

Физика атома, атомного ядра и элементарных частиц

52.(1). Кварковая структура мезонов и барионов. Экспериментальные подтверждения кварковой теории.

Кварковая гипотеза была выдвинута в 1964 году Гелл-Манном и Цвейгом. Согласно этой гипотезе, все известные в то время адроны можно было представить состоящими из трех фундаментальных частиц, которые Гелл-Манн назвал кварками. Кварки получили обозначения: u (up), d (down) и s (strange).

Кварк	Электрический заряд Q	Спин	Масса, ГэВ
u	$+2/3$	$1/2$	0.33
d	$-1/3$	$1/2$	0.33
s	$-1/3$	$1/2$	0.51

Структура некоторых адронов

Частица	Кварковая структура
Протон p	uud
Нейтрон n	udd
Λ^0 - гиперон	uds
π^+ - мезон	$\tilde{d}u$
π^- - мезон	$\tilde{u}\bar{d}$
K^+ - мезон	$\tilde{s}u$

Диаграмма взаимодействия протона и нейтрона внутри ядра (обмен пи-мезоном)

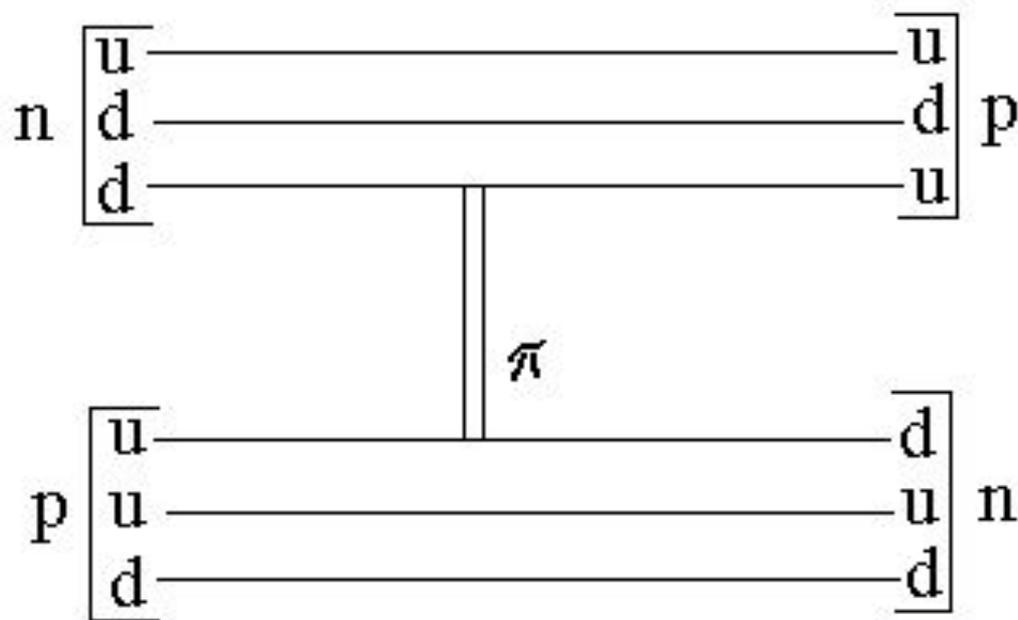
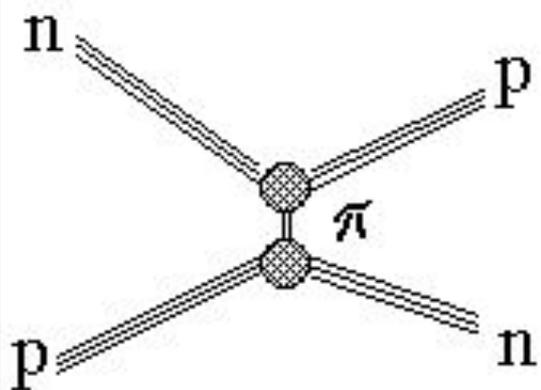
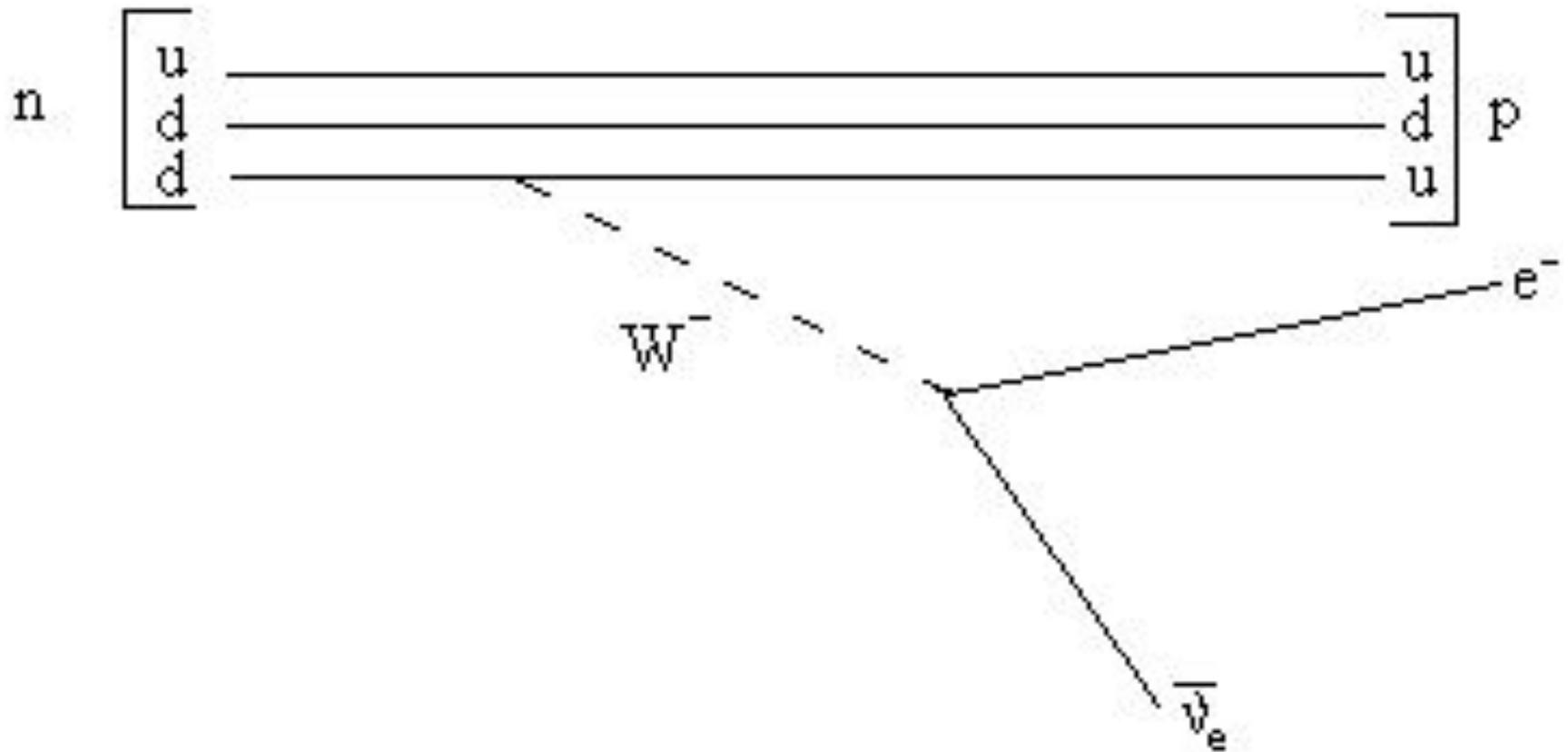
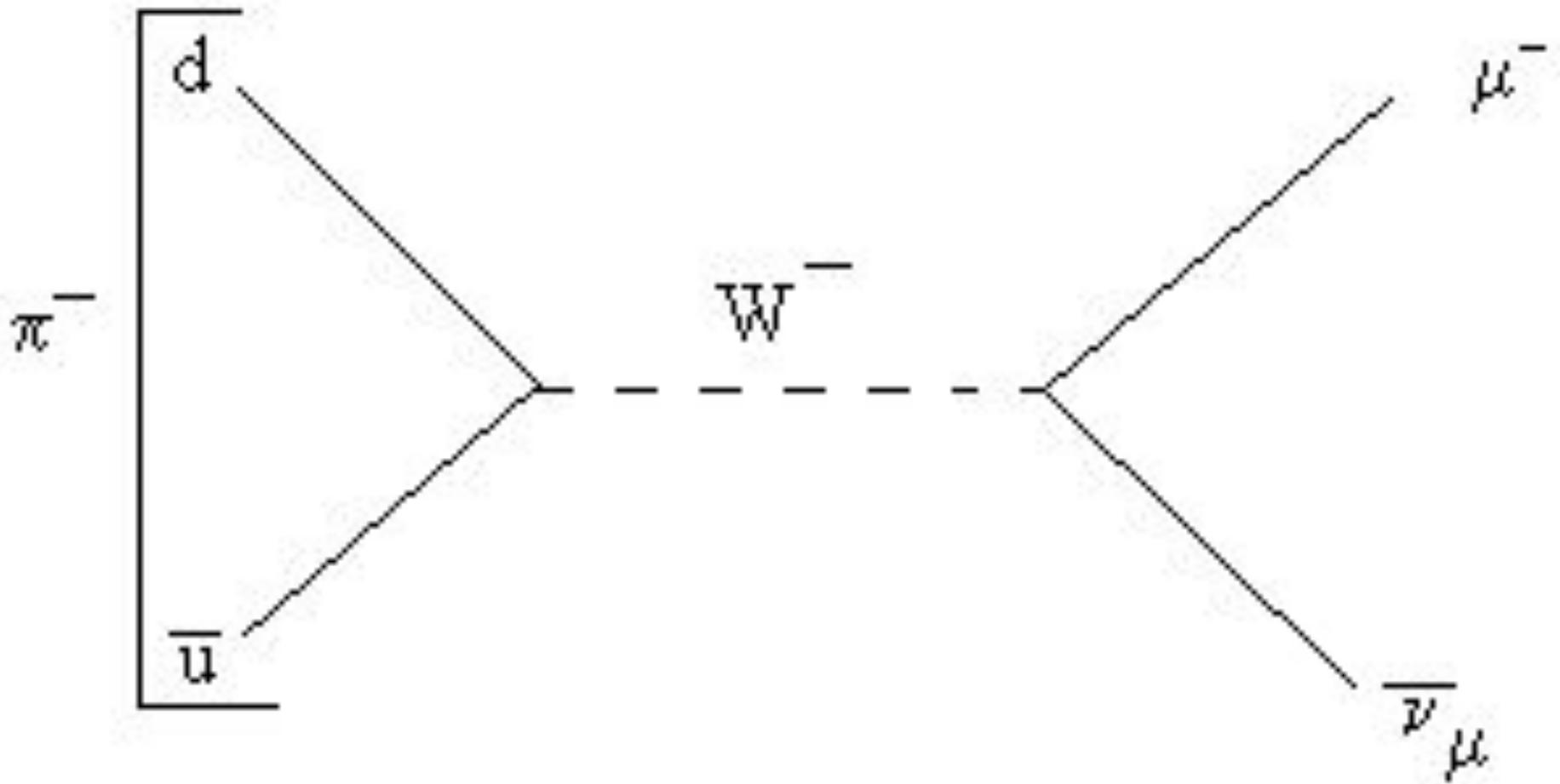


