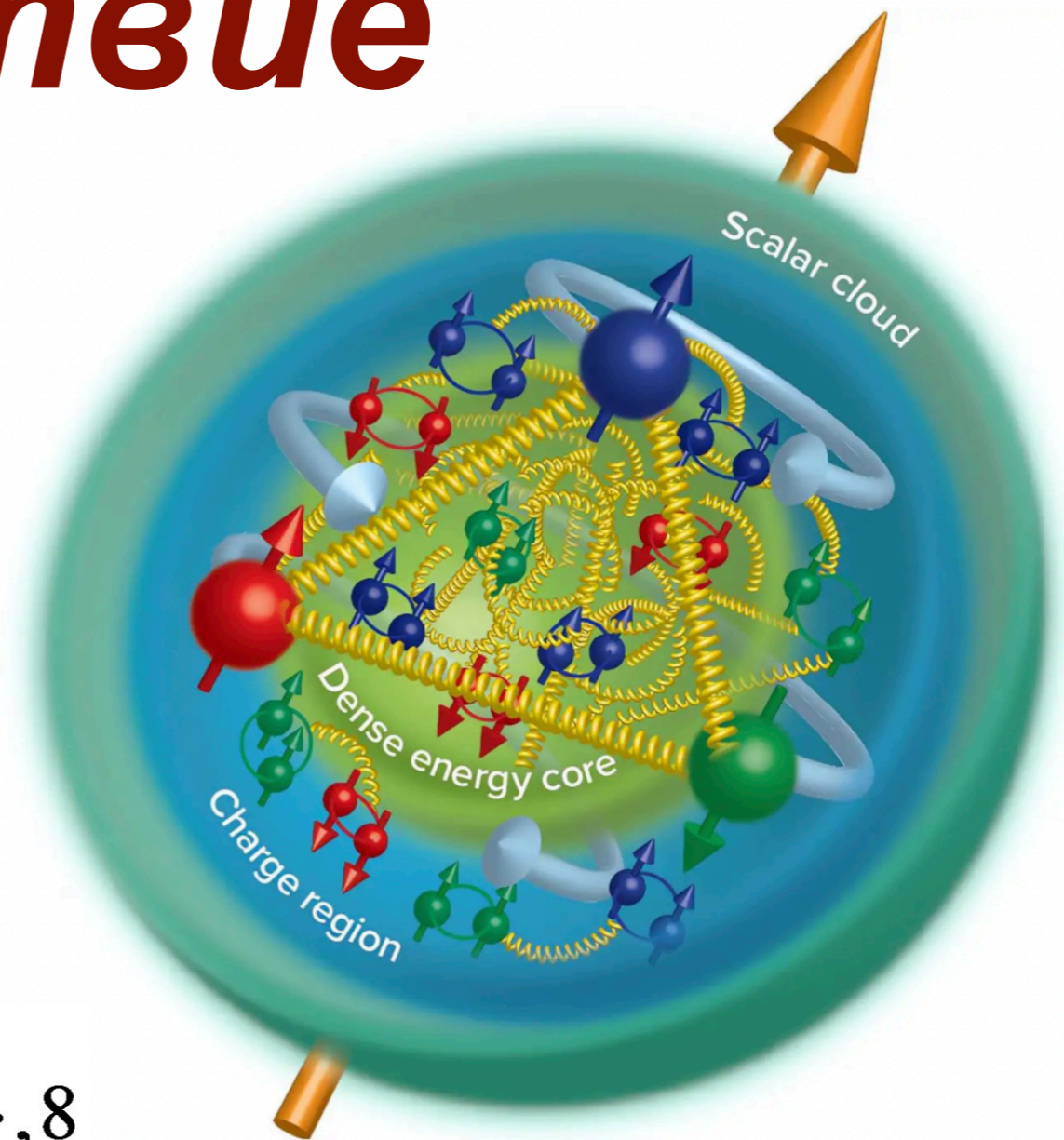


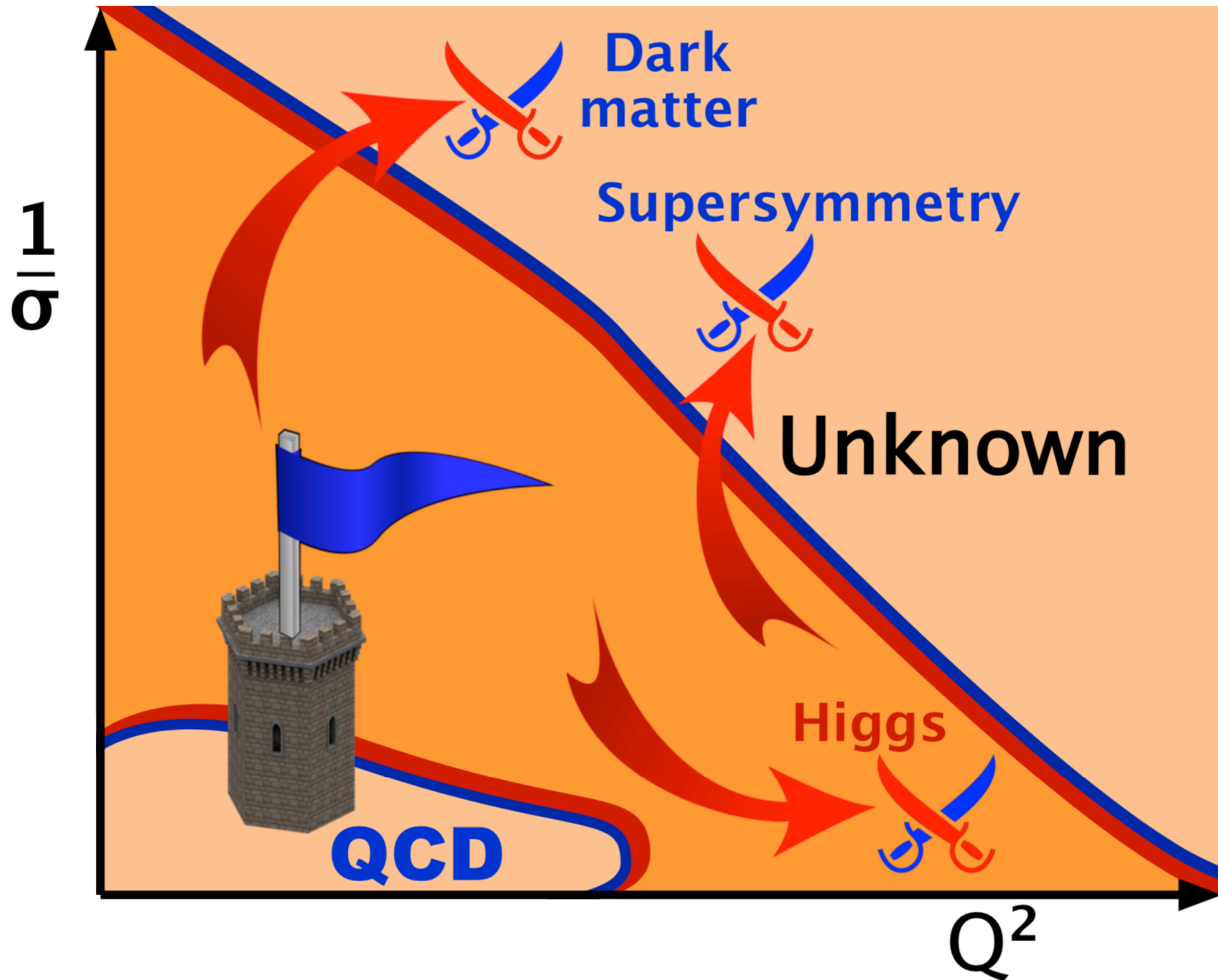
Сильное взаимодействие и КХД

А. В. Гуськов
avg@jinr.ru

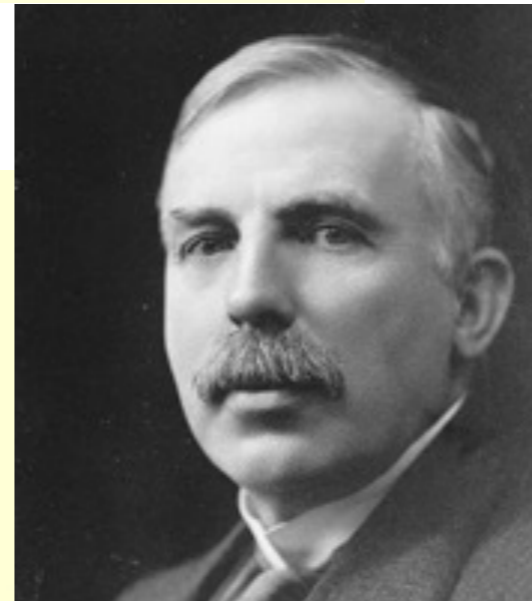
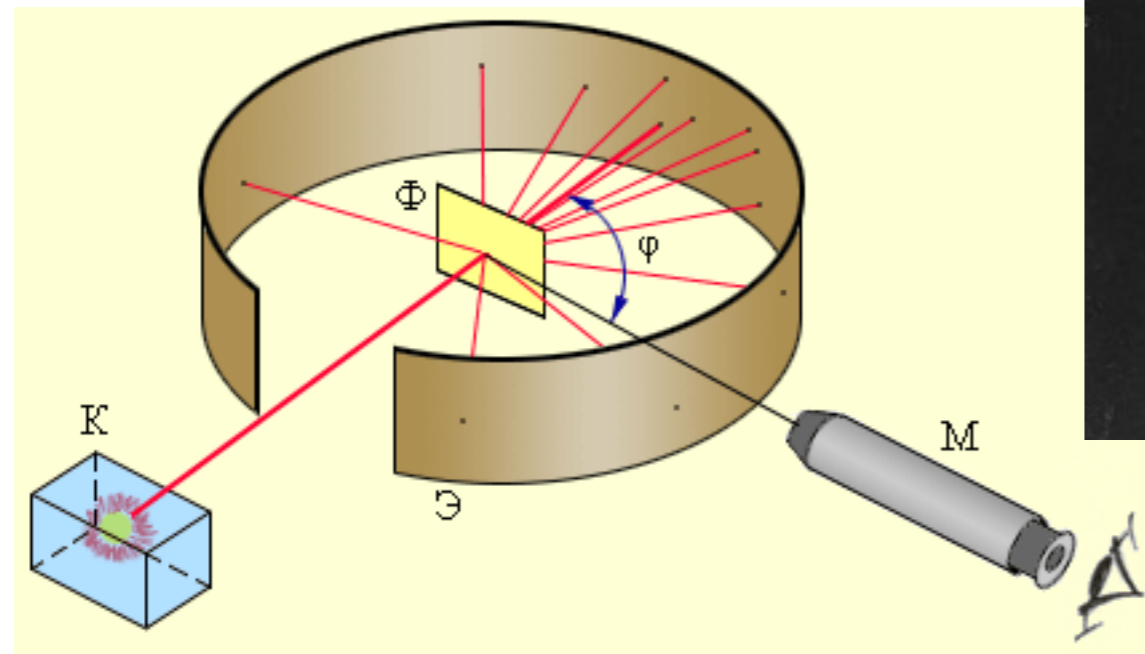
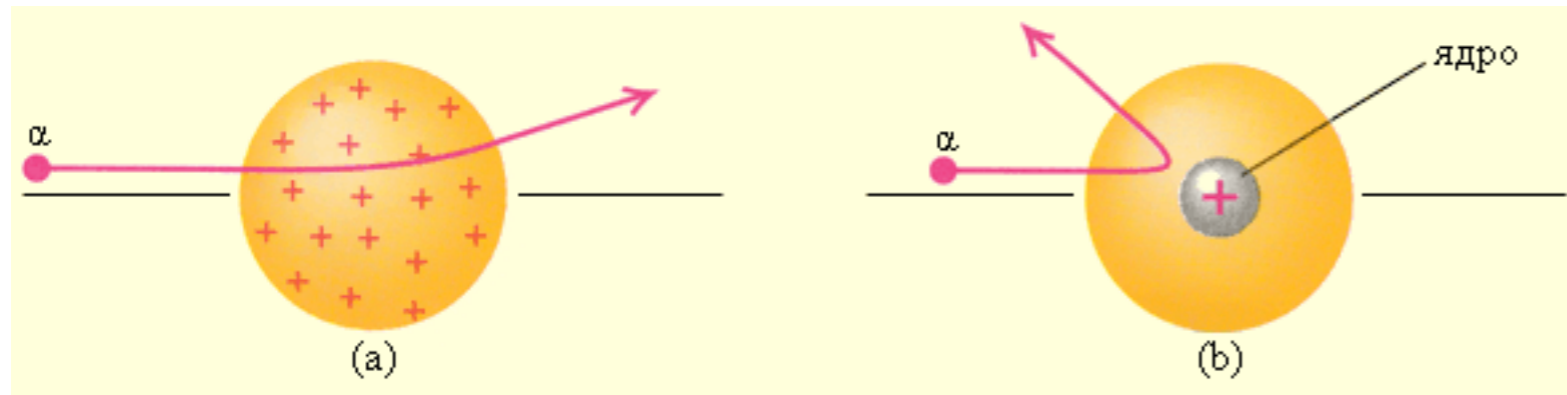


$$L = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} + \bar{q} (i\gamma^\mu D_\mu - m) q; a = 1, \dots, 8$$

Рубежи современной физики частиц



1911: Открытие ядра



**Резерфорд:
размеры ядра $< 2 \times 10^{-14}$ м**

[669]

LXXIX. *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.* By Professor E. RUTHERFORD, F.R.S., University of Manchester*.

§ 1. IT is well known that the α and β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the β than for the α particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden † on the scattering of α rays indicate that some of the α particles must suffer a deflexion of more than a right angle at a single encounter. They found, for example, that a small fraction of the incident α particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of 90° in passing through a layer of gold-foil about $\cdot 00004$ cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1.6 millimetres of air. Geiger ‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles traversing a gold-foil of this thickness was about $0^\circ.87$. A simple calculation based on the theory of probability shows that the chance of an α particle being deflected through 90° is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution of the α particles for various angles of large deflexion does not follow the probability law to be expected if such large deflexions are made up of a large number of small deviations. It seems reasonable to suppose that the deflexion through a large angle is due to a single atomic encounter, for the chance of a second encounter of a kind to produce a large deflexion must in most cases be exceedingly small. A simple calculation shows that the atom must be a seat of an intense electric field in order to produce such a large deflexion at a single encounter.

Recently Sir J. J. Thomson § has put forward a theory to

* Communicated by the Author. A brief account of this paper was communicated to the Manchester Literary and Philosophical Society in February, 1911.

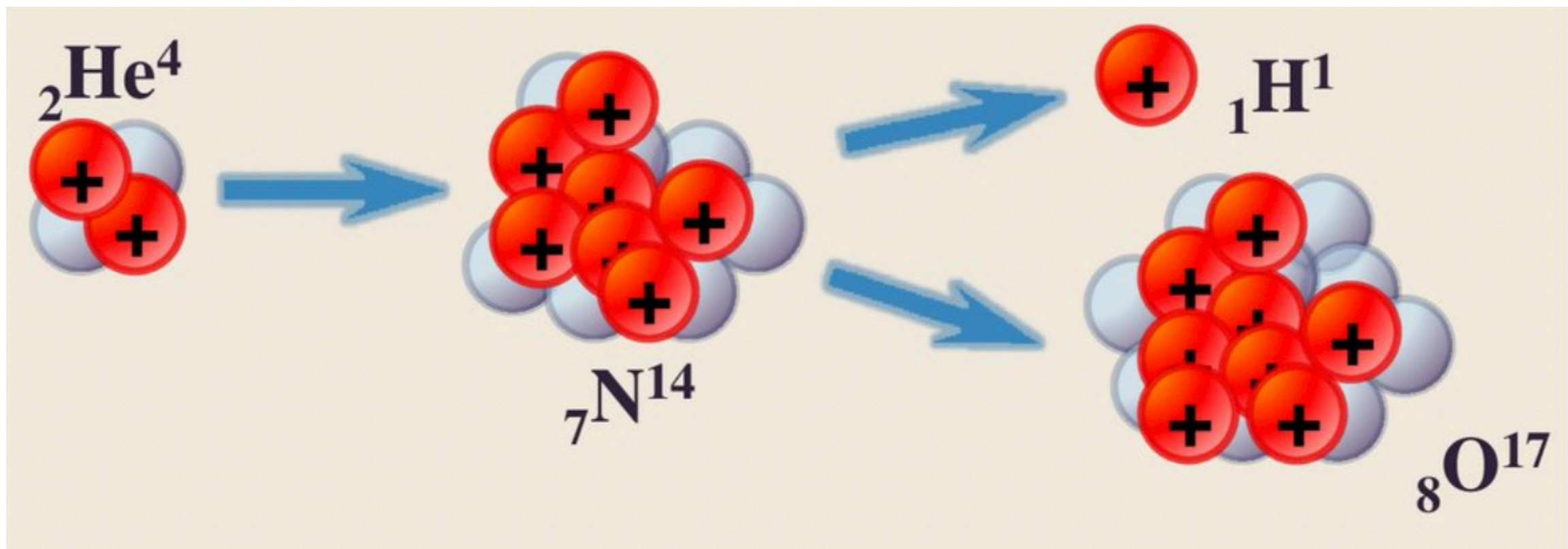
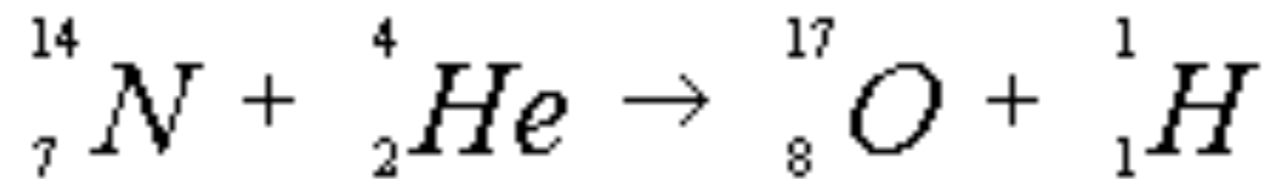
† Proc. Roy. Soc. lxxxii. p. 495 (1909).

‡ Proc. Roy. Soc. lxxxiii. p. 492 (1910).

