



## Лекция 9

- 1. Частицы и взаимодействия.**
- 2. Ускорители частиц.**
- 3. Элементарные частицы.**
- 4. Экспериментальное исследование структуры частиц.**
- 5. Типы, радиусы и константы взаимодействий частиц.**
- 6. Диаграммы Фейнмана для электромагнитных взаимодействий.**
- 7. Кванты других полей.**

# 1. Введение

Элементарные частицы – это мир объектов  
~ 1 Фм.

В настоящее время установлено существование кварков и лептонов, размеры которых ~  $10^{-3}$  Фм. и считается, что все сильно взаимодействующие частицы состоят из кварков. Исследование малых областей пространства требует концентрации энергии, поскольку лишь при  $\lambda < R_{\text{я}}$  возможно проникновение во внутрь ядра:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi \hbar c}{pc} = \frac{1200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{E \text{ МэВ}}$$

## 2. Ускорители.

Изменение энергии частиц осуществляется в ускорителях на встречных пучках (коллайдерах). Это позволяет исключить потери энергии на движение центра масс, что происходит в линейных ускорителях. Оба типа ускорителей **эквивалентны**, если  $m_a = m_b = m$  и одинакова энергия, вкладываемая в полезную часть реакции.

## Крупнейшие ускорители

Название ускорителя	LEP	LHC	HERA	TEVATRON	SLC
Институт (центр)	CERN	CERN	DESY	Fermilab	SLAC
Страна	Швейцария	Швейцария	Германия	США	США
Год начала работы	1989	2005	1992	1987	1989
Ускоряемые частицы	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$	$p \rightarrow \leftarrow p$	$e^- \rightarrow \leftarrow p$	$p \rightarrow \leftarrow \bar{p}$	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$
Их наибольшие энергии, ГэВ	101 + 101	7000 + 7000	30 + 920	1000 + 1000	50 + 50
Длина кольца, км	26.7	26.7	6.3	6.3	линейный ускоритель 3.2 км

Задача 1. Получим формулу, связывающую  $T_a$  и  $T_a'$  в эквивалентных ускорителях, исходя из понятия минимального порога реакции:

$$T_a' = T_b' = T' ; T_a = T ; \text{ для } a + b \rightarrow M$$

$$E'_{\text{пор}}(\text{СЦИ}) = Mc^2 = 2T'$$

$$E_{\text{пор}}(\text{ЛСК}) = Mc^2 \left( 1 + \frac{m}{m} + \frac{Mc^2}{2mc^2} \right) = T$$

$$E_{\text{пор}}(\text{ЛСК}) = E'_{\text{пор}}(\text{СЦИ})$$

$$T = 2T' \left( 1 + \frac{m}{m} + \frac{T'}{mc^2} \right) = 2T' \left( \frac{2mc^2 + T'}{mc^2} \right) \rightarrow$$

*→ в ультрарелятивистском случае →*

$$T = \frac{2(T')^2}{mc^2}; \quad \text{при } v_a = v_a$$

Задача 2. Далее, найдем максимальную массу частицы (M), которую можно получить на ускорителе на встречных пучках, если:

$T_a \neq T_b$ . Запишем закон сохранения энергии и импульса:

$$\left| \begin{array}{l} T_a + T_b = Mc^2 + T_M \\ p_a + p_b = p_M \end{array} \right| p_M = \frac{1}{c} |T_a - T_b|$$

$$Mc^2 + T_M = \sqrt{(p_M c)^2 + M^2 c^4}$$

$$(T_a + T_b)^2 = (p_M c)^2 + M^2 c^4 =$$

$$= (T_a - T_b)^2 + M^2 c^4 \rightarrow Mc^2 = 2\sqrt{T_a T_b}$$

В ускорителях, заряженные частицы движутся по кольцу, проходя промежутки с ускоряющим переменным полем. Частицы увеличивают свою энергию и удерживаются на орбите нарастающим магнитным полем. По достижению  $H_{\max}$ , частицы направляются на неподвижную мишень или во встречный поток частиц.

