, современное состояние - система распределенных вычислений ГРИД, интернет
- Следствие - унификация подходов, повышение конкурентности при общем снижении роли индивида, администрирование, НО одновременно **повышение возможности проявления личности, ее продвижения роста - ГЛОБАЛИЗАЦИЯ**
- В итоге : **Учиться в МГУ - работать всюду!**

Что называем элементарными частицами

или просто

« частицами»

Кварки, лептоны, калибровочные бозоны, хиггсовские бозоны



γ , g , W^\pm , Z^0 , H^\pm , H^0 , A^0

Понятие элементарной частицы

Стандартная модель предполагает элементарными кварки, лептоны и калибровочные бозоны.

Кварки и лептоны - фермионы со спином $1/2$,

Калибровочные бозоны имеют спин 1: γ , g , W^\pm , Z^0

Калибровочные бозоны

		МАССА	Ширина
γ		менее $2 \cdot 10^{-16}$ эВ	стабилен
g	цвет	0 (теоретически)	-
W^\pm		80 ГэВ	2,12 ГэВ
Z^0		91 ГэВ	2,5 ГэВ

Лептоны

Тип	Электрон - e	Мюон - μ	Тау-лептон (τ - лептон)
масса	0,5 МэВ	105,7 МэВ	1,777ГэВ
эл. заряд	-1 (+1)	-1 (+1)	-1 (+1)
Тип	Электронное ν_e	Мюонное ν_μ	τ - нейтрино ν_τ
масса	$< 15 \cdot 10^{-6}$ МэВ	$< 0,17$ МэВ	< 19 МэВ
эл. заряд	0	0	0
СПИН	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

Кварки

Аромат Масса свободная Масса конституентная Заряд Барионное число

u верхний	1,5-3 МэВ	0,33 ГэВ	+2/3	1/3
d нижний	3-7 МэВ	0,33 ГэВ	-1/3	1/3
c очарованный	$1,25 \pm 0,09$ ГэВ	1,5 ГэВ	+2/3	1/3
s странный	$0,095 \pm 0,025$ ГэВ	0,5 ГэВ	-1/3	1/3
t топ		175 ГэВ	+2/3	1/3
b красивый		4,5 ГэВ	-1/3	1/3

Частицы с дробным электрическим зарядом не наблюдались как свободные частицы. Т.е. кварки, в отличие от лептонов, наблюдаются в виде кластеров (мезонов, барионов) с целочисленным зарядом.

Отсутствие кварков в свободном состоянии делает проблематичным определение их массы.

Конституентная масса определяется как средняя энергия кварка, связанного в адроне.

Свободная (или «токовая») масса кварка проявляется в жестких процессах, т.е. в процессах с большими передачами импульса, т.к. входит в кварковые токи, и определяется экспериментально.

Бесцветные комбинации кварков составляют мезоны ($q\bar{q}$) и барионы (qqq),

Комбинации барионов составляют ядра

Померон - объект, состоящий из глюонов g

Типы взаимодействий: сильное

электромагнитное

слабое

- Включены в Стандартную модель

(гравитационное)

Современные коллайдеры

Коллайдеры $\tilde{p}p$, pp и $e p$

Название ускорителя	Сталкивающиеся частицы	Период эксплуатации	Энергии сталкивающихся частиц,	Светимость $L, \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Тэватрон	$\tilde{p}p$	1987– 2009?	980 ГэВ	$5 \cdot 10^{31}$
HERA	$e p$	1992 – 2007?	$e - 30 \text{ ГэВ}$ $p - 920 \text{ ГэВ}$	$7,5 \cdot 10^{31}$
RICH	$pp,$ $\text{AuAu}, d \text{ Au}$	2000 –	100 ГэВ, 100ГэВ/n	$6 \cdot 10^{30}$ $4 \cdot 10^{26}, 7 \cdot 10^{28}$
LHC (БАК)	$pp,$ Pb Pb	2008 –	7 ТэВ 2,76 ТэВ/n	10^{34} 10^{27}