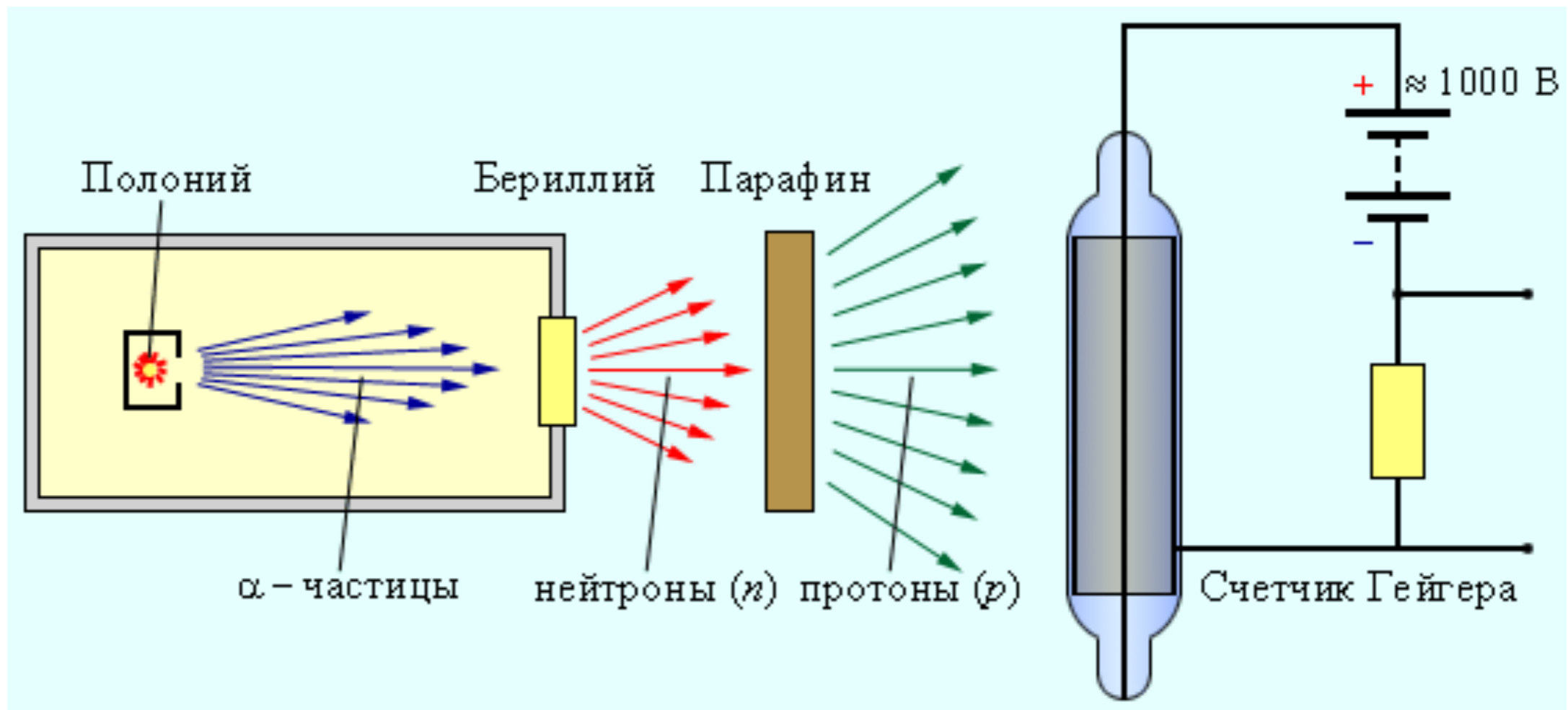
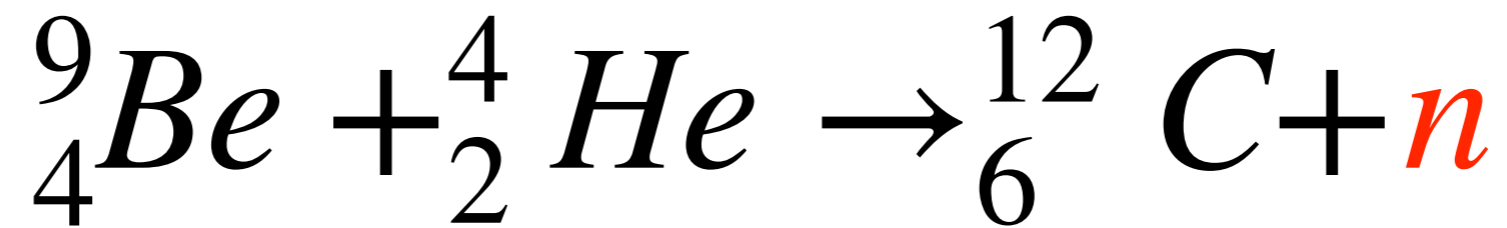
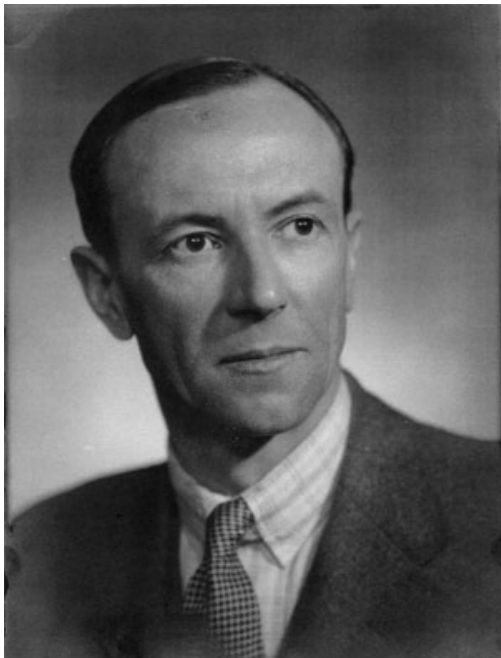
§ Camb. Lit. & Phil. Soc. xv. pt. 5 (1910).

Открытие протона

Резерфорд, 1919 год



1932: Открытие нейтрона

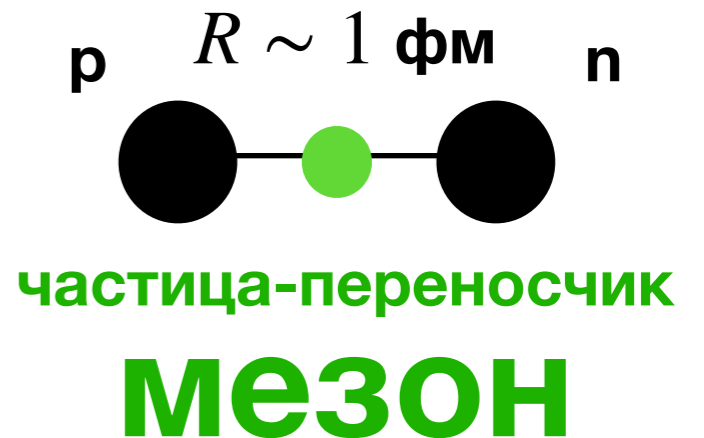


1934: Потенциал Юкавы

Обменная природа ядерных сил

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta t = R/c$$

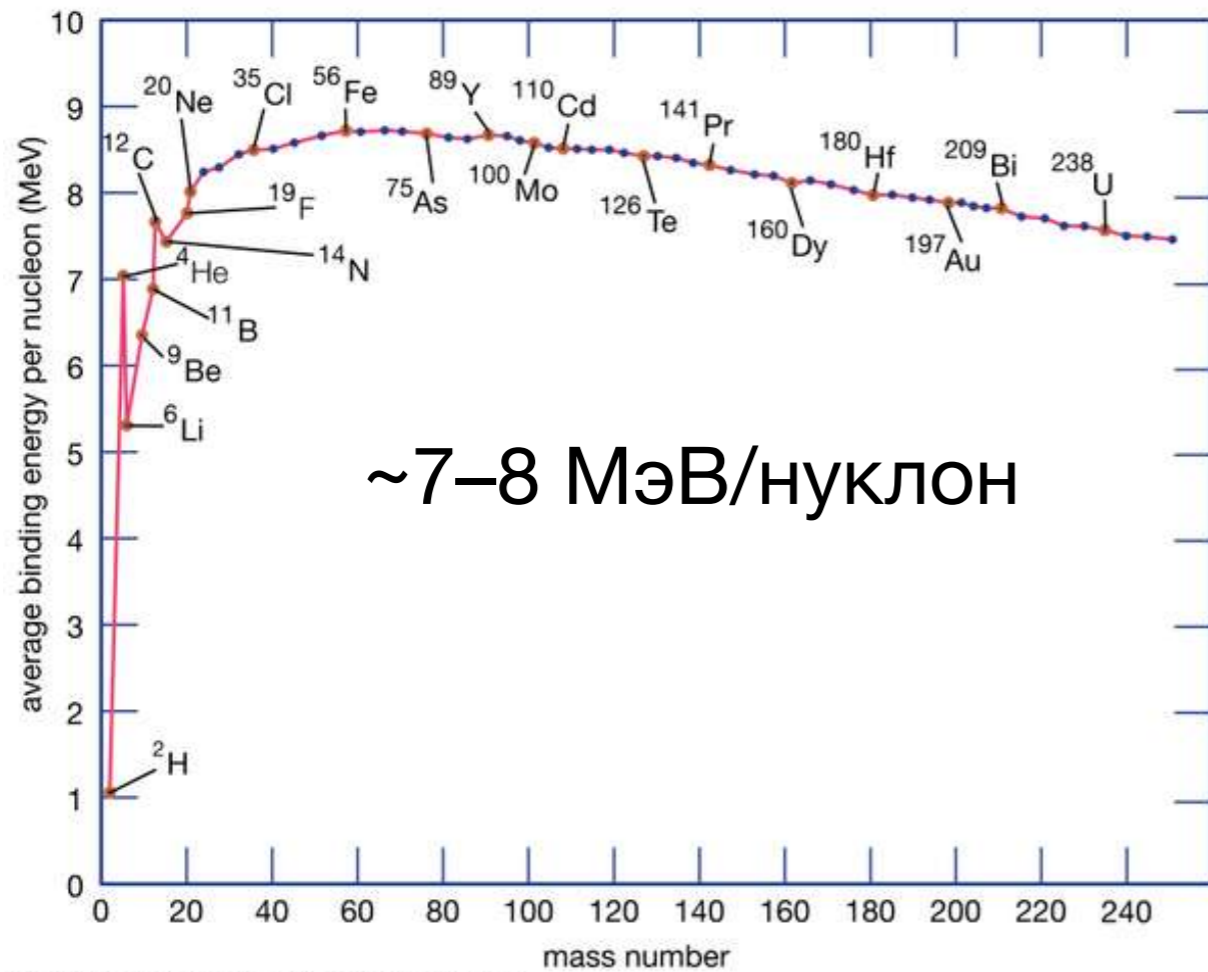


$$m = \frac{\Delta E}{c^2} \sim \frac{\hbar}{Rc} = 200 \text{ МэВ}$$

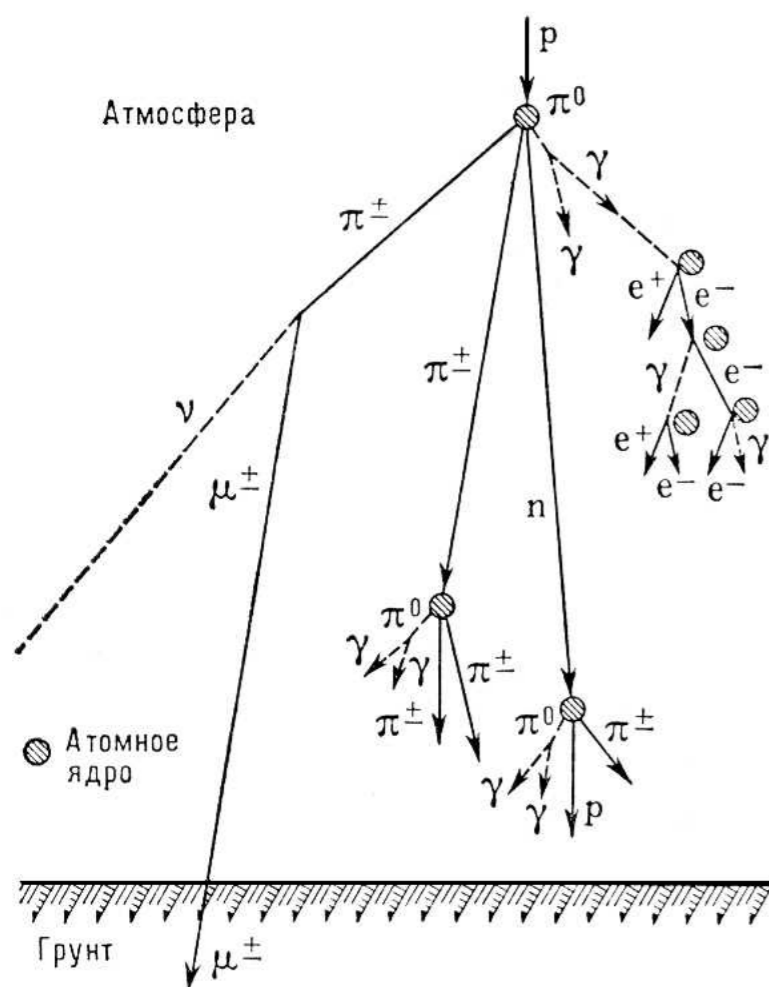
Потенциал межнуклонного взаимодействия:

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mcr/\hbar}}{r}$$

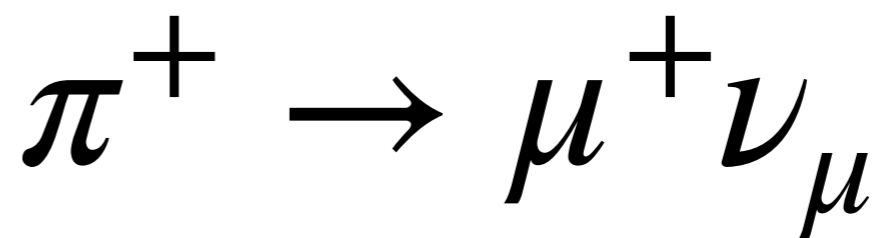
1930e: Энергия связи ядра



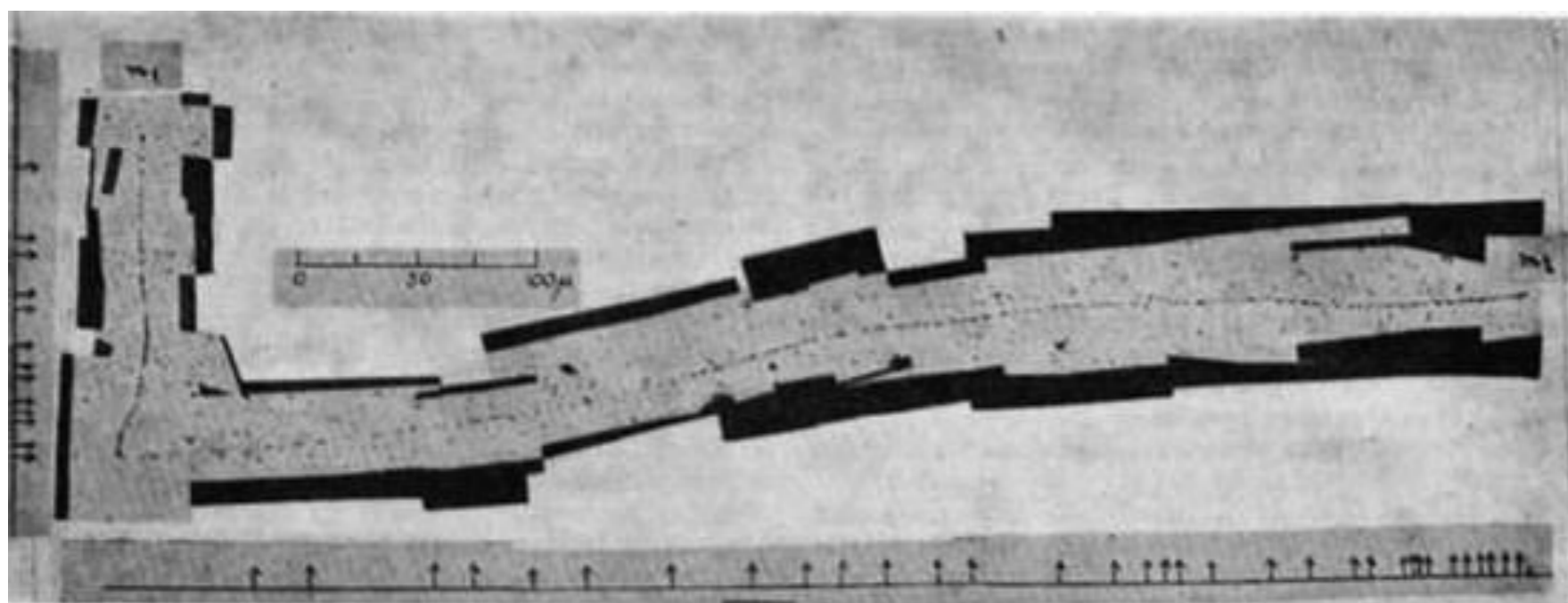
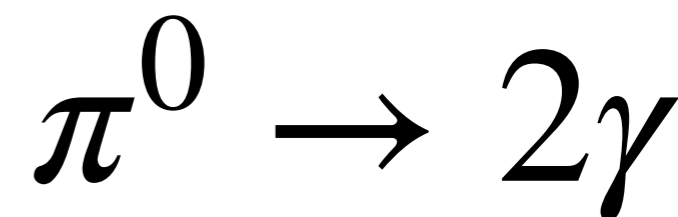
1947: Открытие π^{\pm} -мезонов



Ядерная эмульсия была облучена в горах вторичными космическими лучами. Были найдены короткие треки остановившихся в эмульсии частиц, которые затем распадались.



В 1950м был открыт нейтральный π^0 -мезон

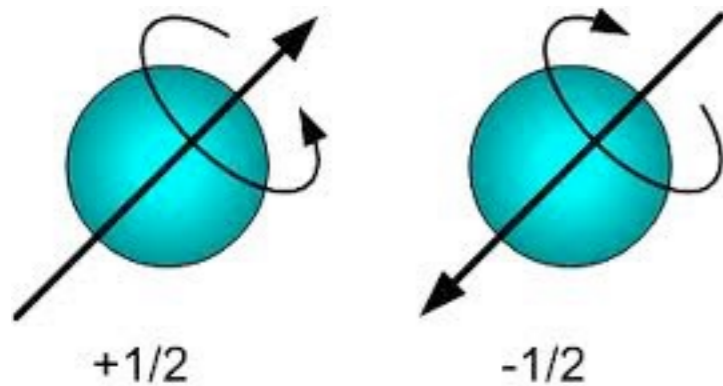
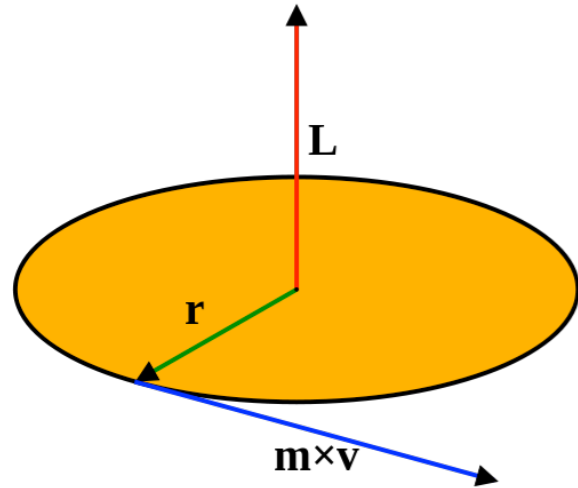


Спин частицы

Момент импульса или орбитальный момент - физическая величина, характеризующая количество вращательного движения

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

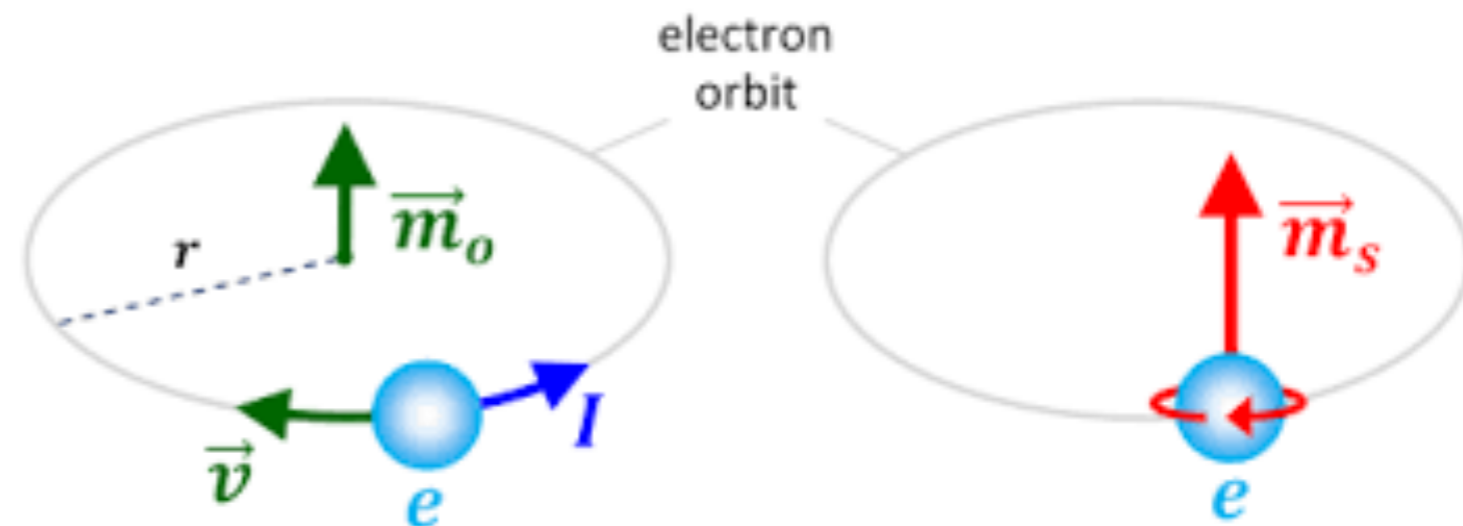
Спин - **собственный** момент импульса фундаментальной частицы, **не связанный** с её вращением как целого