### 3. Элементарные частицы.

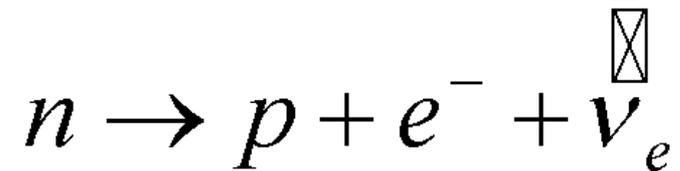
*Всего имеется около 500 элементарных частиц :  $p, n, e^{\pm}, \gamma, \nu, \bar{\nu}, W^{\pm}, Z, \pi^{\pm}, \pi^0 \dots$*

*Стабильные частицы :  $p, \bar{p}, e^{\pm}, \gamma, \nu, \bar{\nu}$ ,  
распад этих частиц не наблюдался и*

*время их жизни равно :  $\tau_e = 4.2 \cdot 10^{24}$  лет;*

*$\tau_p \cong 10^{39}$  лет;  $\tau_n^{св} = 900$ с;  $\tau_{вселен.} = 10^{10}$  лет*

*Элементарной частицей называется объект размером  $\leq 1$  Фм, который не распадается на составные части, например: продукты распада нейтрона не являются его составными частями, а рождаются в момент его распада*



*Время жизни частиц меняется в*

*пределах :  $10^{-24} \text{ с} \leq \tau_{\text{ж}} \leq 10^{-6} \text{ с}$ . Частицы с*

*$\tau_{\text{ж}} \leq 10^{-20} \text{ с}$  называются резонансами.*

Их можно рассматривать как возбужденные состояния стабильных или квазистабильных частиц. Резонансы распадаются за счет сильных взаимодействий и время

$$T_{\text{расп}} = 10^{-22} - 10^{-24} \text{ с.}$$

**Квазистабильные частицы распадаются медленно,  $T_{\text{расп}} > 10^{-20}$  с , вследствие электромагнитных или слабых взаимодействий. Большинство (~450) известных частиц (адроны) состоят из двух кварков (мезоны) или трех кварков (барионы):**

**адроны  $\leftrightarrow$  мезоны и барионы.**

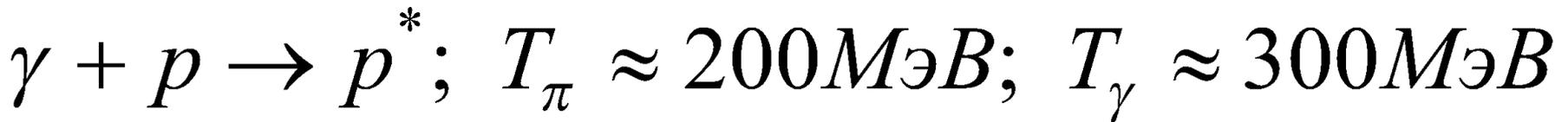
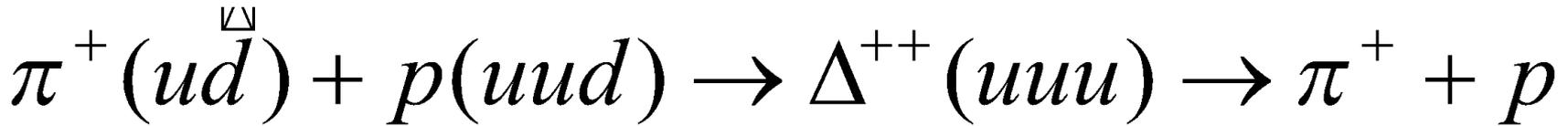
На современном уровне знаний шесть  
ЛЕПТОНОВ :  $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  и шесть  
кварков :  $d, u, s, c, b, t$  являются  
бесструктурными с размерами  $\leq 1\text{Фм}$

## 4. Экспериментальное исследование структуры частиц.

Для изучения формы, размеров, распределения электрического заряда и магнитного момента частиц используют метод упругого рассеяния электронов. Сечение упругого рассеяния электрона на протоне:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_p = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{MOTTA}^p \cdot |F_p(q)|^2$$