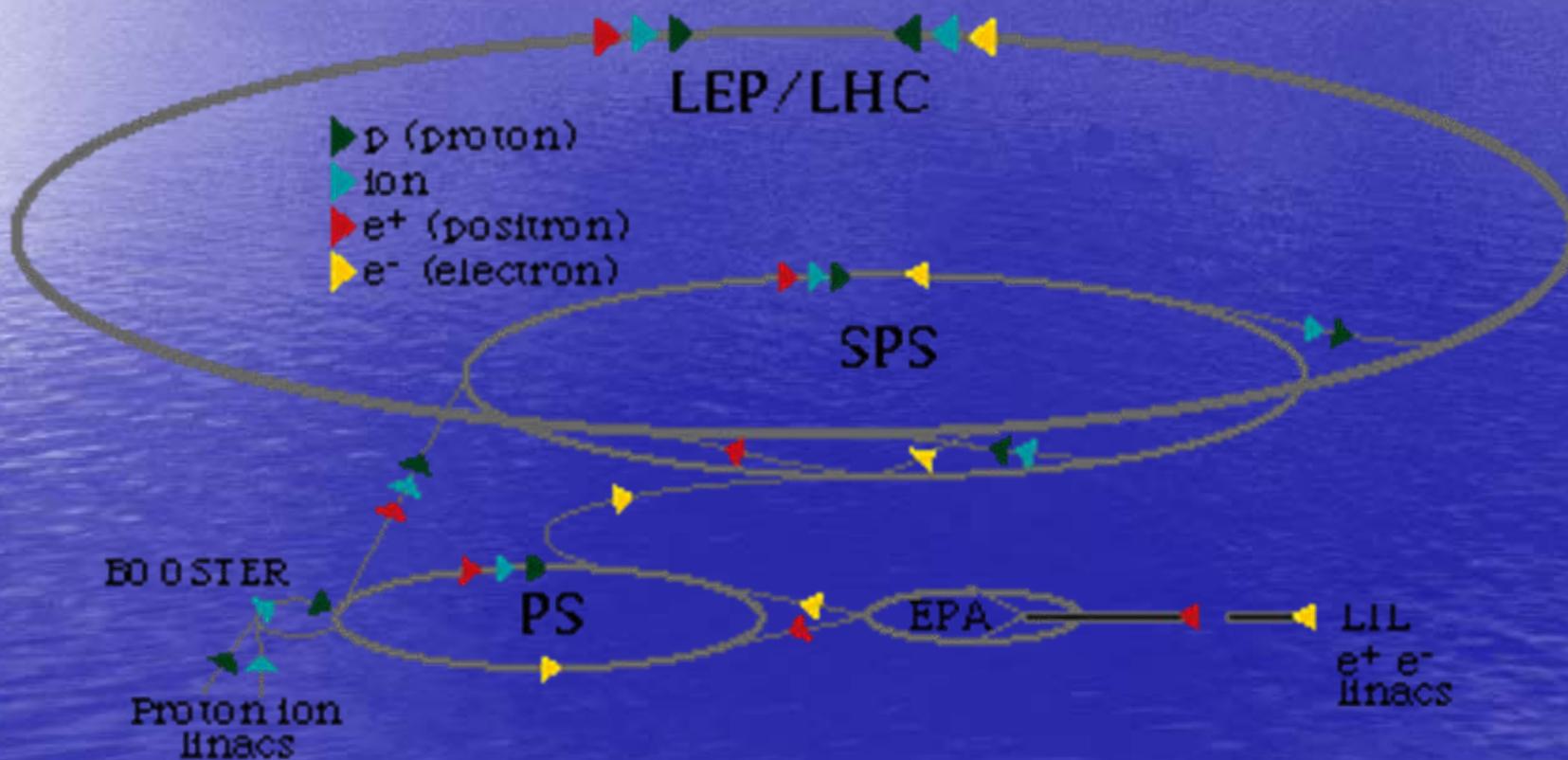
Современные коллайдеры

Коллайдеры e^+e^- высокой энергии

Размещение ускорителя	Название ускорителя	Начало эксплуатации	Энергии сталкивающихся частиц,	Светимость L , $10^{30\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}}$
Новосибирск	VEPP - 2000	2006	1 ГэВ	100
Новосибирск	VEPP – 4М	1994	6 ГэВ	20
Китай	БЕРС	1989	2,2 ГэВ	12,6 макс
Китай	БЕРС-II	2007	1,89 ГэВ	1000
Фраскати	DAΦNE	1999	0,7 ГэВ	150
Корнель	CERS-C	2002	6 ГэВ	60 макс
КЕК (Япония)	КЕКВ	1999	$8 e^- \times 3,5 e^+$ ГэВ	16270
SLAC (США)	PEP-II	1999	e^- 7-12 ГэВ, e^+ 2,5-4 ГэВ	10025
LEP, ЦЕРН	pp, Pb Pb	2008 –	101 ГэВ в 1999г.	24 at Z^0