Спин имеет квантовую природу

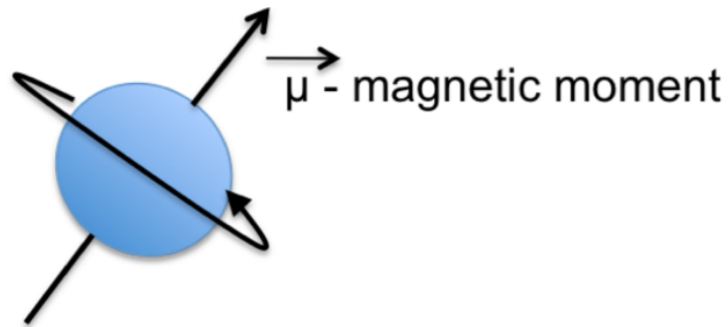
Измеряется в единицах \hbar

Спин протона - 1/2
дейтрона - 1



Каждая частица может одновременно обладать как орбитальным моментом, так и спином

Сложность нуклонов



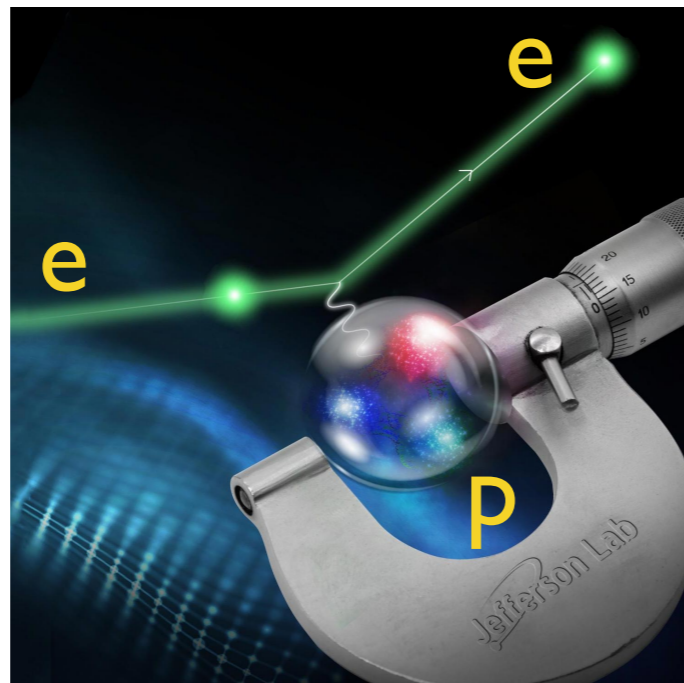
$$\vec{\mu}_S = g_S \times \frac{e}{2m} \times \vec{S}$$

	g_S (ожидаемое)	g_S (измеренное)
e	-2	-2.0023
p	2	5.58
n	0	-3.83

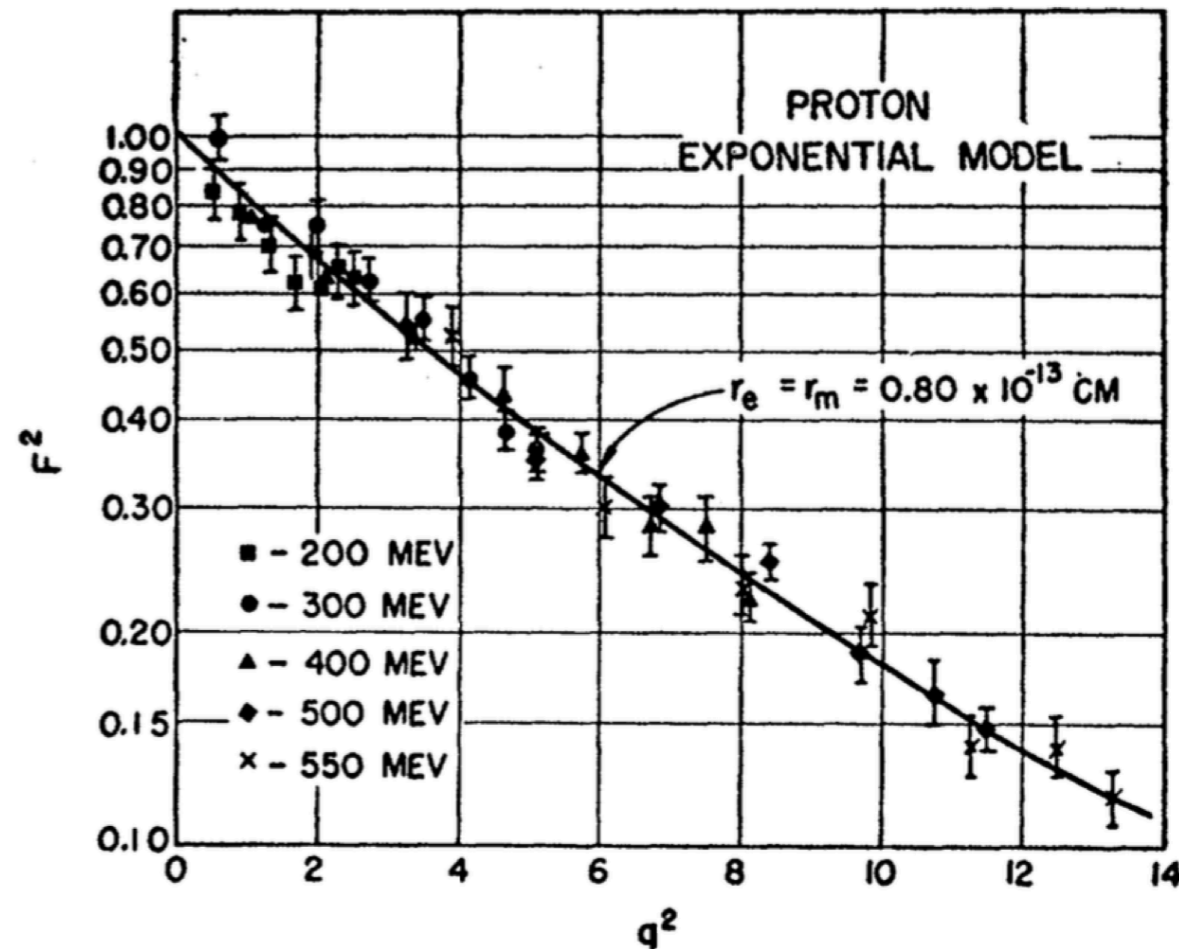
1930-е

Это было первым указанием на то, что нуклоны являются композитными объектами.

Размер протона



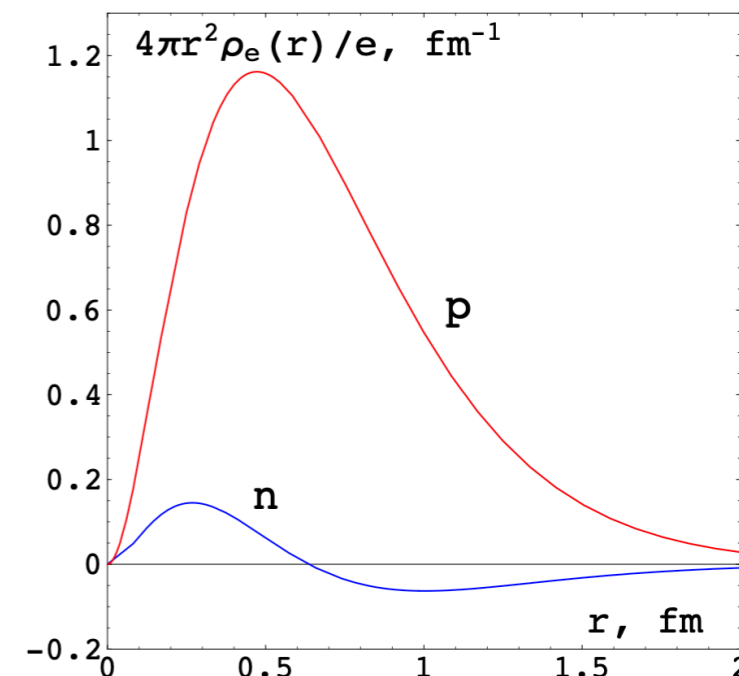
**Р. Хофштадтер -
нобелевская премия 1961 г.**



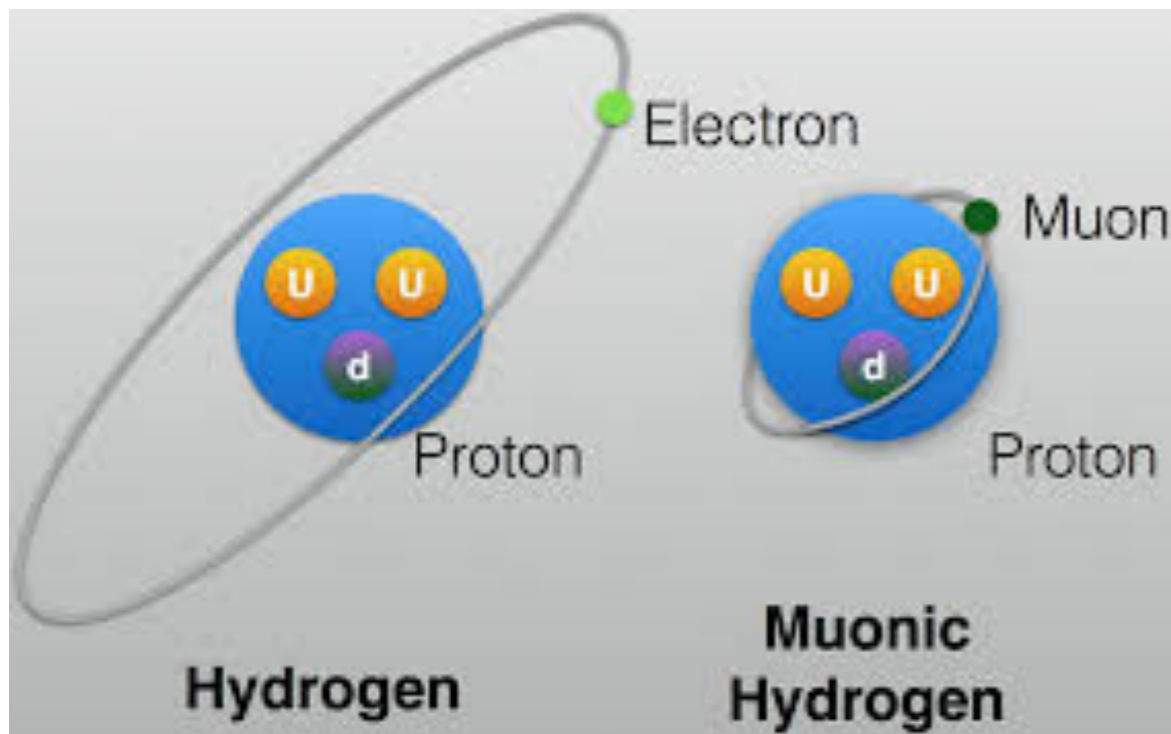
формфактор

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega} \Big|_{\text{Т. 3.}} \times F^2(q^2) \quad \text{переданный (4)-импульс}$$

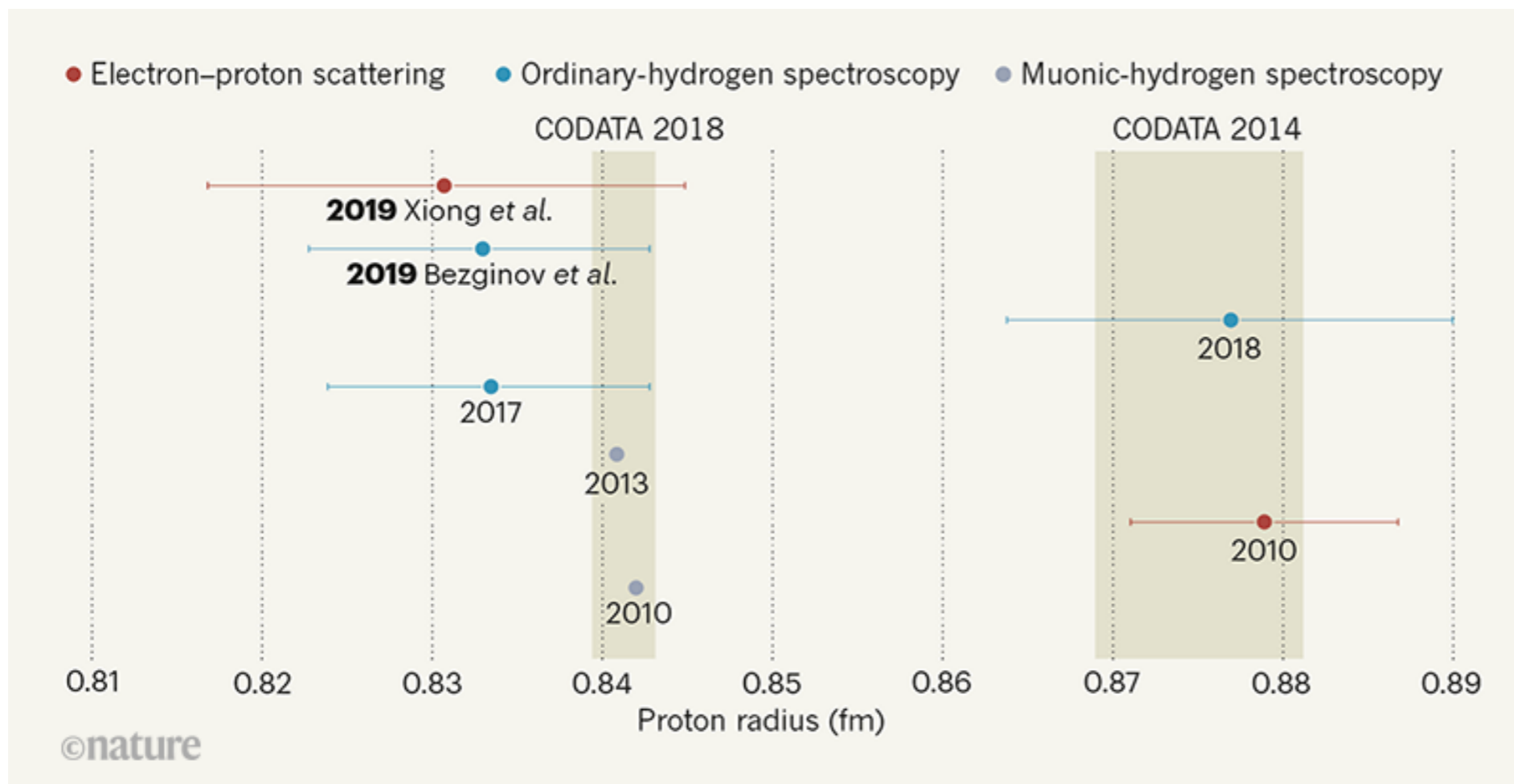
$$F(q^2) \approx 1 - \frac{q^2 \langle r^2 \rangle}{6\hbar^2} \quad \text{среднеквадратичный электрический радиус}$$



Радиус протона



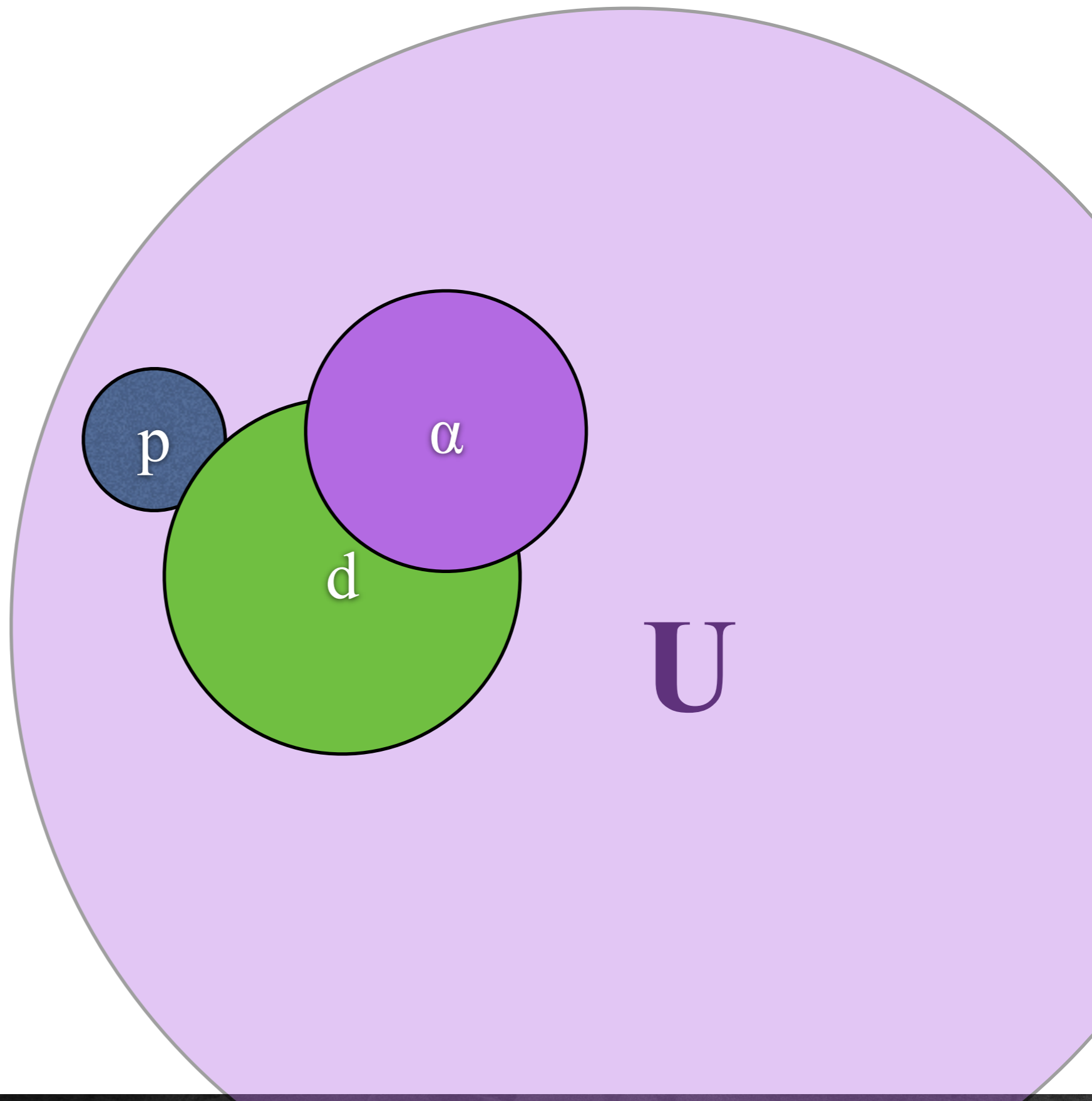
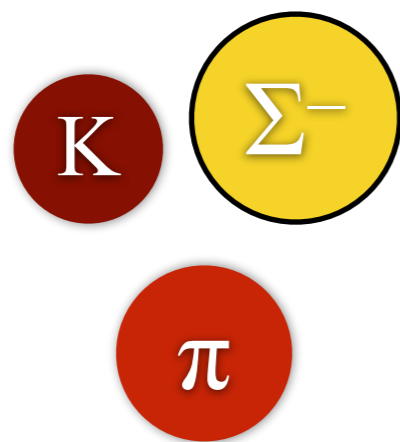
Загадка радиуса протона: разные методы дают разные результаты



Решена или нет?