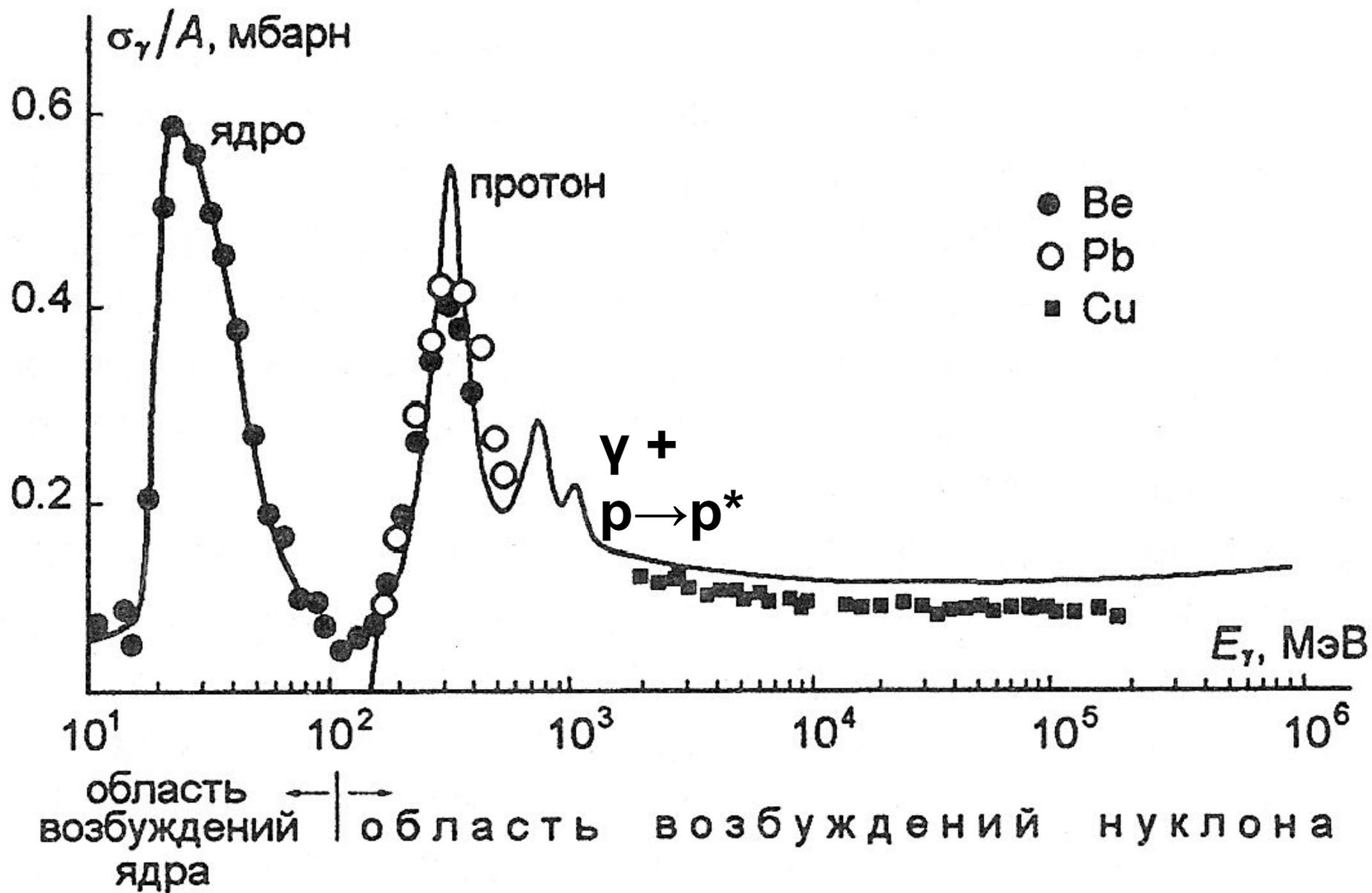
**В 1951г. Ферми обнаружил возбужденное состояние протона в реакции:**



$$p( uud ) \rightarrow p(\uparrow\uparrow\downarrow) ; s_p = \frac{1}{2} ; m_p = 938,27$$

$$\Delta^{++} (uuu) \rightarrow p^* (\uparrow\uparrow\uparrow) ; s_{p^*} = \frac{3}{2} ; m_{p^*} = 1232$$

$$\Delta^+ (uud) \rightarrow p^* (\uparrow\uparrow\uparrow) ; s_{p^*} = \frac{3}{2} ; m_{p^*} = 1232$$



Таким образом, в первом возбужденном состоянии происходит переворот спина кварка относительно исходного состояния. Энергия этого переворота около 300МэВ.