Ускорительный комплекс ЦЕРН

Женева, Швейцария



Общий вид тоннеля ускорителя LHC

News on the LHC Schedule, as presented at the June CERN Council Week



Частота событий на коллайдерах

$$\Delta N / \Delta t = L \cdot \sigma_{\text{вз}}$$

L – светимость

$\sigma_{\text{вз}}$ – сечение взаимодействия частиц

$$L = f \cdot n_1 n_2 / 4\pi \sigma_x \sigma_y$$

n_1, n_2 – количество частиц в сталкивающихся сгустках

σ_x, σ_y – дисперсии Гауссова распределения частиц в плоскостях горизонтальной и вертикальной

f – частота соударений сгустков частиц

Сечения взаимодействий частиц

Вероятность взаимодействия частиц определяется сечением взаимодействия - геометрический смысл $\rightarrow \text{см}^2$,
или барн (б) = 10^{-24}см^2

Соответственно используются единицы:

$$1 \text{ миллибарн (мб)} = 10^{-27}\text{см}^2 = 10^{-3}\text{б}$$

$$1 \text{ микробарн (мкб)} = 10^{-30}\text{см}^2 = 10^{-3}\text{мб} = 10^{-6}\text{б}$$

$$1 \text{ нанобарн (нб)} = 10^{-33}\text{см}^2 = 10^{-3}\text{мкб} = 10^{-6}\text{мб} = 10^{-9}\text{б}$$

$$1 \text{ пикобарн (пб)} = 10^{-36}\text{см}^2 = 10^{-3}\text{нб} = 10^{-6}\text{мкб} = 10^{-9}\text{мб} = 10^{-12}\text{б}$$

$$1 \text{ фемтобарн (фб)} = 10^{-39}\text{см}^2 = 10^{-3}\text{пб} = 10^{-6}\text{нб} = 10^{-9}\text{мкб} = 10^{-15}\text{б}$$

Пример:

Сечения взаимодействия протонов ~ 40 мб при энергиях 10-100 ГэВ
 ~ 80 мб при энергии в тысячи ГэВ

Сечения взаимодействия ядер $\sim \sigma_0 A_1^{2/3} A_2^{2/3} (1-\Delta)$ барны

Единицы измерения энергии

При $\hbar=c=1$ единицы измерения массы и энергии

$$[m] = [E] = \text{эВ},$$

Соответственно, $1\text{кэВ} = 10^3\text{эВ}$, $1\text{МэВ} = 10^3\text{кэВ}$, $1\text{ГэВ} = 10^3\text{МэВ} = 10^9\text{эВ}$
и

$$1\text{ТэВ} = 10^3\text{ГэВ} = 10^{12}\text{эВ}$$

$$1\text{эрг} = 642 \cdot 10^9\text{эВ} = 642\text{ГэВ}$$

Ускорители на $\sim 100\text{ГэВ}$ сообщают частице энергию \sim эрга

$$1\text{ГэВ} = 1,7827 \cdot 10^{-27}\text{кг},$$

т.е. масса протона $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}\text{кг} = 0,938\text{ГэВ}$

Кинетическая энергия $T = E - m$ используется при $E \ll m$
- ядерная физика

Полная энергия E - используется при высоких энергиях
 $E \gtrsim 1\text{ГэВ}$

Единицы измерения импульса, длины и времени

Импульс частиц измеряется в ГэВ/с (МэВ /с)

Асимптотически при $E \gg m$, т.е. $E \gg 1$ ГэВ для адронов и $E \gg 1$ МэВ для электронов, переменные импульса, полной энергии и кинетической равны друг другу

(Для фотонов это верно всегда !)

При $\hbar=c=1$ длину (метры) и время (секунды) можно выразить в $1/\text{ГэВ}$:
 $\lambda = \hbar/mc = 1 / m$; $\lambda/c = \hbar/mc^2 = 1 / m$:

Подставляя массу в кг, соответствующую 1 ГэВ, получаем:

$$\text{ГэВ}^{-1} = 0,19733 \text{ ферми} = 0,19733 \cdot 10^{-15} \text{ метра (м)}$$

$$\text{ГэВ}^{-1} = 6,5822 \cdot 10^{-15} \text{ сек (с)}$$

Запомним: $\hbar c = 197,33$ МэВ·ферми

$$\hbar = 6,5822 \cdot 10^{-22} \text{ МэВ} \cdot \text{с}$$

Длина часто используется для расчетов площадей или сечений:

$$\text{ГэВ}^{-2} = 0,38939 \text{ мб}; \text{ а также } 1/m_p^2 = 0,44232 \text{ мб}, 1/m_\pi^2 = 19,987 \text{ мб}$$

Немного кинематики

Основная кинематическая переменная частицы –

4^x- вектор энергии-импульса $\mathbf{p} = (p_0, \mathbf{p}) = (E, p_x, p_y, p_z)$.

$p^2 = E^2 - |\mathbf{p}|^2 = m^2$ – определение массы частицы или системы частиц (с=1)!