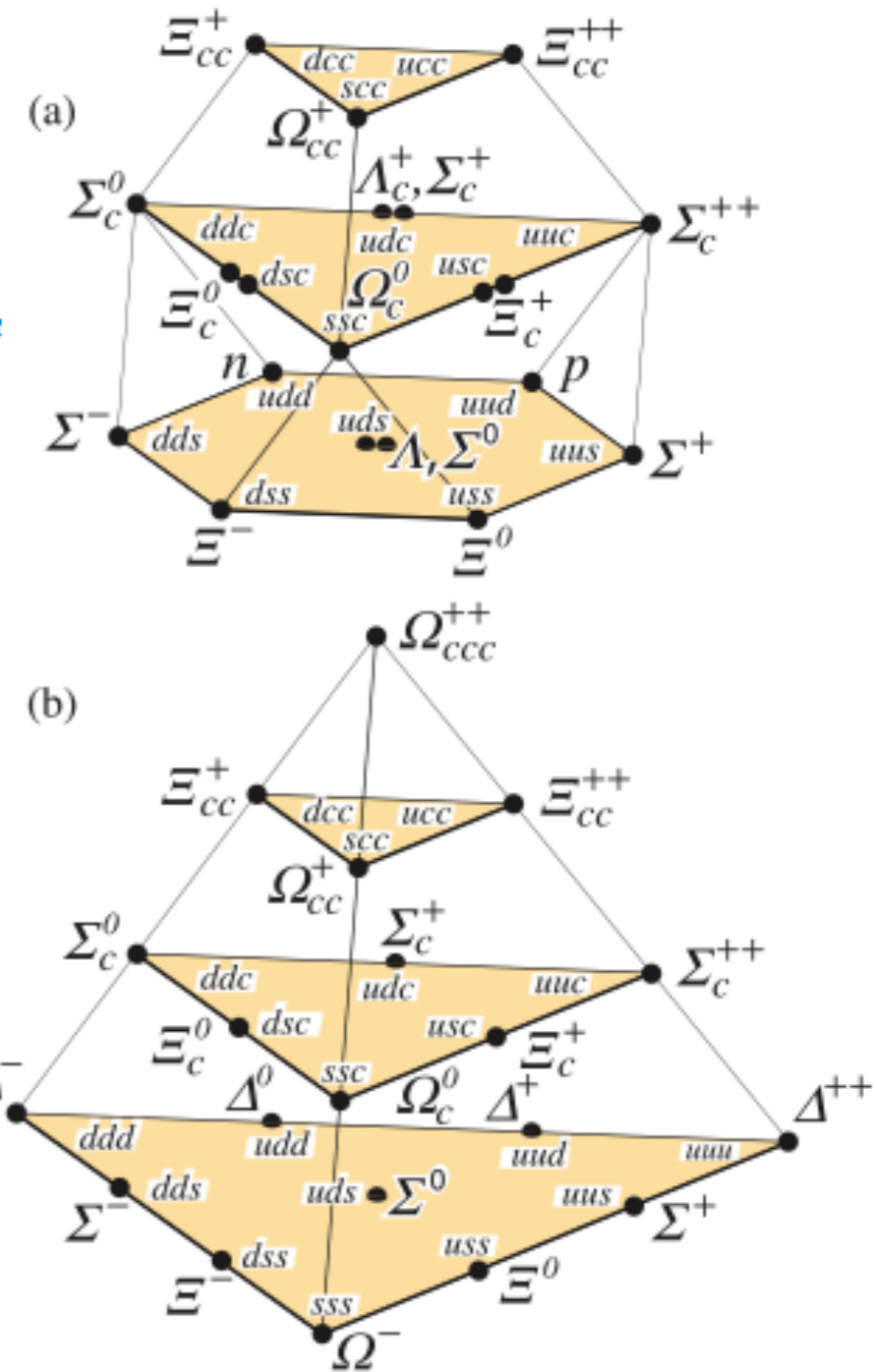
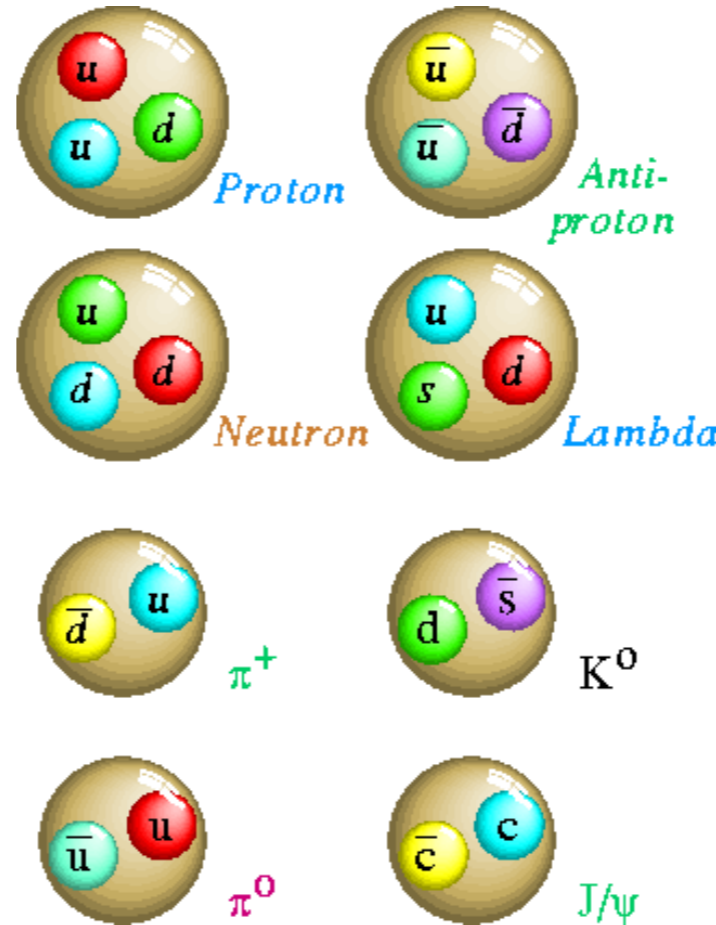
Адроны в масштабе

$r_0 = 1.4 \text{ фм}$



Кварки

	I	II	III
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom



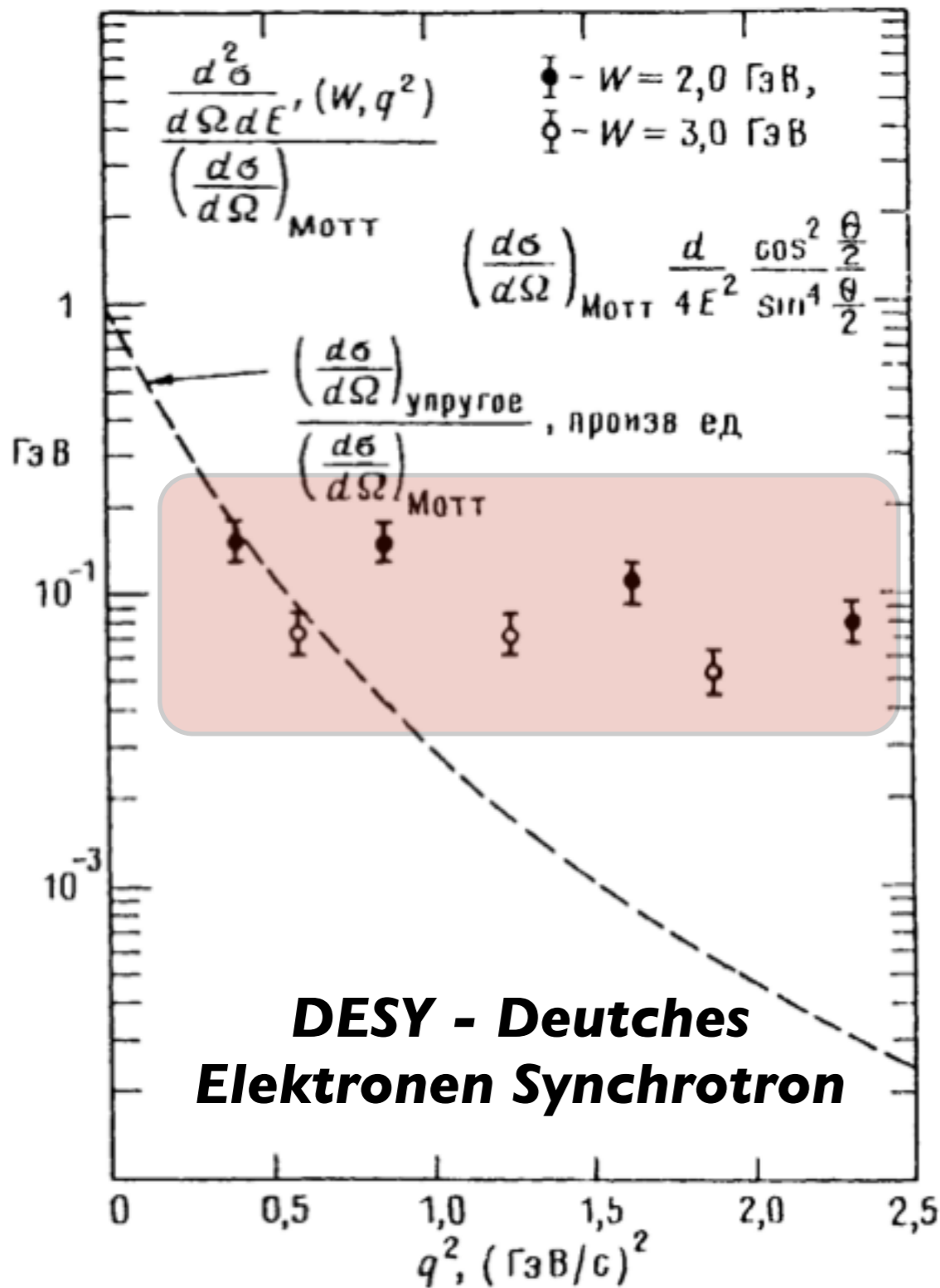
1964 год

М. Гелл-Манн и Д. Цвейг - нобелевская премия 1969 г.

Партоны

Внутри нуклона есть
точечные объекты -
партоны

Партонная модель - 1969 г



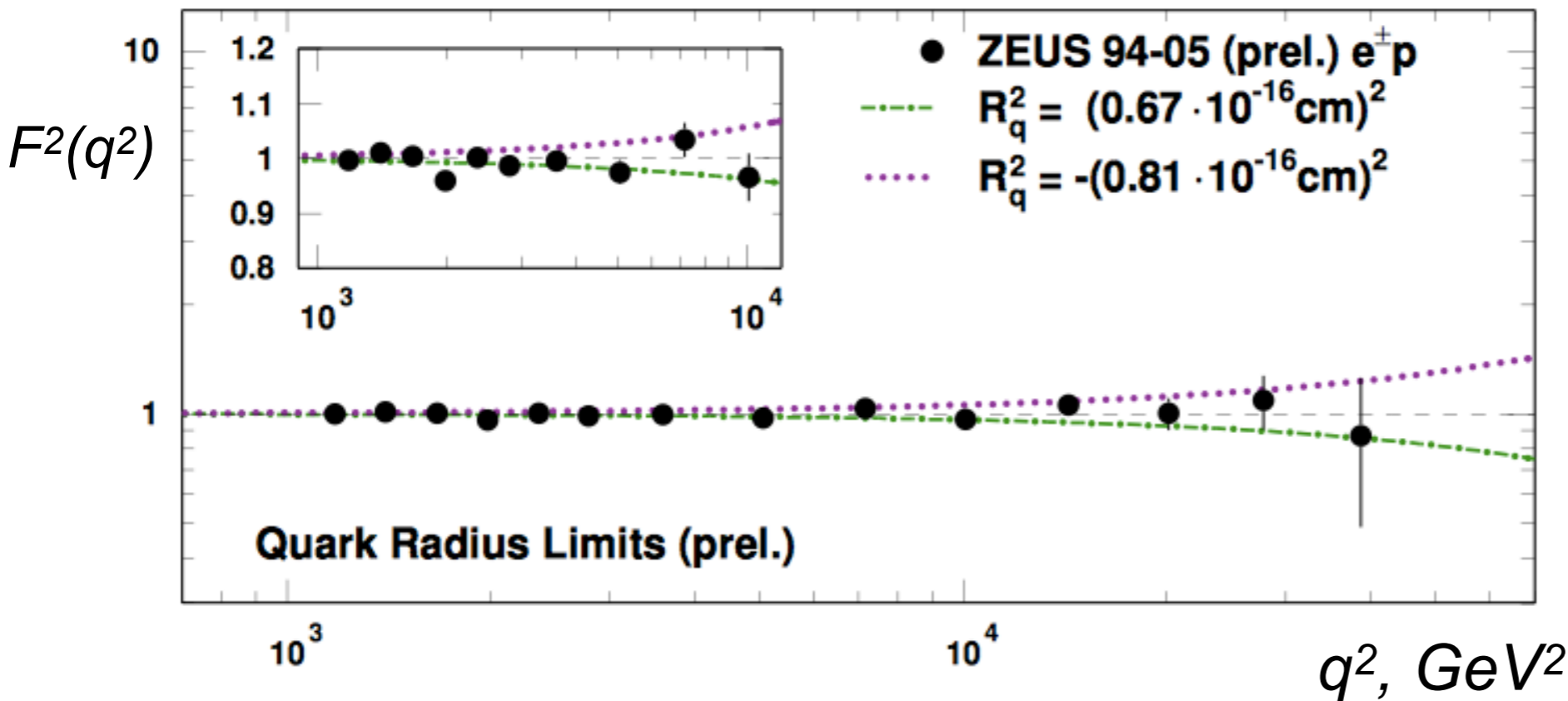
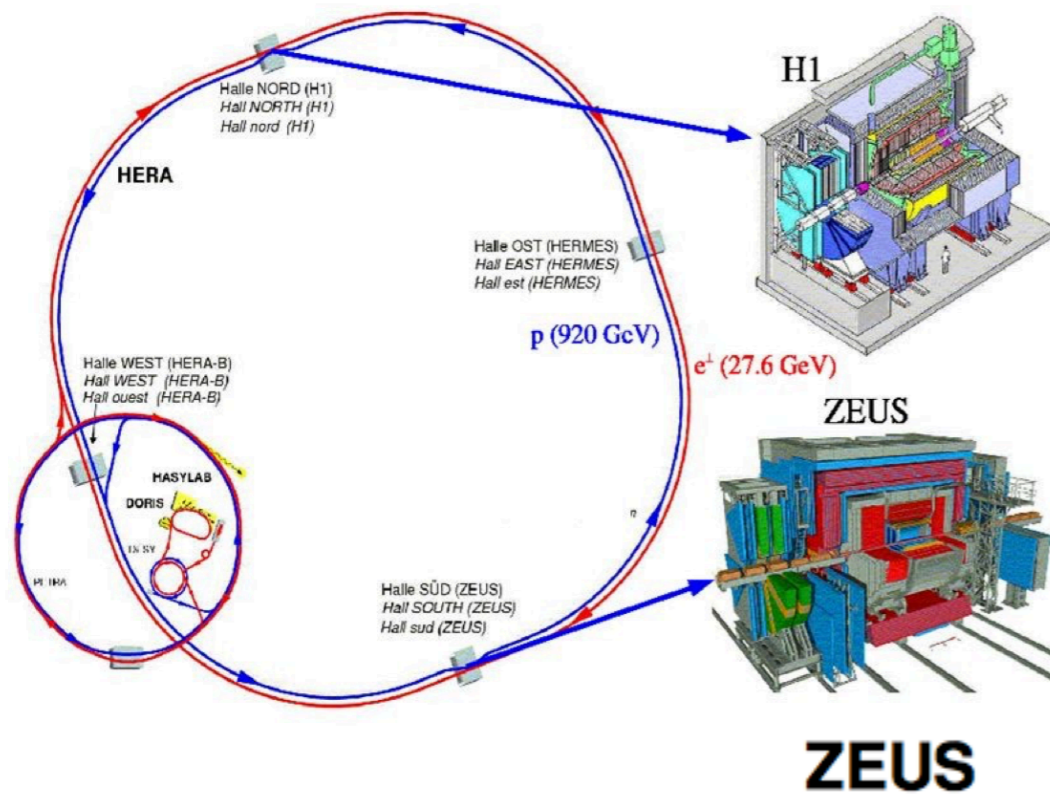
Р. Фейнман

В начале 70х партоны были
отождествлены с кварками

Размер кварков

HERA - электрон-протонный коллайдер в DESY

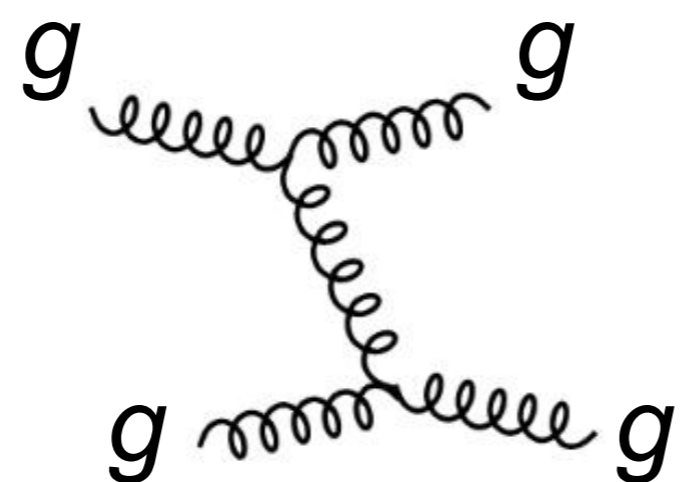
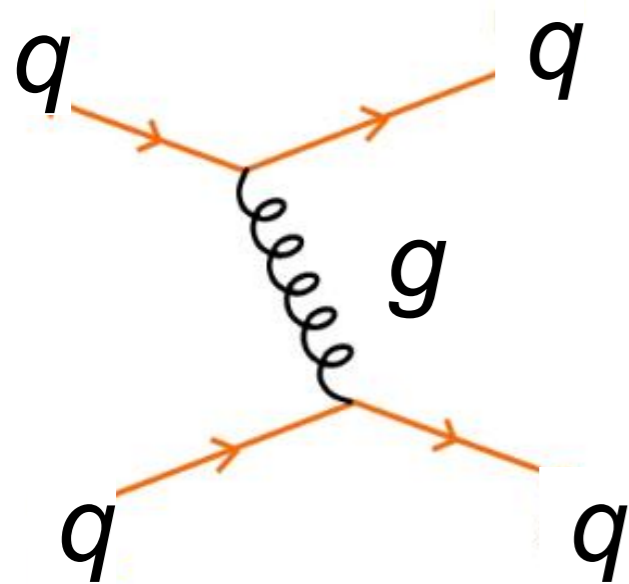
Пока нет никаких указаний на то, что кварки имеют внутреннюю структуру