*Из рисунка видно что :  $\Delta E_\gamma \equiv \Gamma_\Delta =$   
120МэВ; тогда :  $\tau_{Ж}^\Delta = \frac{\hbar}{\Gamma_\Delta} = 3 \cdot 10^{-23} \text{ с}$*

## **5. Типы, радиусы и константы взаимодействий частиц.**

**В физике фундаментальных взаимодействий наиболее существенны сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия. При экстремально больших массах ( $>10^{19}$  ГэВ) необходимо учитывать гравитационные силы. Для описания процессов в мире частиц служит релятивистская квантовая теория или квантовая теория поля.**

## **Нобелевские премии:**

**В 1965 г. Фейман, Швингер, Томонага разработали вариант этой теории для описания электромагнитных взаимодействий – квантовую электродинамику (КЭД). В 1979 г. Глэшоу, Салам, Вайнберг создали теорию взаимодействия кварков и лептонов, объединяющую электромагнитное и слабое взаимодействие – электрослабая модель (ЭСМ), которая включает КЭД. Для описания сильных взаимодействий разработана квантовая хромодинамика (КХД).**

## Фундаментальные взаимодействия

Тип взаимодействия	Теория	Константа	Радиус сил
Сильное	КХД	$\alpha_s \approx 1$	$10^{-13}$ см
Электромагнитное	КЭД, ЭСМ	$\alpha_e \approx 1/137$	$\infty$
Слабое	ЭСМ	$\alpha_w \approx 10^{-6}$	$10^{-16}$ см
Гравитационное		$\alpha_G \approx 10^{-38}$	$\infty$

1965 г. – Фейман, Швингер, Томонага – КЭД.

1979г. Глэшоу, Салам, Вайнберг -ЭСМ ( КЭД)

ЭСМ и КХД совместно описывают сильное, слабое и электромагнитное взаимодействие кварков и лептонов и образуют схему, называемую

*стандартной моделью.*

**ЭСМ и КХД совместно описывают сильное, слабое и электромагнитное взаимодействие кварков и лептонов и образуют схему, называемую стандартной моделью.**

**Удобной иллюстрацией процессов в мире частиц являются диаграммы Фейнмана, которые позволяют оценить вероятности этих процессов взаимодействия. С помощью этих диаграмм можно записать амплитуду вероятности взаимодействия частиц ( $A$ ) и, просуммировав амплитуды для всех возможных диаграмм процесса, получить эффективное сечение  $d\sigma/d\Omega$ .**