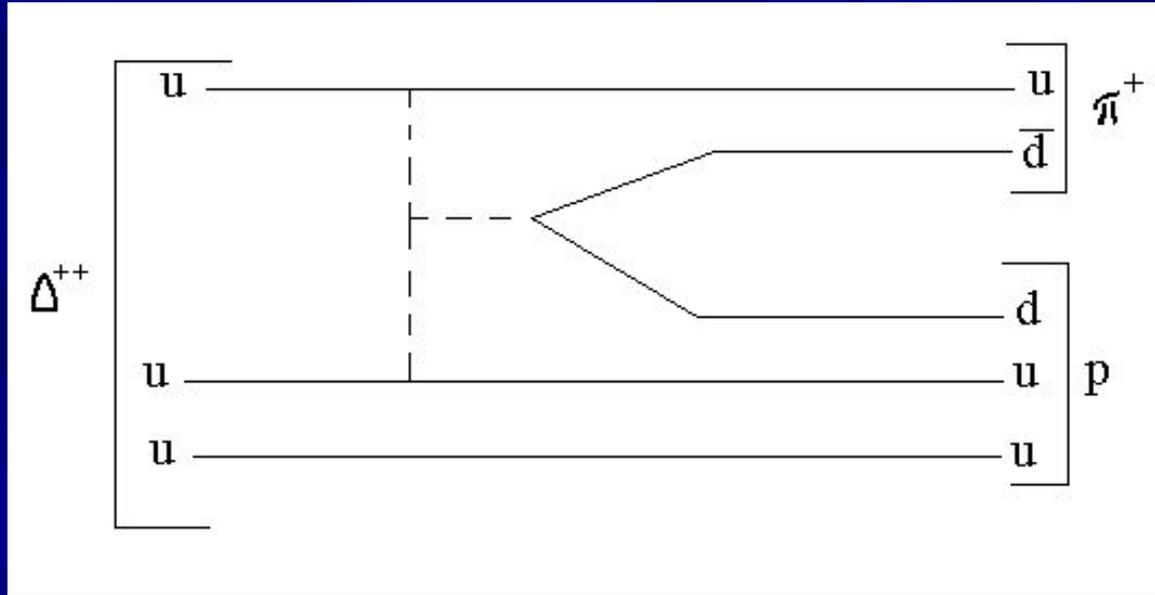
Диаграмма распада нейтрона



Распад π^- -мезона



Распад Δ^{++} - гиперона



Δ^{++} - гиперон (резонанс) состоит из трех u-кварков и распадается по схеме



Пара $d\bar{d}$ образована глюоном, который был испущен одним из u-кварков

Вопросы к кварковой теории

1. Почему не обнаружены частицы с дробным зарядом, состоящие, например, из 4 или 5 кварков?
2. Каким образом кварки, имеющие спин $1/2$, т.е. являющиеся фермионами, оказываются в одном барионе в количестве 2 или 3? Почему это на противоречит принципу Паули?
3. Почему все попытки экспериментального обнаружения свободных кварков закончились неудачей?

Исходные положения квантовой хромодинамики

Кварки характеризуются скрытым квантовым числом (зарядом), имеющим название "цвет". Цвет может принимать три значения: R , G , B ("красный", "зеленый", "синий"). Антикварки имеют антицвета, дополнительные к цветам: \bar{R} (бирюзовый), \bar{G} (пурпурный), \bar{B} (желтый).

Все наблюдаемые частицы являются белыми (бесцветными).

Свойства глюонов

Сильное взаимодействие осуществляется обменом безмассовыми электрически нейтральными частицами со спином 1 и отрицательной четностью - глюонами. Каждый глюон несет особый цветовой заряд, являющийся комбинацией цвета и антицвета. Анализ показывает, что существует 8 таких комбинаций:

$$\tilde{R}G, \quad \tilde{R}B, \quad \tilde{G}B, \quad \tilde{G}R, \quad \tilde{B}R, \quad \tilde{B}G, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{R}R - \tilde{G}G), \quad \frac{1}{\sqrt{6}}(\tilde{R}R + \tilde{G}G - 2\tilde{B}B)$$

Отсутствие кварков в свободном состоянии (конфайнмент)

В отличие от фотонов, которые между собой не взаимодействуют, кварки взаимодействуют между собой цветовыми зарядами, причем с увеличением расстояния между кварками взаимодействие возрастает:

$$V \approx -\frac{\alpha_s c}{r} + \lambda r$$

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАССЕЯНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПРОТОНАХ

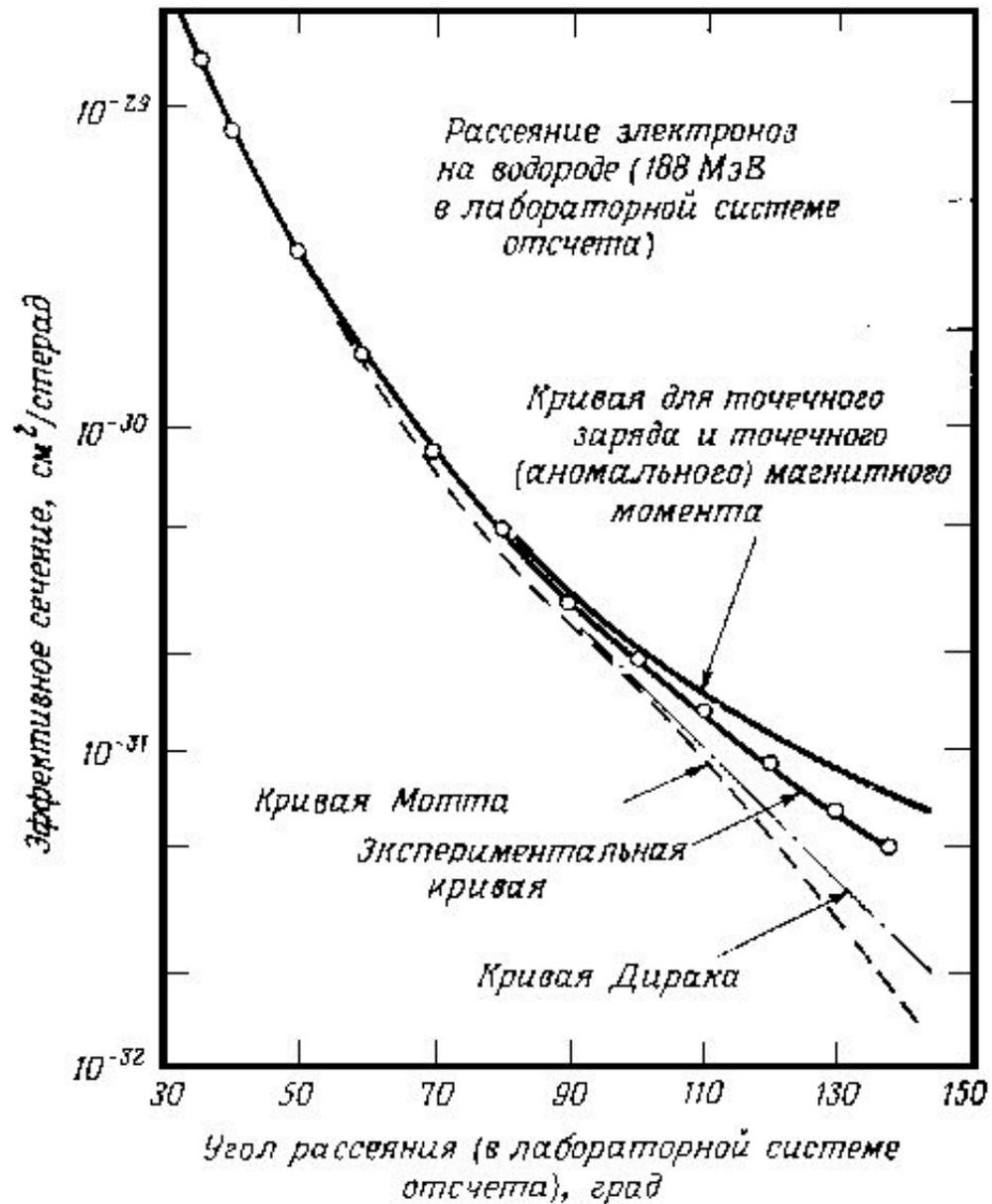
Формула Мотта:
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = 4(Ze^2)^2 \frac{E^2}{(qc)^4} \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)$$

где E – энергия падающего электрона, $v = \beta c$ – его скорость, q – импульс, переданный при рассеянии. Слагаемое $\beta^2 \sin^2 \theta/2$ появляется из-за взаимодействия магнитных моментов электрона и мишени; для бесспиновых частиц эффективное сечение определяется формулой Резерфорда:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \frac{4m^2 (Z_1 Ze^2)^2}{q^4}$$

где m – масса падающей частицы.

- Рассеяние электронов с энергией 188 МэВ на протонах ($\lambda = 10^{-14}$ м).