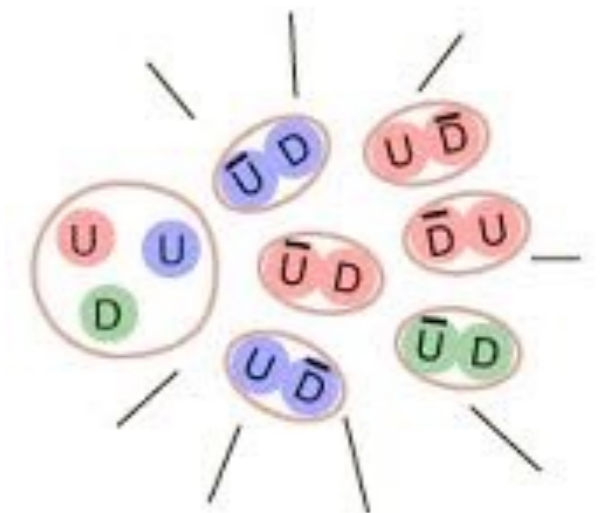
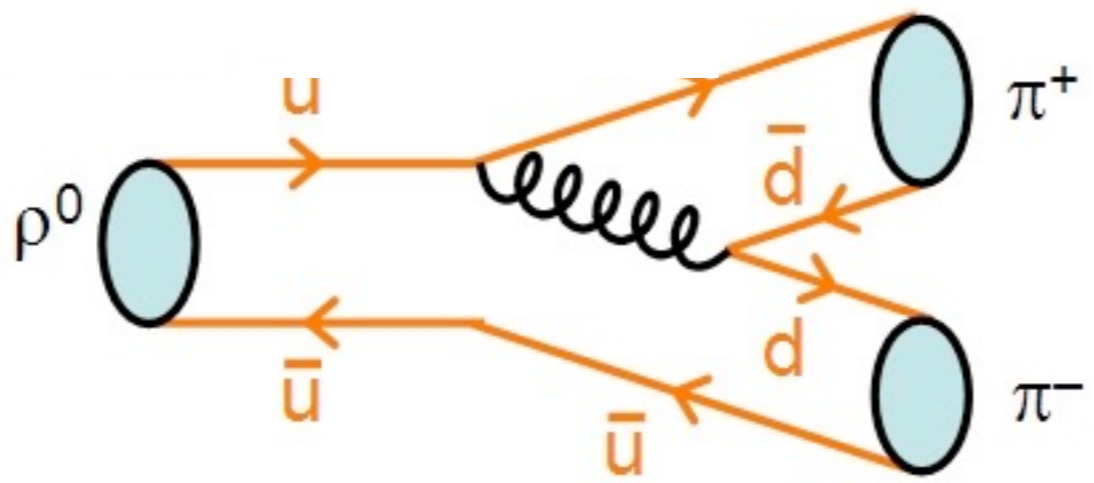
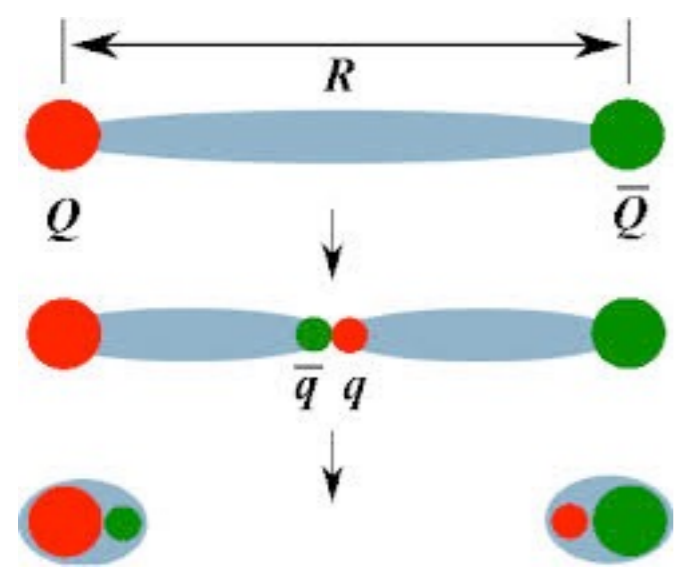
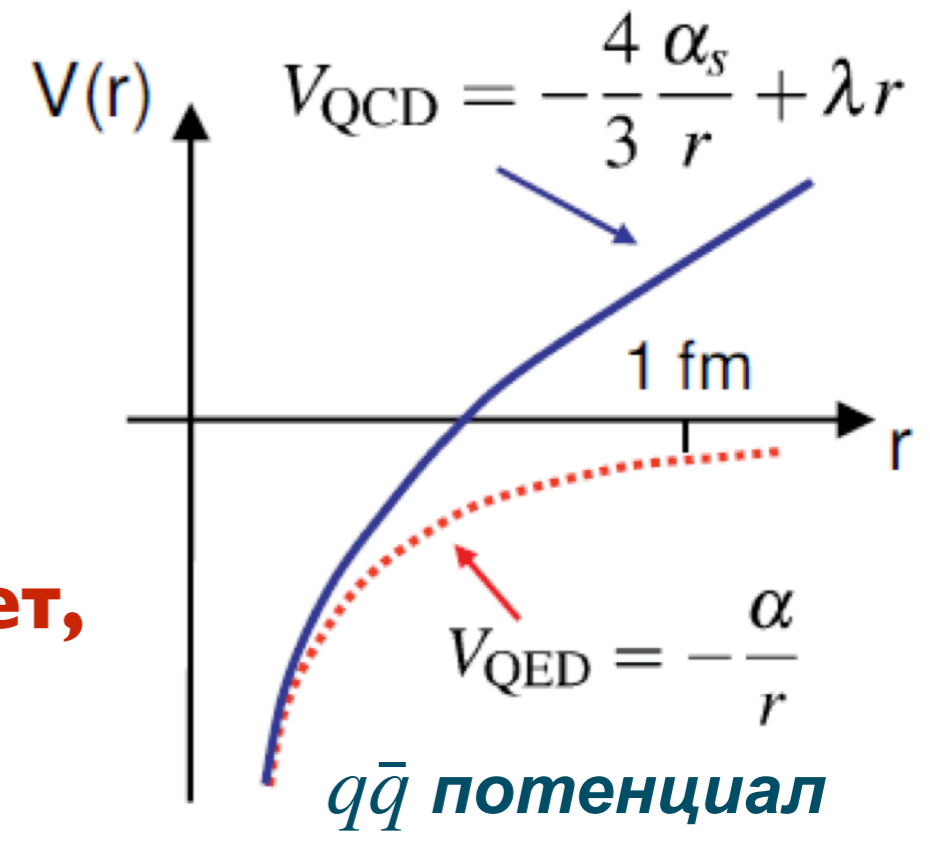
$$F(q^2) \approx 1 - \frac{q^2 \langle r_q^2 \rangle}{6\hbar^2}$$

$$r_q < 0.7 \times 10^{-3} \text{ fm}$$

Квантовая хромодинамика



Аналог в терминах КЭД: **свет,**
испускающий свет!

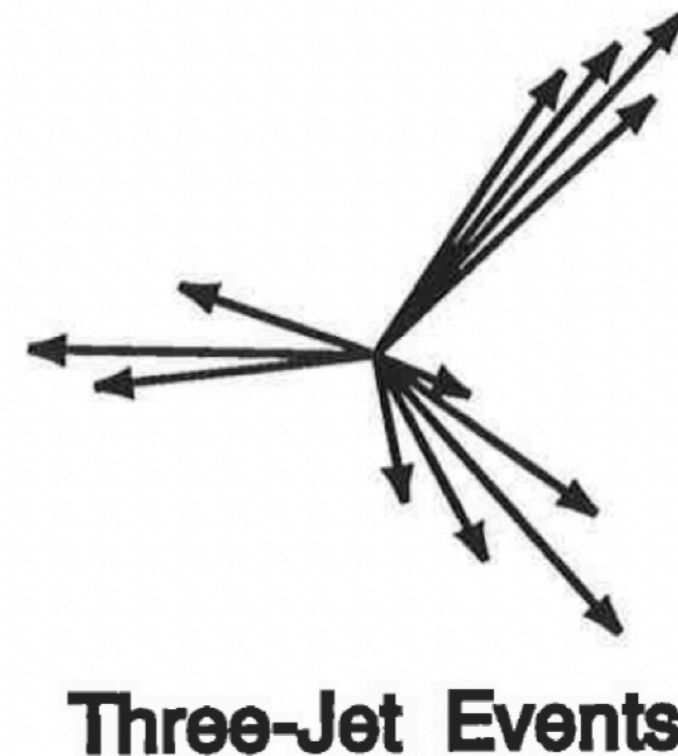
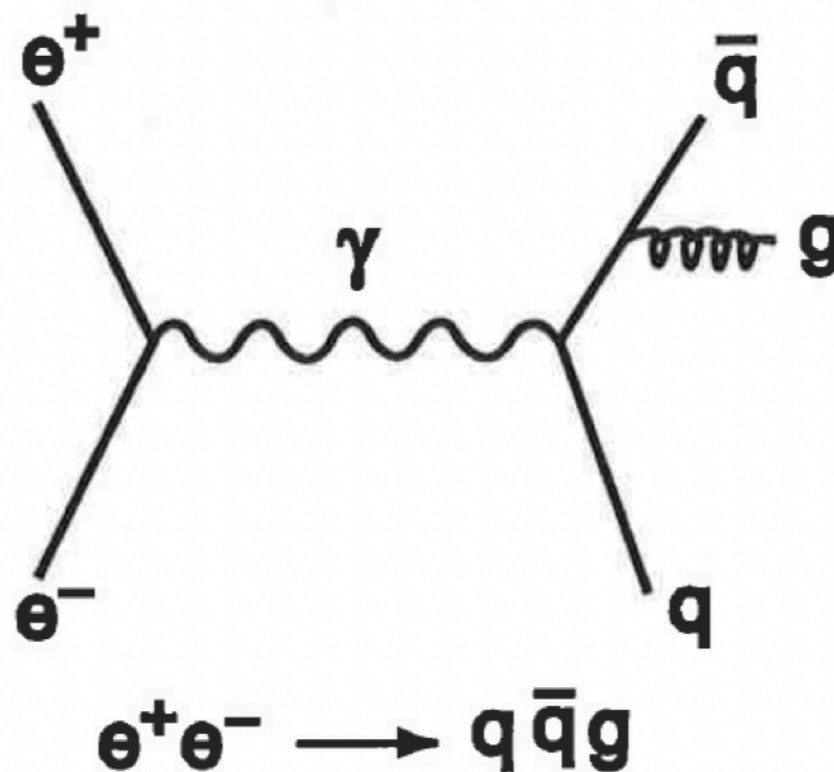


Конфайнмент при больших
но асимптотическая свобода на масштабе ~1 фм

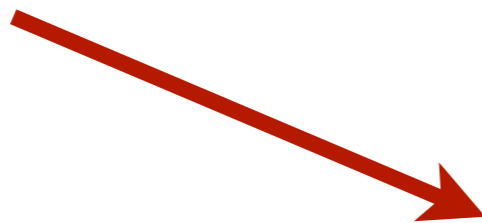
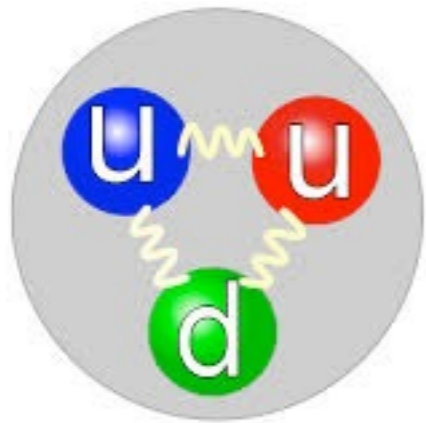
Глюон

- Самовзаимодействующая частица
- 8 ГЛЮОНОВ
- $m=0$ (теоретическое значение)
- $m < 1.3 \text{ MeV}$ (экспериментальный предел)
- Спин = 1

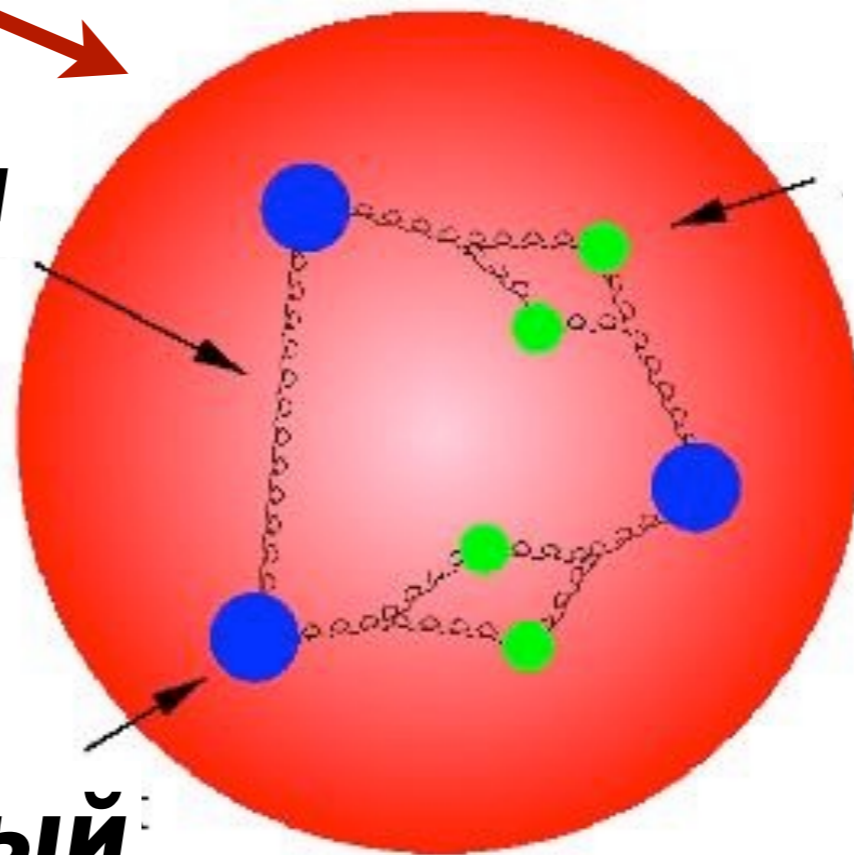
PETRA
коллайдер
 $\sqrt{s} = 27 \text{ GeV}$
1979