## 6. Диаграммы Фейнмана для E-N взаимодействий.

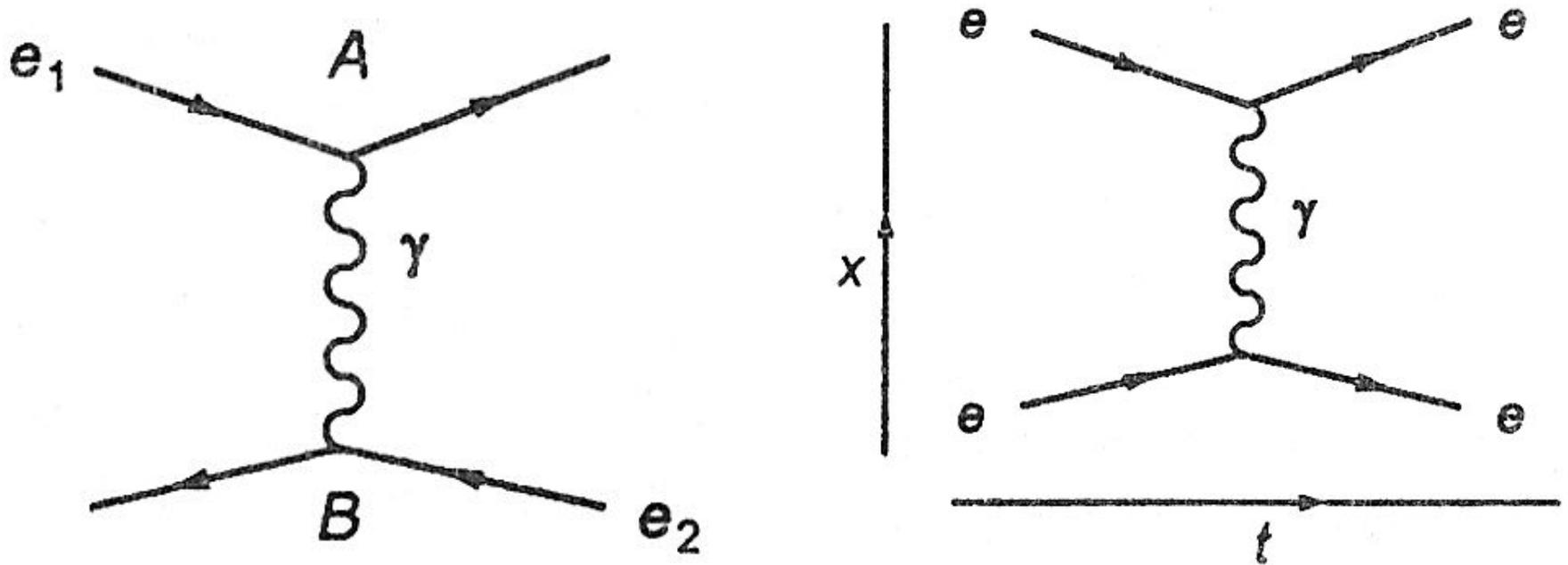


Рис. 3 Рассеяние электронов

**На рис. 3 представлена типичная диаграмма в осях  $(x,t)$ . Внешним незамкнутым линиям отвечают волновые функции реальных частиц до и после взаимодействия.**

**Внутренним линиям отвечают виртуальные частицы, распространяющиеся от точки испускания до точки поглощения. Функция распространения в этом случае называется пропагатором.**

**В каждом узле выполняются все законы сохранения, присущие данному взаимодействию.**

**Согласно квантовой теории поля взаимодействие между частицами осуществляется путем обмена некоторой третьей частицей, которая является квантом поля или переносчиком взаимодействия. Например, для электрона взаимодействие осуществляется путем обмена фотоном.**

**В т.А –узел, вершина диаграммы, испускается  $\gamma$ -квант и электрон испытывает отдачу. При этом нарушается закон сохранения полной энергии, поэтому испускаемый фотон является виртуальным и существует в течение времени**

$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E}$ ; расстояние  $u$  хода  $\gamma$  – кванта

$c\Delta t \leq \frac{\hbar c}{\Delta E}$  увеличивается со временем

поэтому энергия взаимодействия

уменьшается, как в законе Кулона

**В т. В виртуальный  $\gamma$ -квант поглощается и баланс по энергии восстанавливается.**

**С помощью таких диаграмм можно рассчитать амплитуду вероятности,  $A \sim \alpha^{1/2}$ , выделенного процесса и, просуммировав эти амплитуды для всех возможных диаграмм, рассчитать эффективное сечение процесса  $A^2$ . Вероятность процесса взаимодействия зависит от трех факторов:**