Энергия $E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$

Скорость $\mathbf{v} = \mathbf{p}/E = \beta$, $\gamma = E/m$, $\mathbf{v} \gamma = \mathbf{p}/m$

Преобразования Лоренца имеют вид:

V – скорость инерциальной системы отсчета вдоль оси Z

$p_x' = p_x$, $p_y' = p_y$, $p_z' = \gamma (p_z - vE)$, $E' = \gamma (E - v p_z)$.

Инвариантные переменные: $S = (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2$ – квадрат полной энергии двух частиц, или квадрат их инвариантной массы;

$t = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2$ – квадрат переданного четырех-импульса.

Выделенные системы отсчета

1. Лабораторная система (Л.С.) — ускорители для взаимодействий с фиксированной мишенью = система мишени

пучок А → мишень В

$$p_A = (E_A, \mathbf{p}_A); \quad p_B = (m_B, 0)$$

$$E_A = (|\mathbf{p}_A|^2 + m_A^2)^{1/2}, \quad m_A, m_B - \text{массы частиц пучка и мишени}$$

$$v_A = p_A/E_A, \quad v_B = 0$$

2. Система центра масс (с.ц.м.)

$$\mathbf{p}_A^* + \mathbf{p}_B^* = 0$$

$$\mathbf{p}_A^* \rightarrow \quad \leftarrow \mathbf{p}_B^* = -\mathbf{p}_A^* ; \quad v_C = p_A/(E_A + m_B) \quad \text{в л.с.}$$

3. Система встречных пучков (с.в.п.)

$$p_A \quad p_B \quad S^{1/2} = 2 E_{\text{в.п.}} (1 - \theta^2/8) ; \quad \theta^2/8 \approx 0,0083 \quad \text{в ЦЕРН}$$



$$|\mathbf{p}_A| = |\mathbf{p}_B|$$

Переходы между системами отсчета

1. Переход от л.с. к С.Ц.М. - пучок по оси z

$$p_A^* = (E_A^*, 0, 0, p_A^*) \quad p_A = (E_A, 0, 0, p_A)$$

$$p_B^* = (E_B^*, 0, 0, -p_A^*) \quad p_B = (m_B, 0, 0, 0)$$

$$v_c = P_A / (E_A + m_B) ; \gamma_c = (E_A + m_B) / s^{1/2} ; \gamma v_c = P_A / s^{1/2}$$

$$s = (p_A + p_B)^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2m_B E_A$$

2. Переход от с.в.п. к С.Ц.М.

$$\beta_c = (P_A + P_B) / (E_A + E_B) ;$$

$$\beta_{ВП} = \beta_A \sin \theta / 2 , \beta_A - \text{скорость частицы A в л.с. (с.в.п.)}$$

$$\gamma_{ВП} = \gamma_A / (\sin^2 \theta / 2 + \gamma_A^2 \cos^2 \theta / 2)^{1/2}$$

Пусть ось z направлена по направлению скорости системы В.П.

Тогда импульс в С.Ц.М. есть $P_A^* = P_A^{ВП} \cos \theta / 2$.

$$s = (p_A + p_B)^2 = (E_A + E_B)^2 - |P_A + P_B|^2 = 4m^2 + 4(P^{ВП} \cos \theta / 2)^2$$

$$s^{1/2} \cong 2E^{ВП}(1 - \theta^2/8) \rightarrow 2E ; \quad E_A = E^{ВП} \cong E$$

Сравнение условий эксперимента на встречных пучках и на неподвижной мишени

1. При одной энергии пучка сравним энергии взаимодействия:

$$s^{1/2} \cong (2E_A)^{1/2} \quad \text{и} \quad s^{1/2} \cong 2E_A$$

На встречных пучках больше энергии доступно для образования новых частиц

2. На неподвижной мишени можно использовать пучки вторичных частиц:

п, К, ν, ...

3. Светимость выше в экспериментах на неподвижной мишени, т.е. быстрее набор статистики
4. Энергия коллайдера LHC эквивалентна энергии ШАЛ космических лучей

Будущие ускорители:

Линейные электронные коллайдеры

Задачи – поиск новых частиц и
повышение точности измерения
основных параметров
взаимодействий

Цель лекций

Основная задача курса – подготовить к проведению исследований на LHC

Начало рабочих сеансов по получению физических результатов - июль 2008 г.

Задачи к лекции 1

1. Оценить свободную энергию, доступную для образования новых частиц, для пучка протонов с энергией E на коллайдере и в соударениях с неподвижной мишенью.
2. Энергия соударения протонов на коллайдере LHC 14 ТэВ. Какова должна быть энергия пучка протонов для эквивалентного соударения на ускорителе с неподвижной мишенью?
3. За какое время электрон и протон с импульсом 1 ГэВ/с пролетят расстояние в 3м?