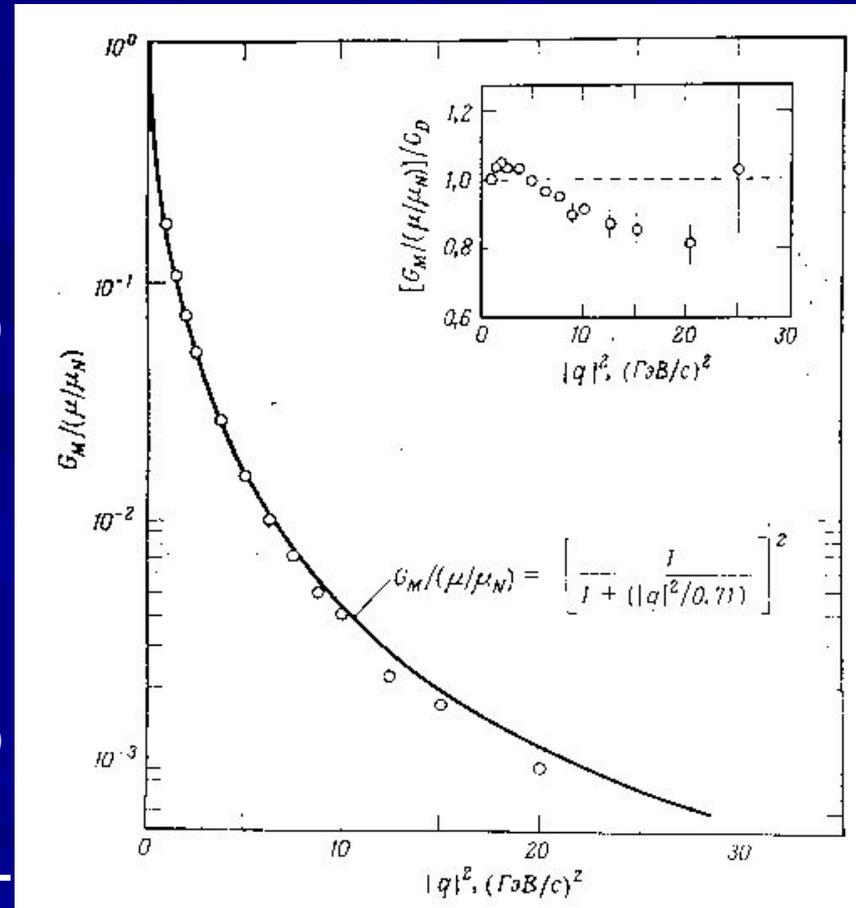


Магнитный формфактор протона в экспериментах по рассеянию электронов с энергиями до 3.5 ГэВ ($\lambda = 10^{-15}$ м).

Главный вывод из этой группы экспериментов: протон не является точечной частицей, т.к. для точечной частицы формфактор – постоянное число. Приближенно распределение электрического заряда в протоне можно представить в виде

$$\rho(r) = \rho(0) \exp(-r/a),$$

где $a \approx 0.23$ фм. Аналогичные данные получены и для нейтрона. Т.е. для электронов с длиной волны $\lambda = 10^{-15}$ м нуклон – это объект, протяженный в пространстве и лишенный четко очерченной граничной поверхности.