- 1. Значения константы  $\alpha$  для процесса.**

**2. Степенью нарушения соотношения при рождении виртуальной частицы:**

$E^2 - (pc)^2 = m^2c^4$ ; чем сильнее нарушение тем ниже вероятность процесса

**3. Полной энергией процесса; чем выше энергия, тем выше вероятность.**

**Если узел диаграммы состоит из трех линий, то амплитуда вероятности  $A$  процесса:**

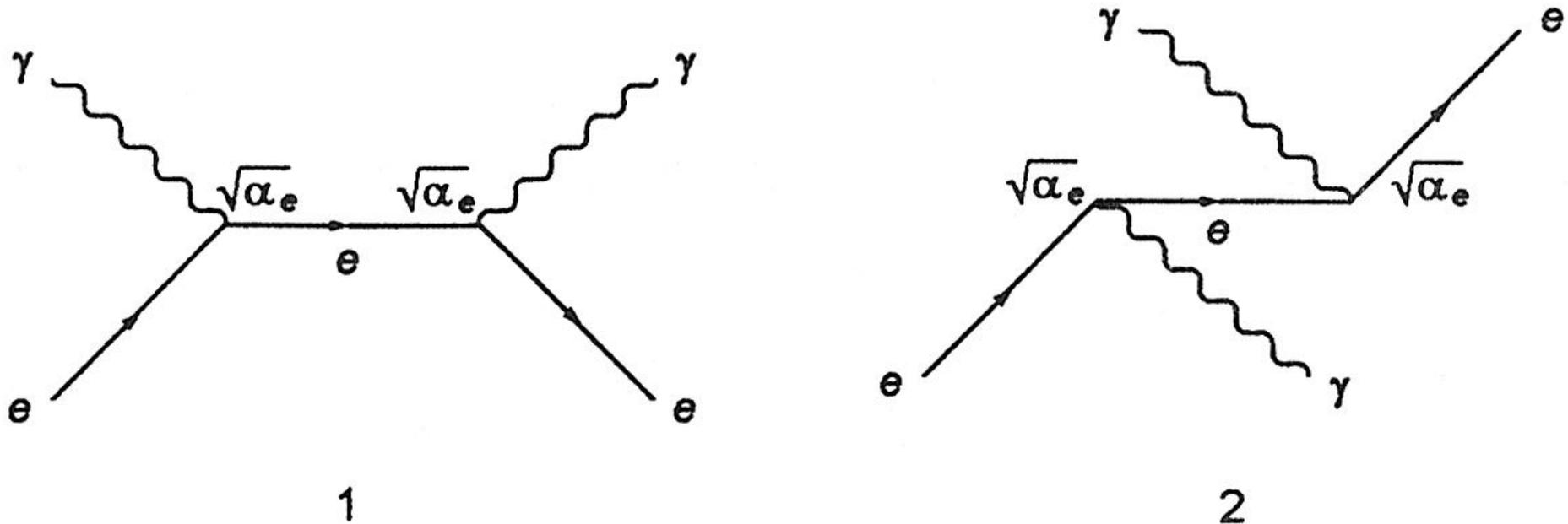
$A \sim \sqrt{\alpha}$ ; если узлов  $N$ , то  $A_N \sim (\sqrt{\alpha})^N$ ,  
например  $e - e$  рассеяние

$A_{ee} = (\sqrt{\alpha})^2 = \alpha$ ; а вероятность

$$\omega \equiv I = \frac{d\sigma}{d\Omega} = (A_{ee})^2 = \alpha^2$$

Пример: Рассеяние фотона на электроне -  
эффект Комптона.

# Рис.8.4 Рассеяние фотона на электроне - эффект Комптона.



**Здесь возможны две двухузловые диаграммы. В обоих случаях виртуальной частицей является электрон, однако в первом случае происходит поглощение фотона, а во втором – сначала испускание и затем поглощение.**

**Поэтому амплитуда вероятности Комpton-эффекта есть сумма амплитуд соответствующих диаграмм:**

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{КОМП}} = |A_1 + A_2|^2 = \left| \left(\sqrt{\alpha_e}\right)^2 + \left(\sqrt{\alpha_e}\right)^2 \right|^2 =$$

$$\sim \alpha_e^2 \sim e^4; \text{ где } \alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