Морские кварки



Глюон

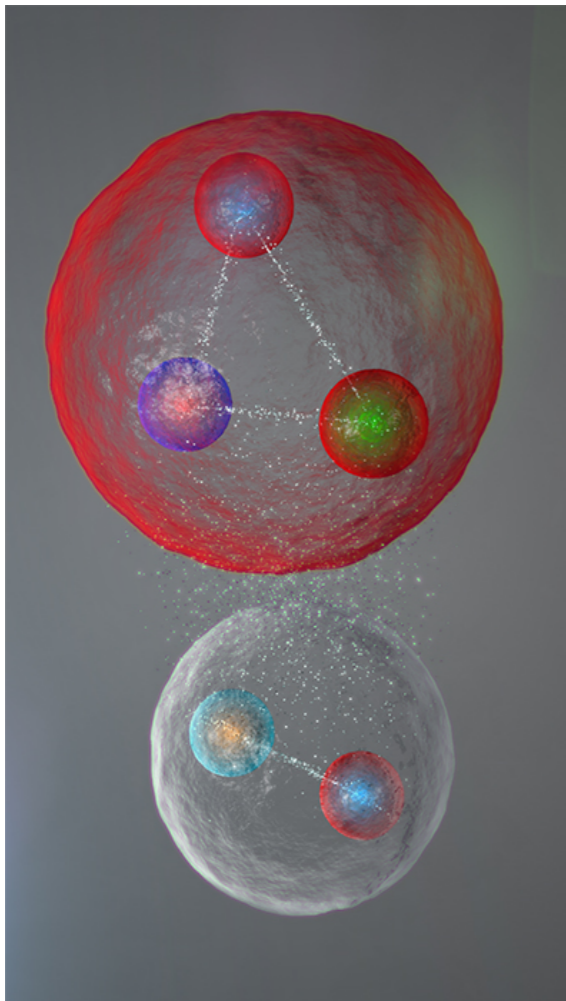


**Морские
кварки и
антикварки**

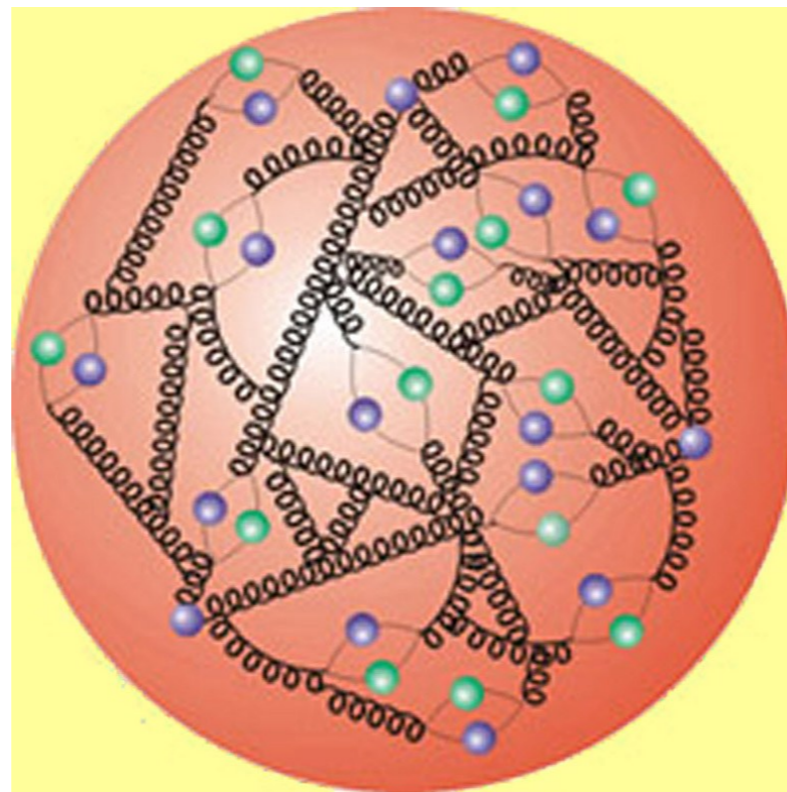
**Валентный
кварк**

КХД - основные направления

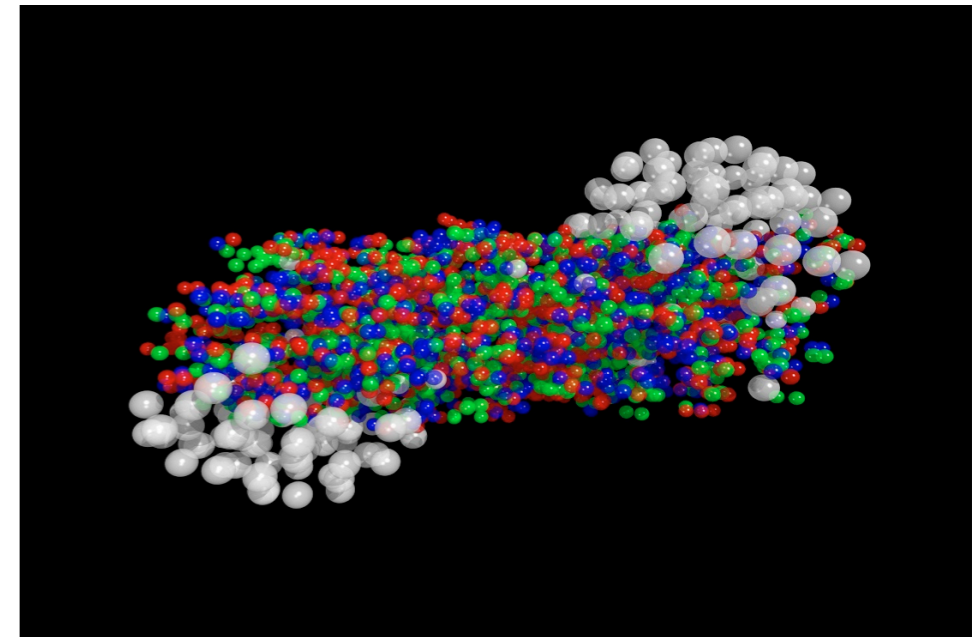
Спектроскопия
адронов



Структура
адронов



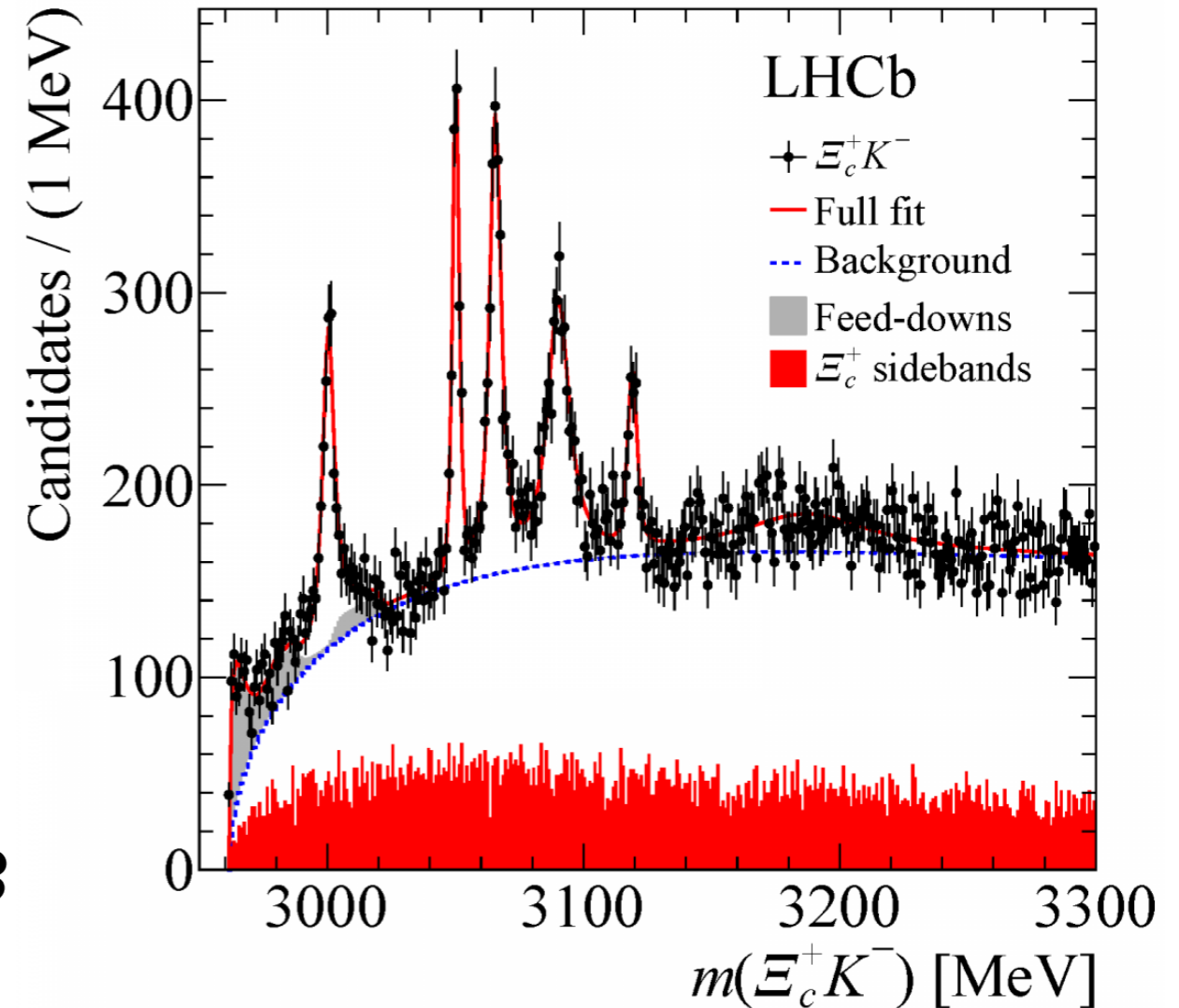
Адронная
материя в
экстремальных
условиях



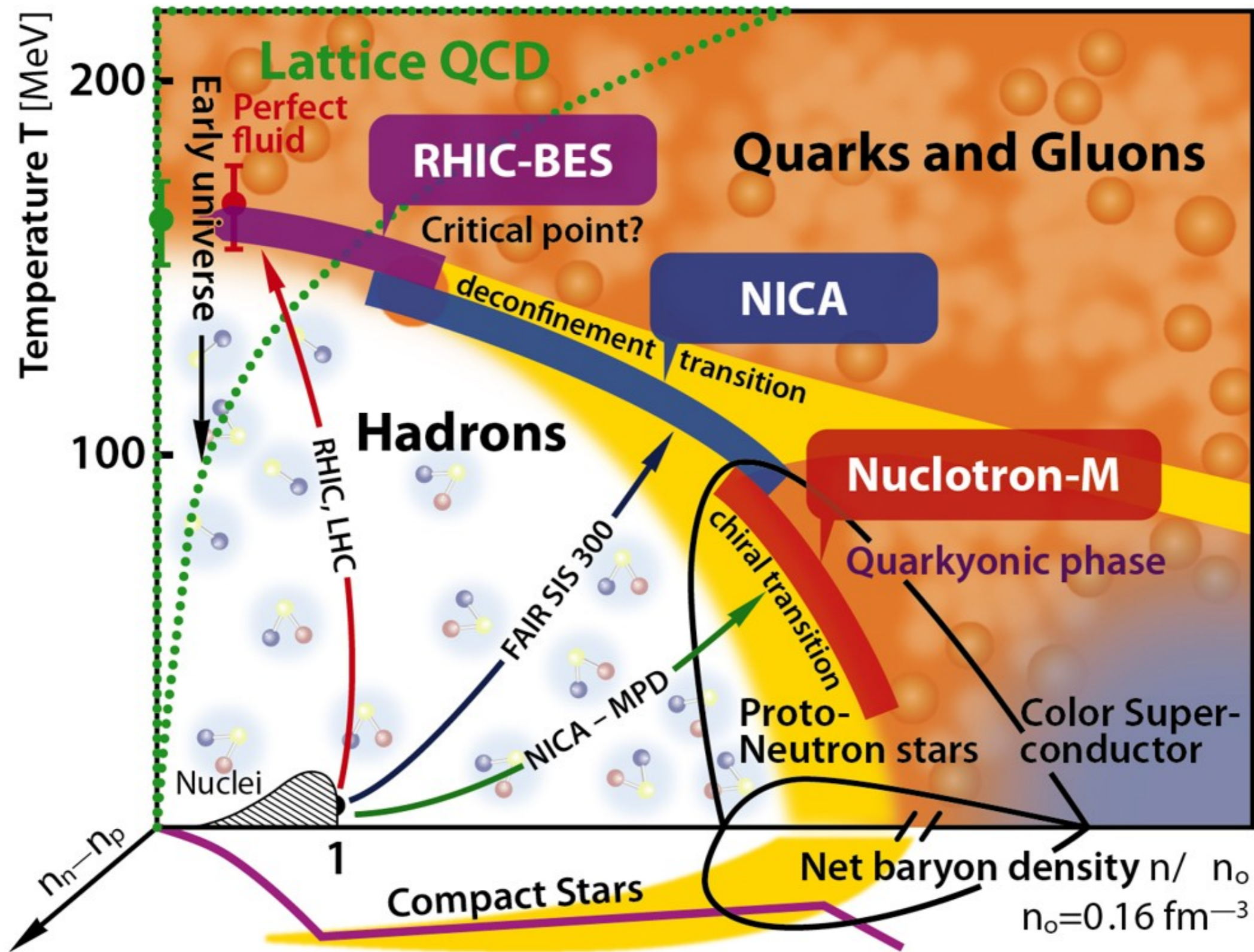
Спектроскопия адронов



Какие связанные системы можно построить из кварков и глюонов и каковы будут свойства этих систем?



Адронная материя

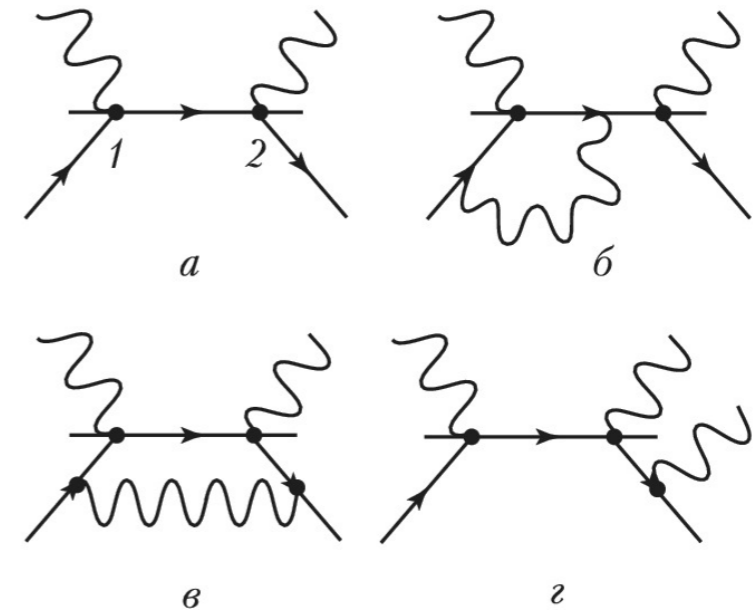


Проблема описания свойств адронов из первых принципов

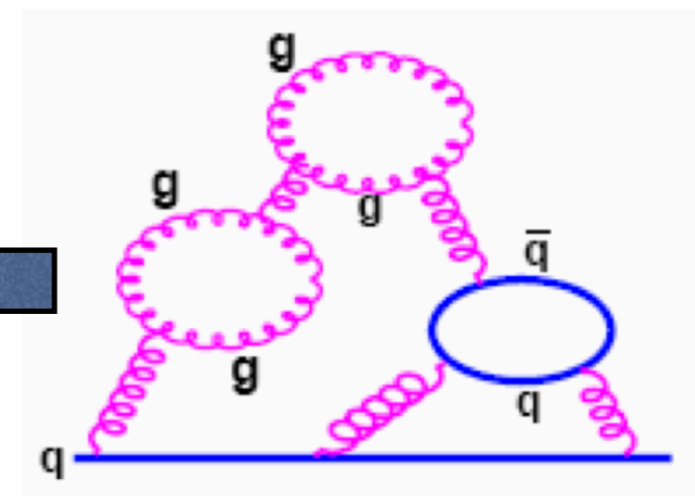
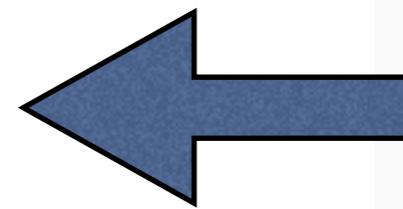
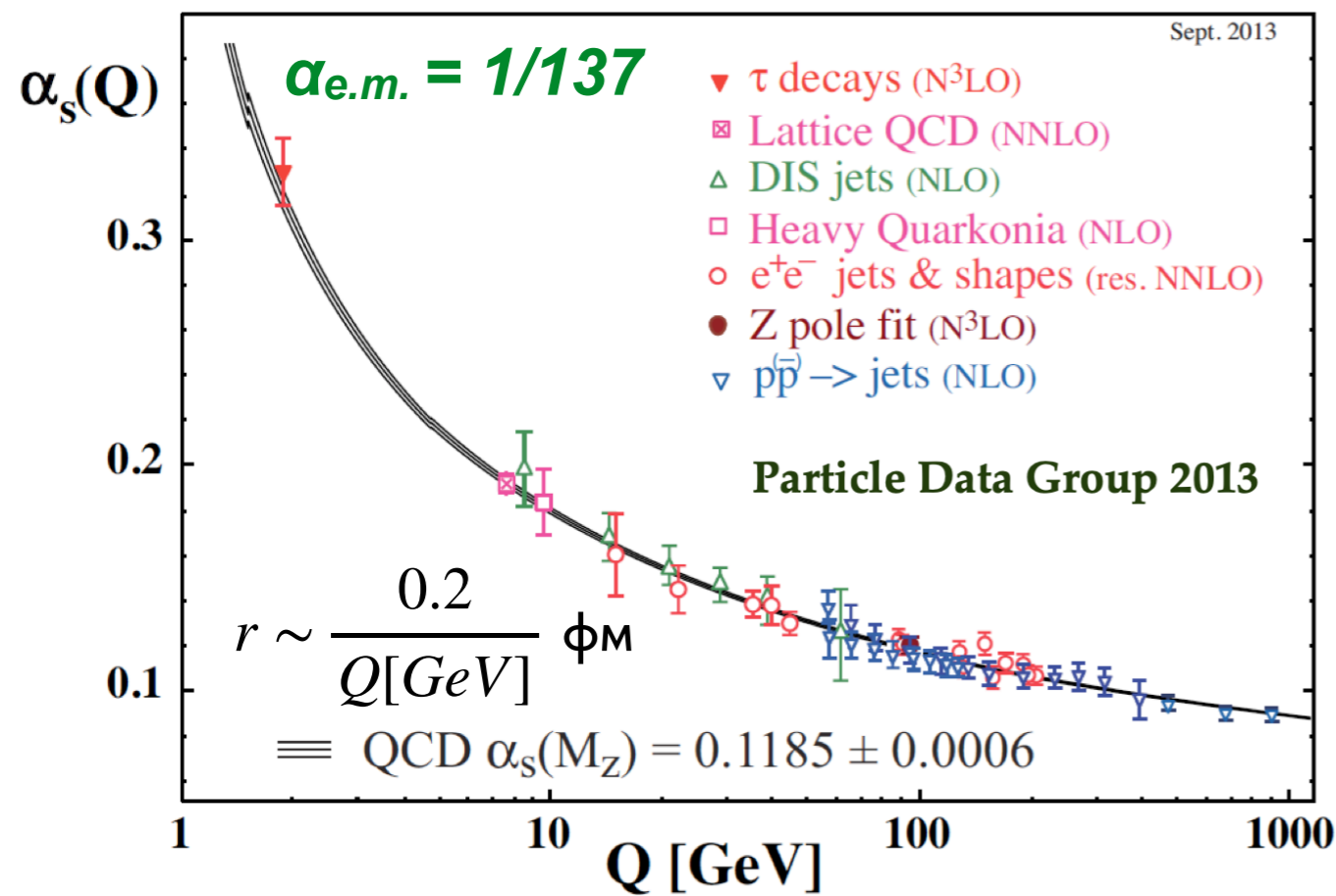
Техника фейнмановских диаграмм

$$\sigma \sim \sum_n c_n \alpha^n$$

α - константа взаимодействия.



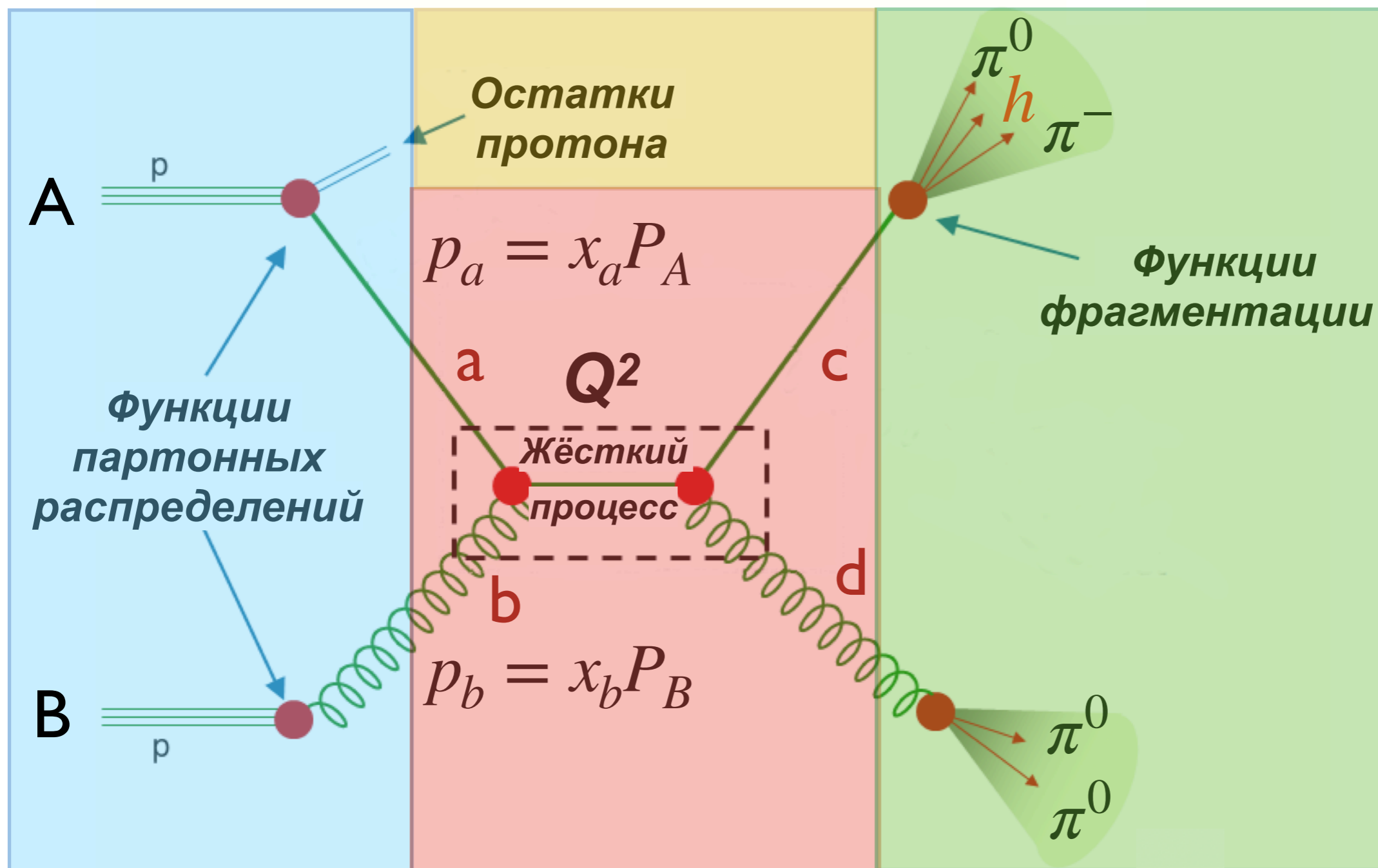
Ряд быстро сходится, если $\alpha \ll 1$



Конфайнмент строго не доказан!