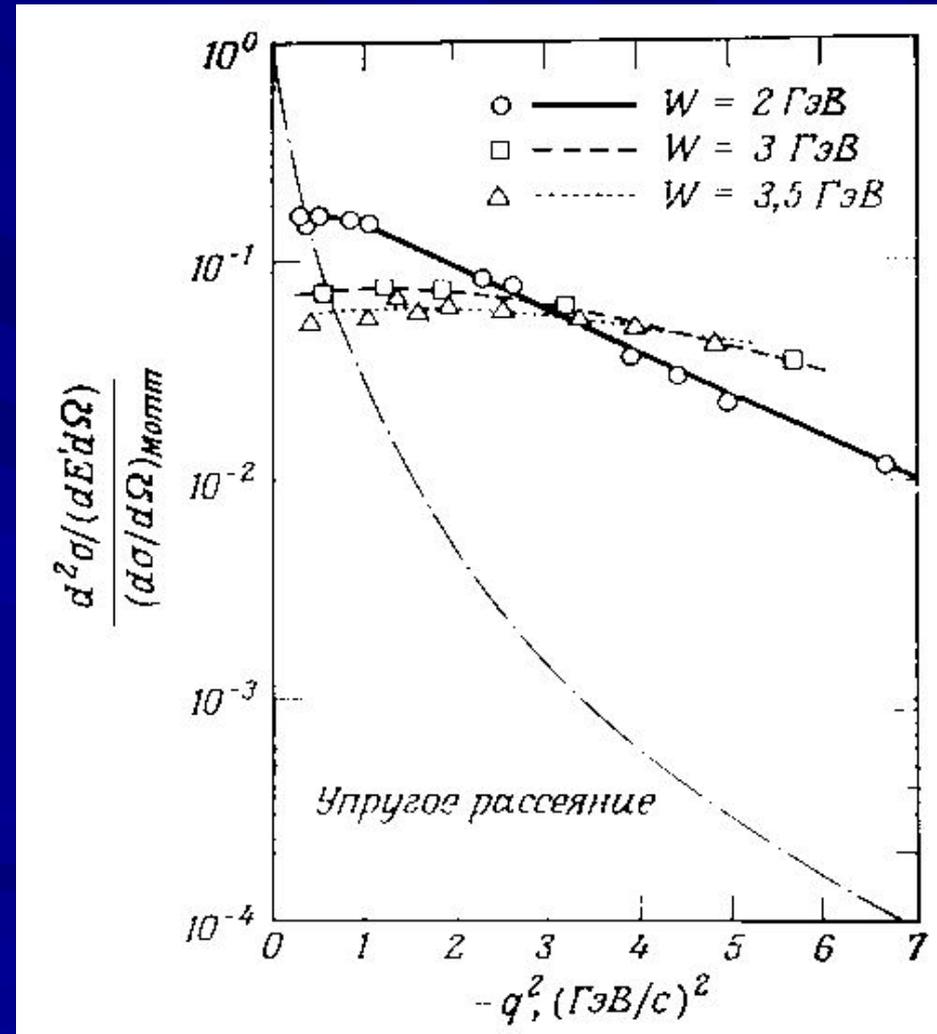


Рассеяние электронов с энергиями 20-22 Гэв на протонах ($\lambda = 10^{-16}$ м, W – полная энергия образовавшихся адронов в их системе центра масс)

Главный вывод из этой группы экспериментов: рассеяние электронов с длиной волны

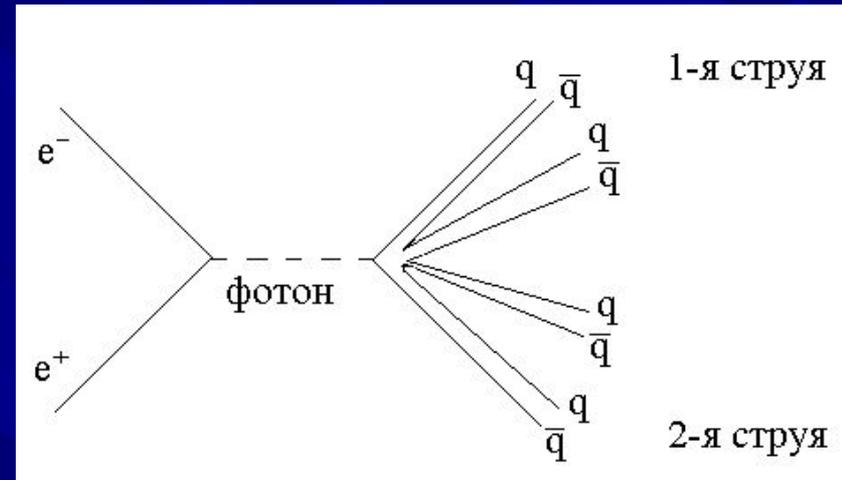
$$\lambda = 10^{-16} \text{ м}$$

происходит на точечных центрах внутри протона (отношение сечения рассеяния к сечению по формуле Мотта $\approx const$).



Струи адронов

В коллайдерах в результате лобовых столкновений частиц больших энергий возникает пара кварк-антикварк. Когда эти частицы расходятся



на расстояние больше 1 фм, цветовое взаимодействие становится настолько сильным, что кварк и антикварк резко тормозятся, и испускают пи-мезоны в виде струй, аналогично тому, как тормозящийся электрический заряд излучает фотоны (тормозное излучение). Струи адронов являются еще одним подтверждением кварковой теории.

Свойства кварков

Кварк	Электрический заряд Q	Спин	Масса, ГэВ
u	$+2/3$	$1/2$	0.33
d	$-1/3$	$1/2$	0.33
s	$-1/3$	$1/2$	0.51
c	$+2/3$	$1/2$	1.8
b	$-1/3$	$1/2$	5 (?)
t	$+2/3$	$1/2$	70(?)