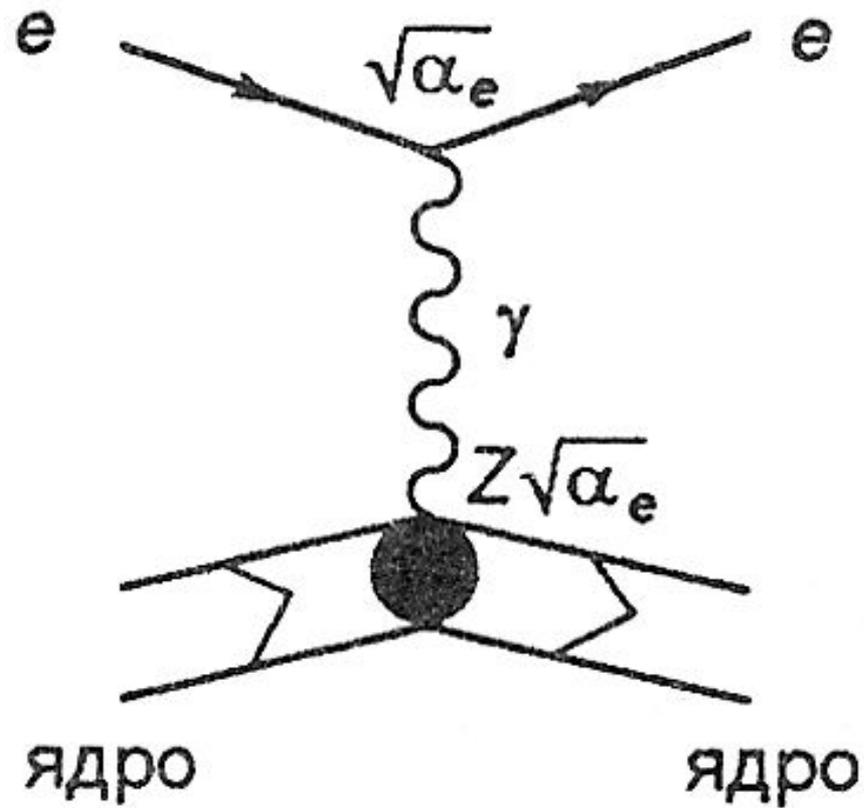
*Если вместо электрона будет объект с*

*зарядом  $Ze$ , то  $A \sim Z\sqrt{\alpha_e}\sqrt{\alpha_e} = Z\alpha_e$*

*$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim Z^2\alpha_e^2 \sim Z^2e^4$ , как и в формуле*

*Резерфорда*

**рис. 5** Рассеяние электрона на ядре с зарядом  $Ze$

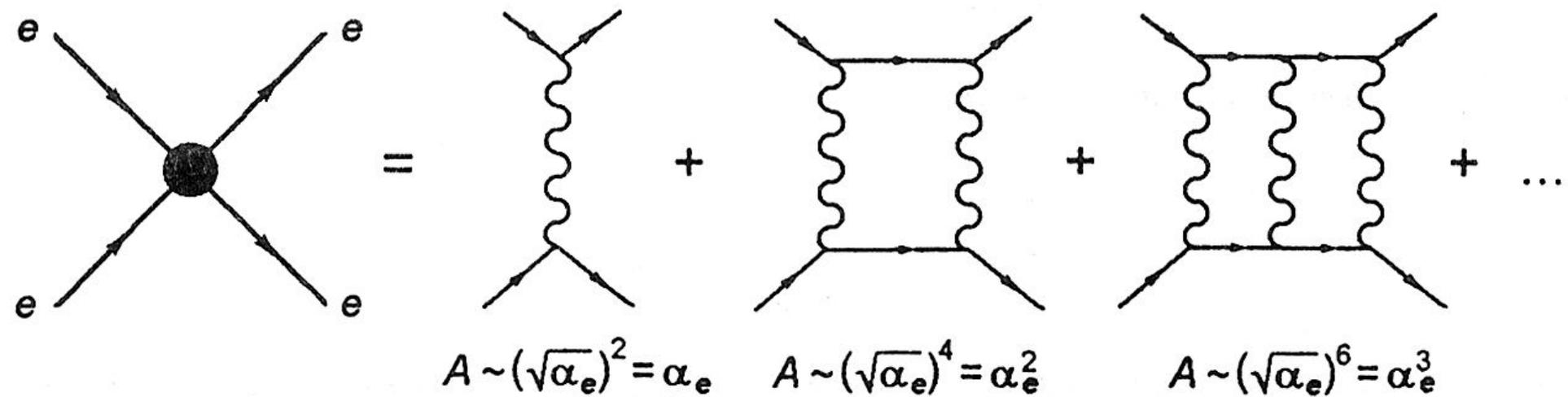


**Увеличение числа узлов на диаграмме на два, уменьшает вероятность процесса в  $10^4$  раз. Следовательно, в электромагнитных процессах можно обойтись двухузловыми диаграммами.**

**Пример: Диаграммы для e-e рассеяния.**

Рис.8.6

Диаграммы для e-e рассеяния.



**Для слабых взаимодействий подход аналогичен. В сильных взаимодействиях необходимо учитывать множество диаграмм, что усложняет расчеты.**

**В заключение отметим, что каждому взаимодействию присущ свой заряд: сильный, электрический, слабый, гравитационный, соответственно:**

$$\alpha_S; \quad \alpha_e; \quad \alpha_w; \quad \alpha_G$$

## 7. Кванты других полей.

Кванты полей (фундаментальные бозоны)

Поле (взаимодействие)	Квант (бозон)	Масса ( $mc^2$ )	Спин	Радиус взаимодействия, см
Сильное	глюон (8 видов)	0	1	$10^{-13}$
Электромагнитное	фотон	0	1	$\infty$
Слабое	$W^\pm, Z$	80, 91 ГэВ	1	$10^{-16}$
Гравитационное	гравитон	0	2	$\infty$