В отличие от атома водорода, мы (пока?) не можем описать из первых принципов структуру адронов и их взаимодействия при низких энергиях

Теорема о факторизации



x - доля импульса переносимая

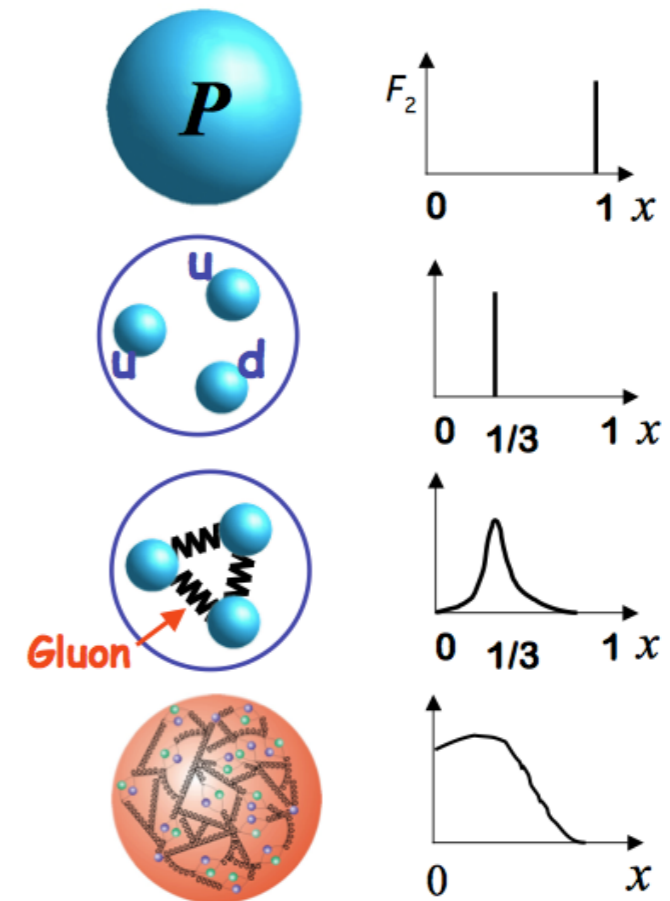
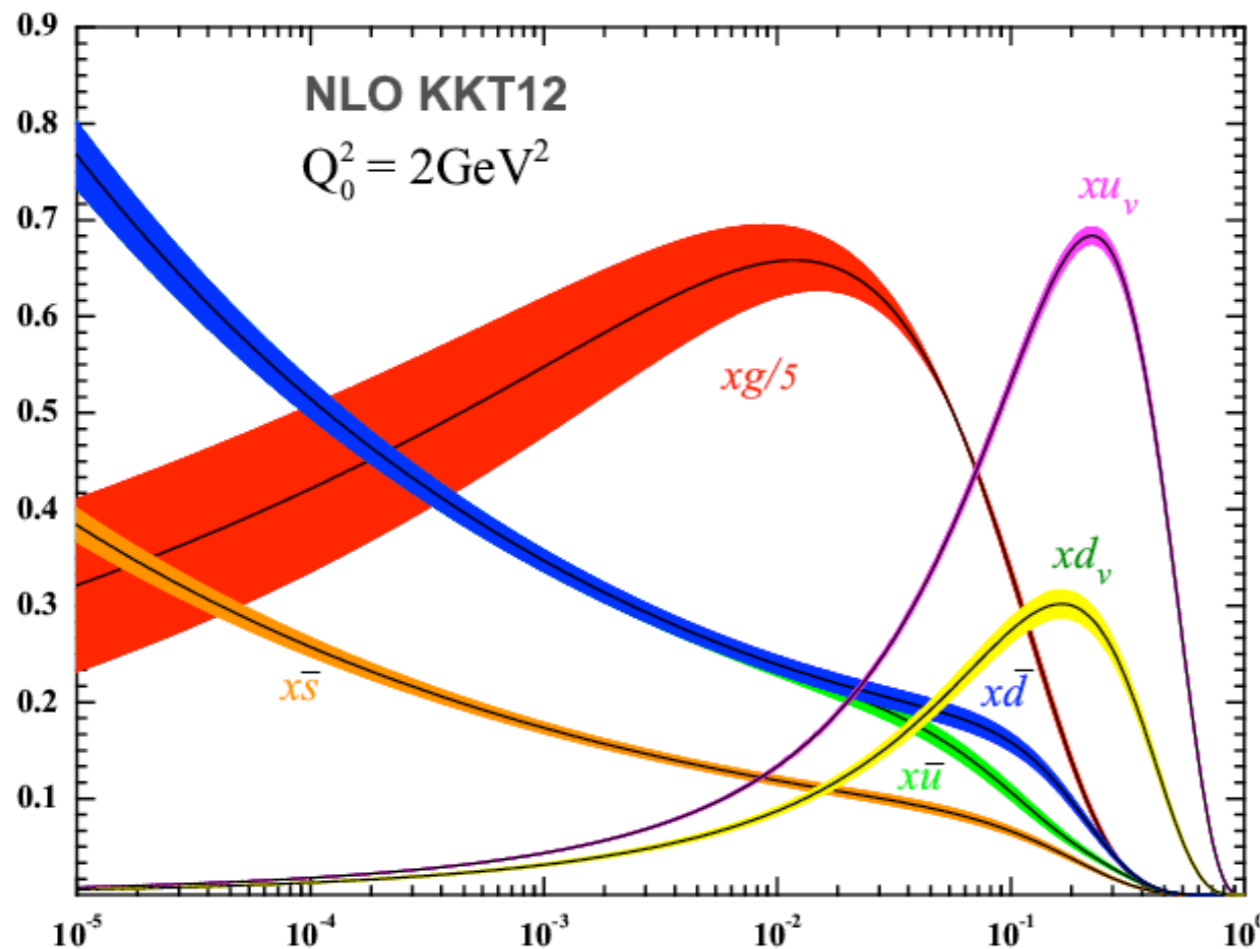
Q - характерная энергия, переданная жёсткому процессу

$$\sigma_{AB \rightarrow hX} = \sum_{a,b=q,\bar{q},g} \int dx_a dx_b f(x_a, Q^2) f(x_b, Q^2) \times \hat{\sigma}_{ab \rightarrow cd}(x_a, x_b, Q^2) \times D_{cd \rightarrow h}$$

$$Q^2 \gg 1 \text{ GeV}^2/c^2$$

Партонные распределения

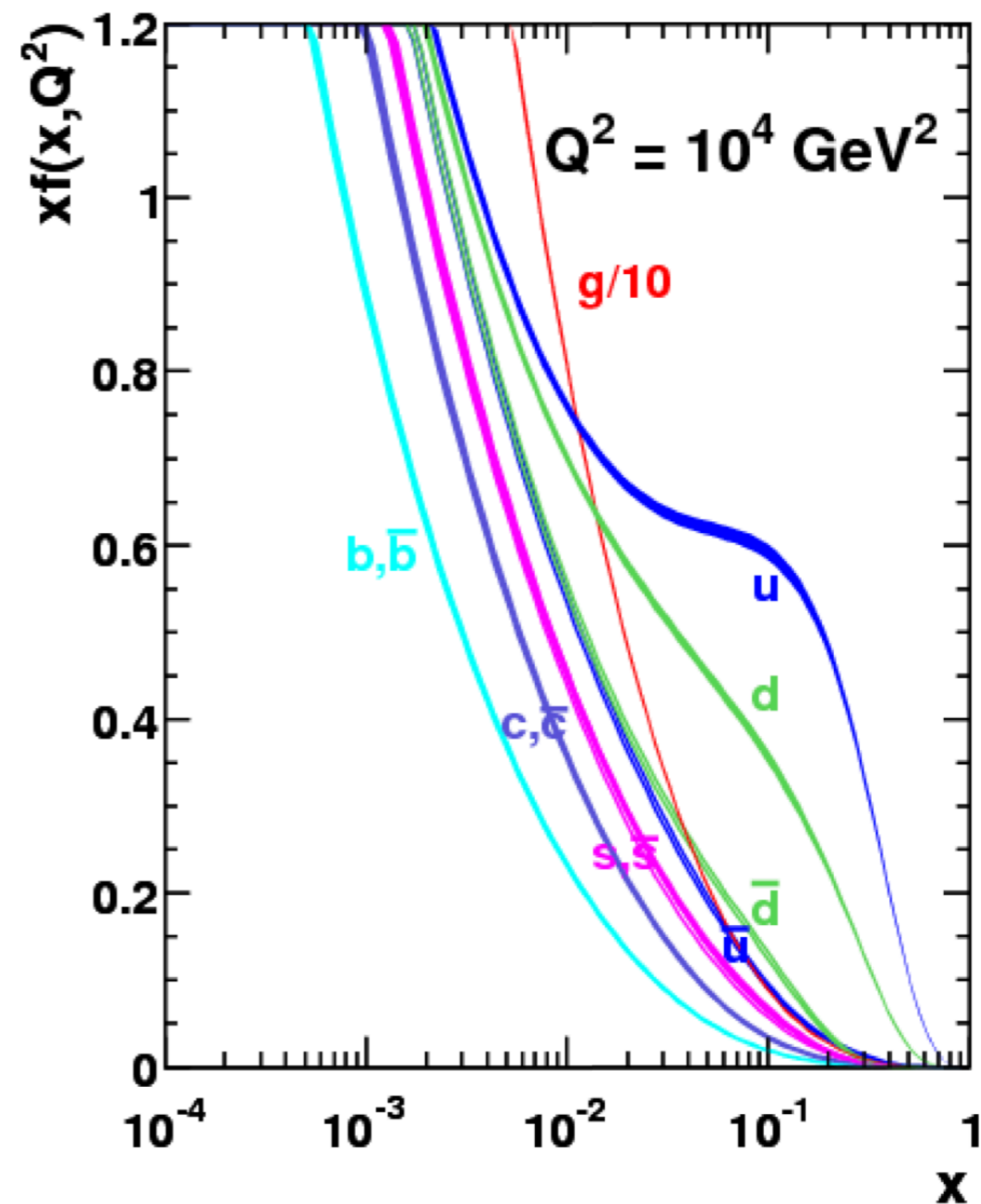
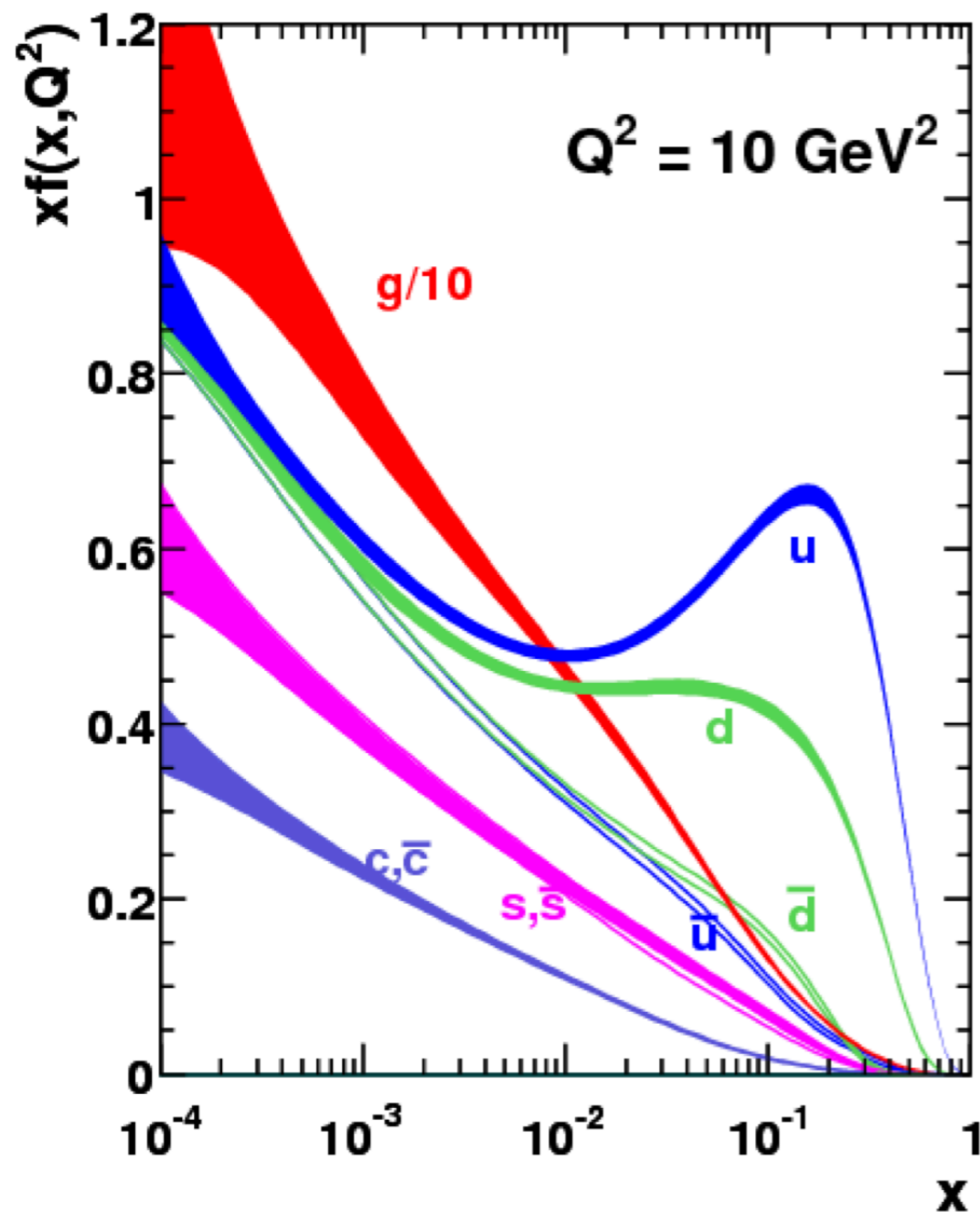
Функции партонных распределений (PDF) $f(x, Q^2)$ определяют **вероятность** найти в нуклоне партон, несущий долю импульса x .



Универсальны^x, т. е. не зависят от процесса и являются фундаментальными свойствами нуклона как масса, заряд, магнитный момент и т. д.

Не выводятся в КХД из первых принципов - только эксперимент !

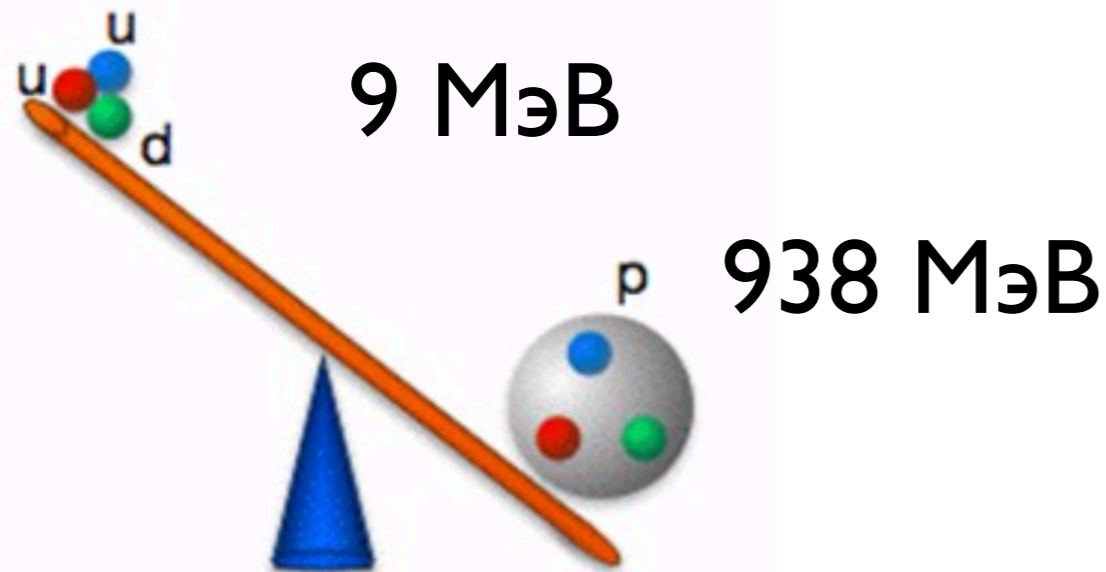
Партонные распределения



С ростом Q^2 растёт роль морских кварков!

Уравнения эволюции: $f(x, Q_1^2) \rightarrow f(x, Q_2^2)$

Масса протона

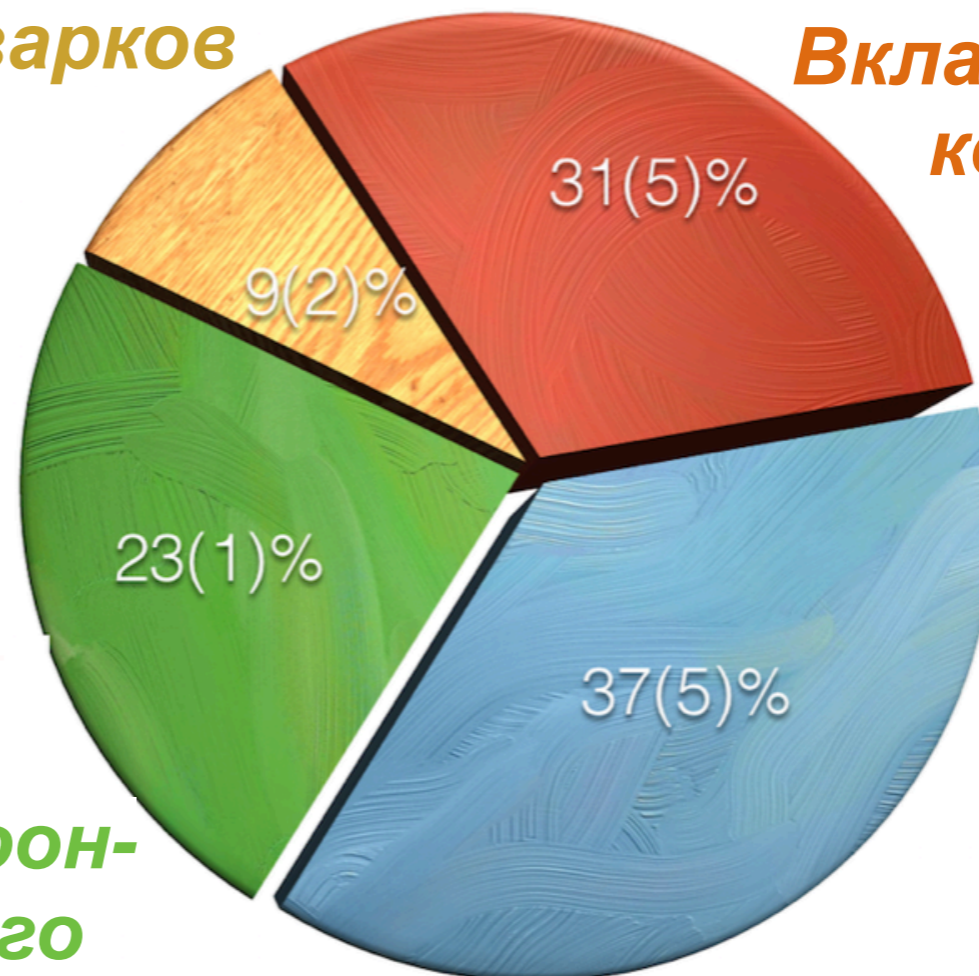


**Механизм Хиггса
практически не причастен
к формированию массы
протона!**

Вклад массы кварков

Вклад энергии кварков

Модельно-зависимая
декомпозиция массы протона



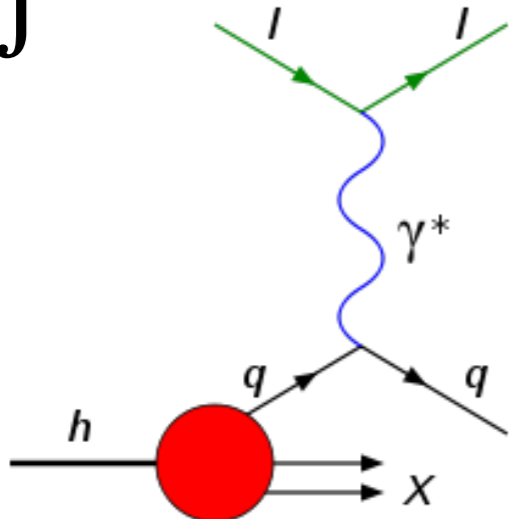
*Вклад глюон-
глюонного
взаимодействия*

Вклад энергии глюонов

Как измерить PDF ?

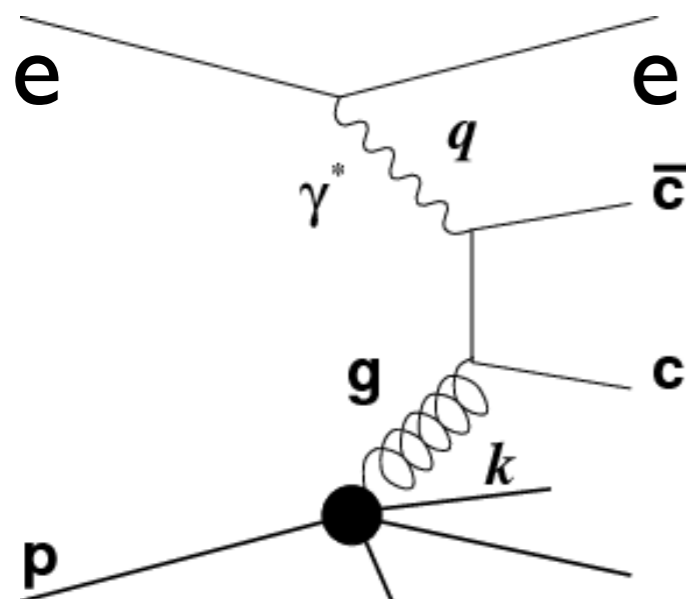
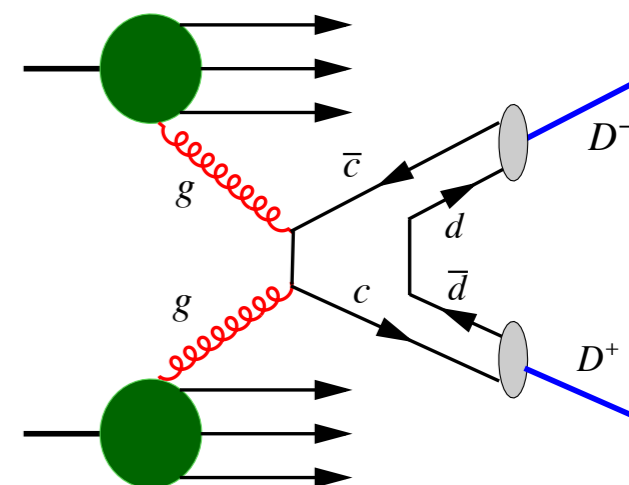
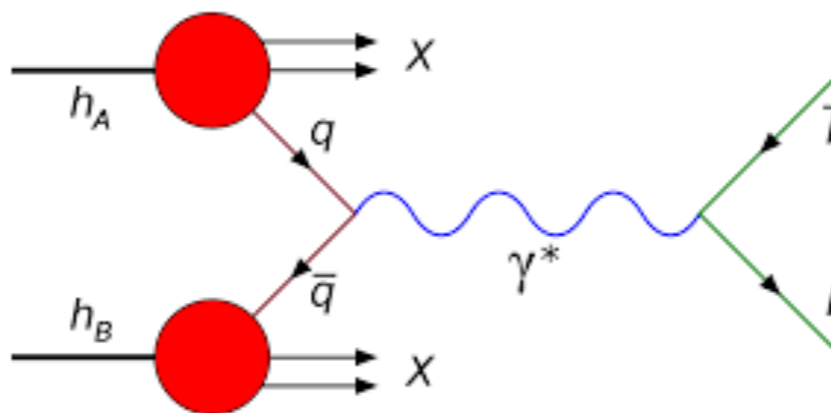
**Глубоконеупругое
рассеяние**

$$\sigma = \int \hat{\sigma} q(x) dx$$



Адронные взаимодействия

$$\sigma = \iint \hat{\sigma} q_A(x_A) q_B(x_B) dx_A dx_B$$

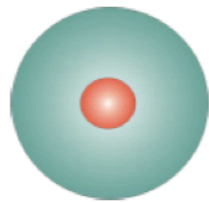


CTEQ Collaboration
JAM Collaboration
DSSV Collaboration
NNPDF Collaboration

...

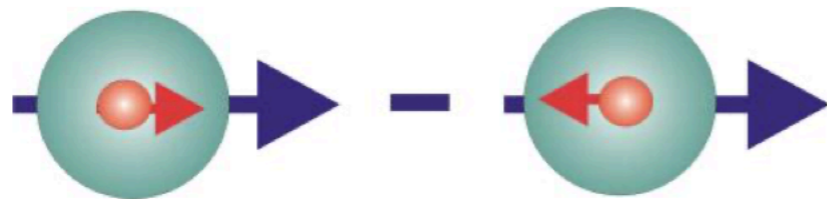
Поляризованный протон

$f(x)$



**Неполяризованное
распределение**

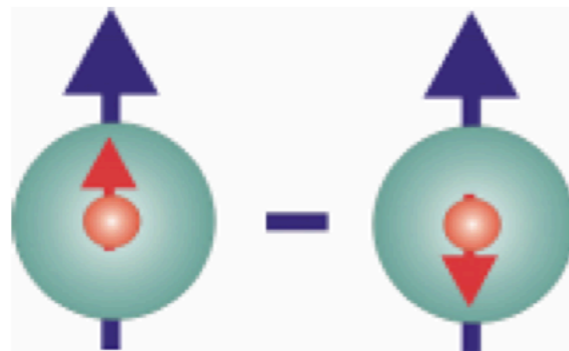
$\Delta f(x)$



Helicity

$$A_{LL} = \frac{\sigma^{++} - \sigma^{+-}}{\sigma^{++} + \sigma^{+-}} \sim \Delta q$$

$\Delta_T f(x)$



Transversity

Азимутальные
модуляции в сечениях

P

Спиновый кризис

Эксперимент EMC
(ЦЕРН) 1988 год

Вклад кварков в
спин протона -
не более 30% !

Наивная кварковая
модель

$$\frac{1}{2} = \sum_{q=u, \bar{u}, d, \bar{d}} \left(\frac{1}{2} \right)$$

Реальная
ситуация

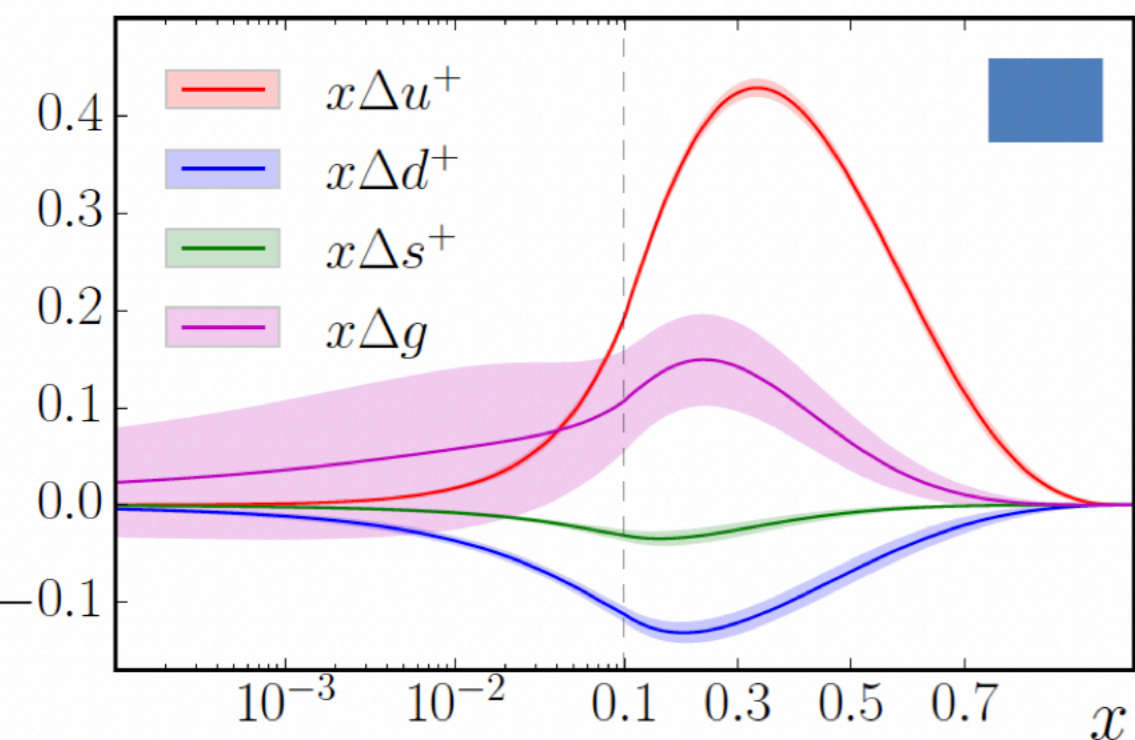
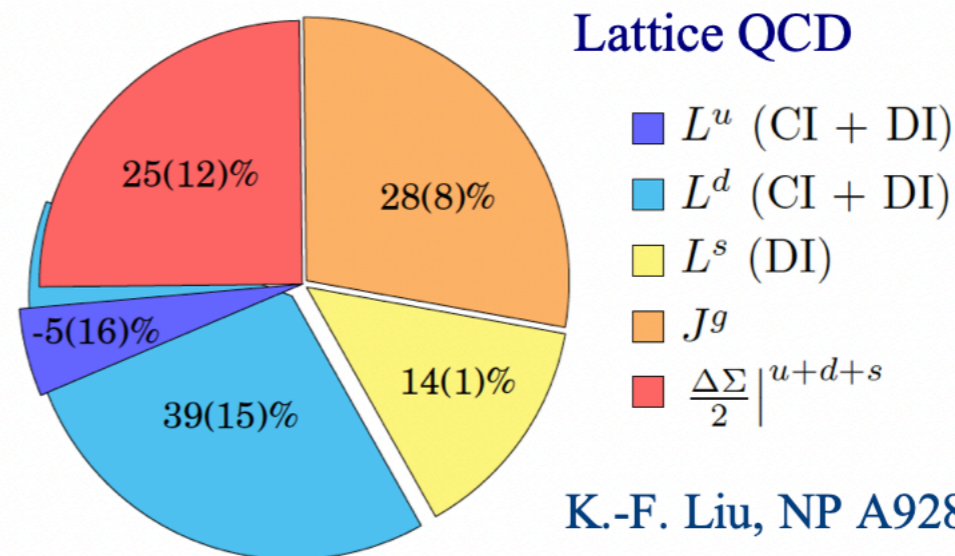
L - орбитальные моменты
кварков и глюонов

$$S_N = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

Спиновый кризис

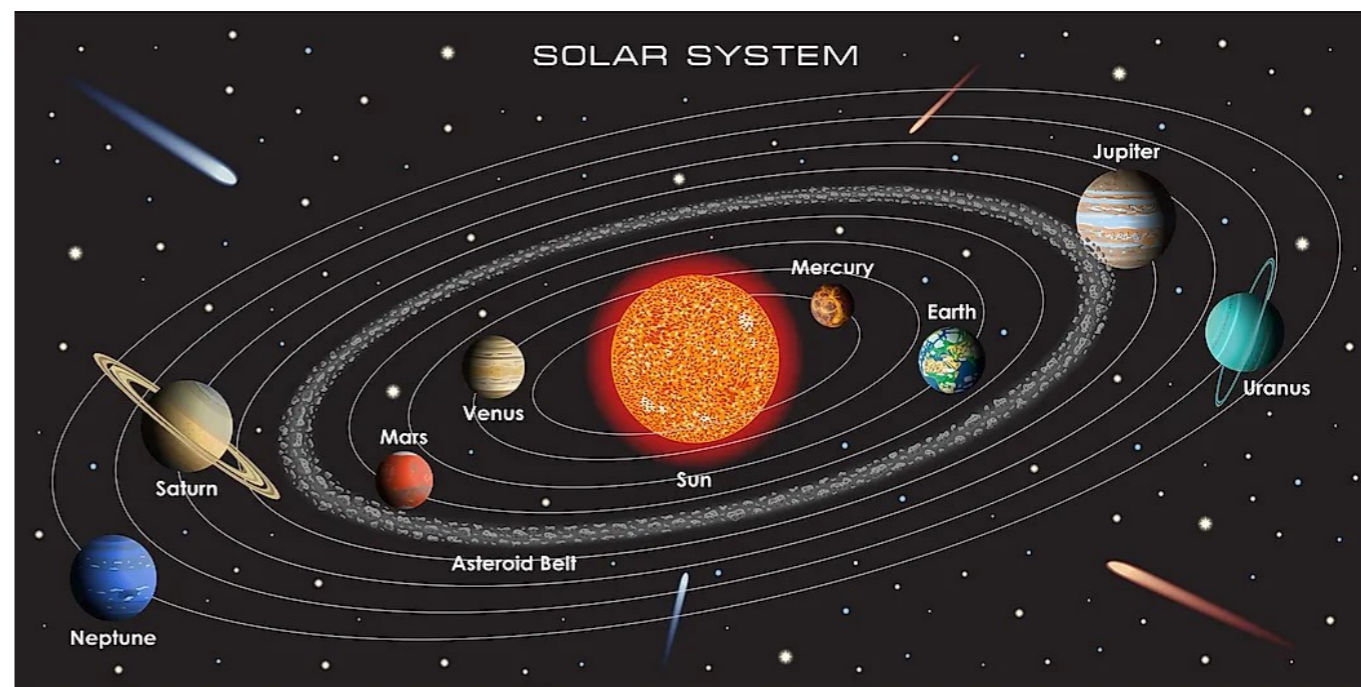
$$J = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + l$$

~30% ? ?
~10-20%



JAM Collaboration, PRD (2016).

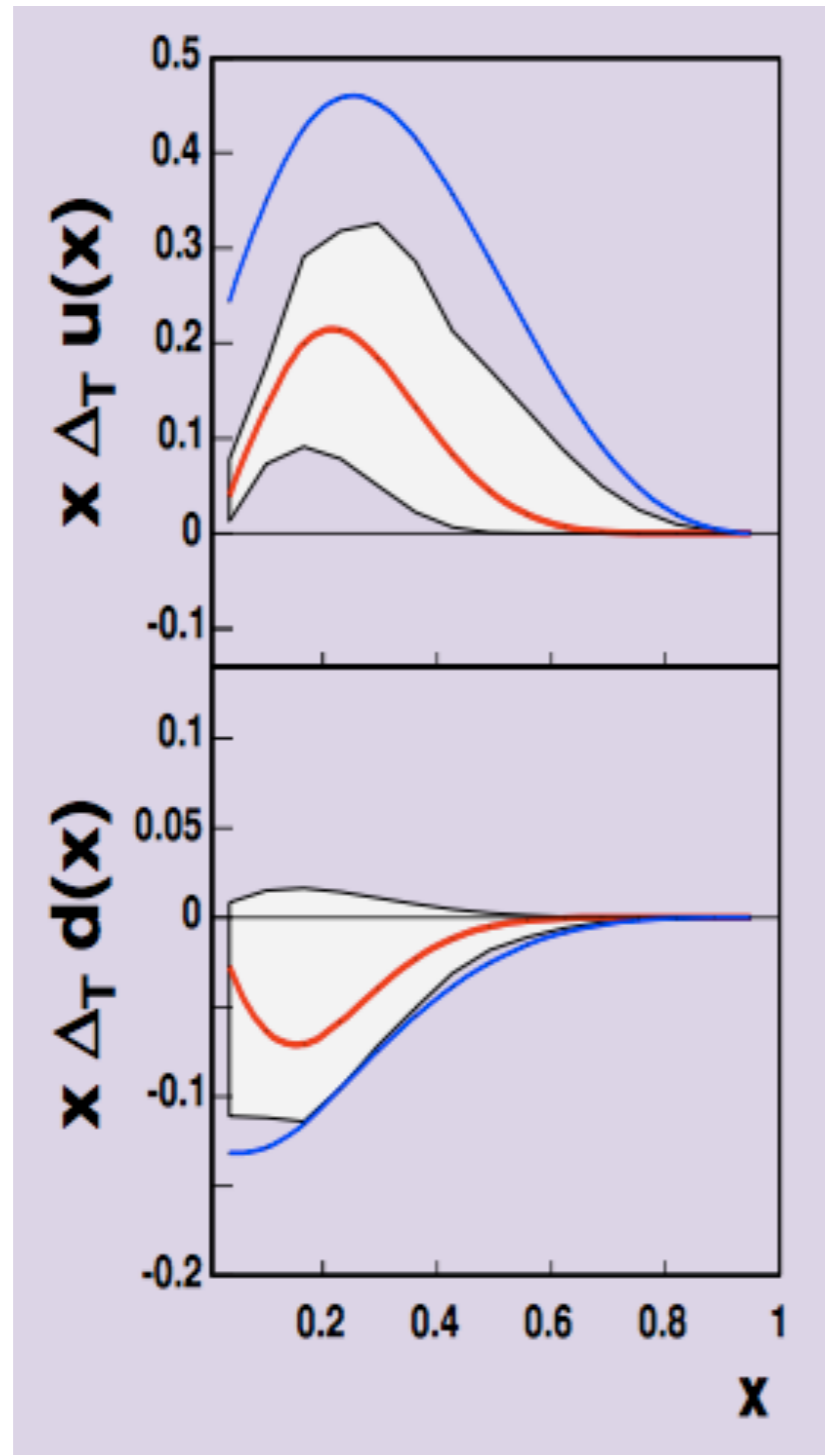
В Солнечной Системе



98% - угловой момент!

Для получения доступа к угловым моментам мы должны изучать 3D структуру нуклона!

Поляризация кварков

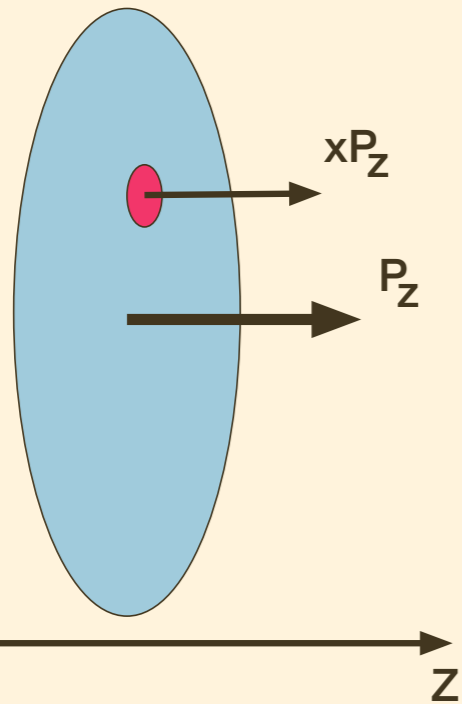


Поперечная поляризация (h_1)

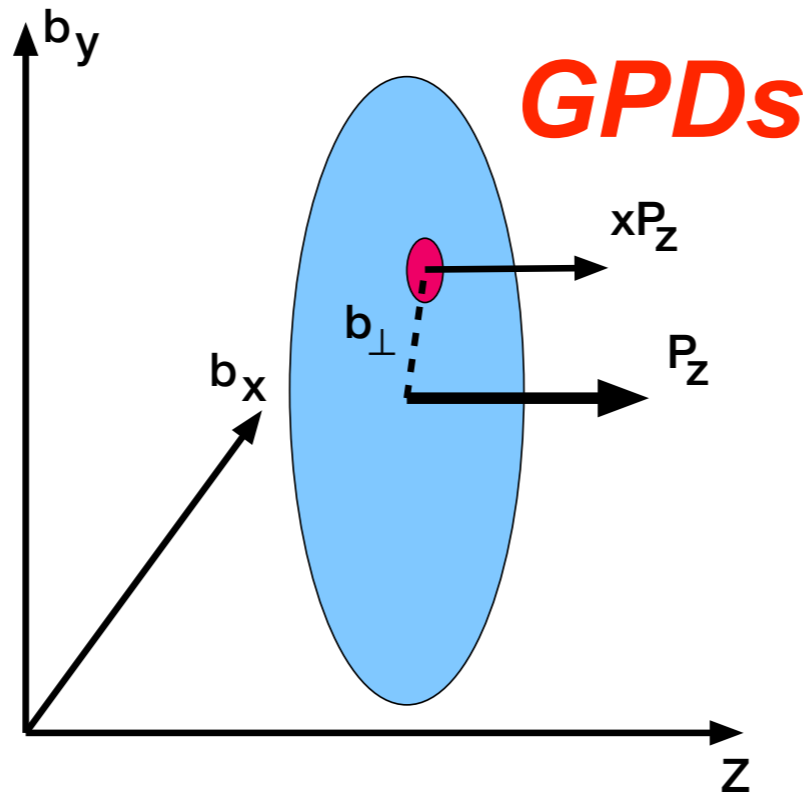
- ***u* и *d* кварки поляризованы в противоположные стороны**

- **слишком большая неопределённость**

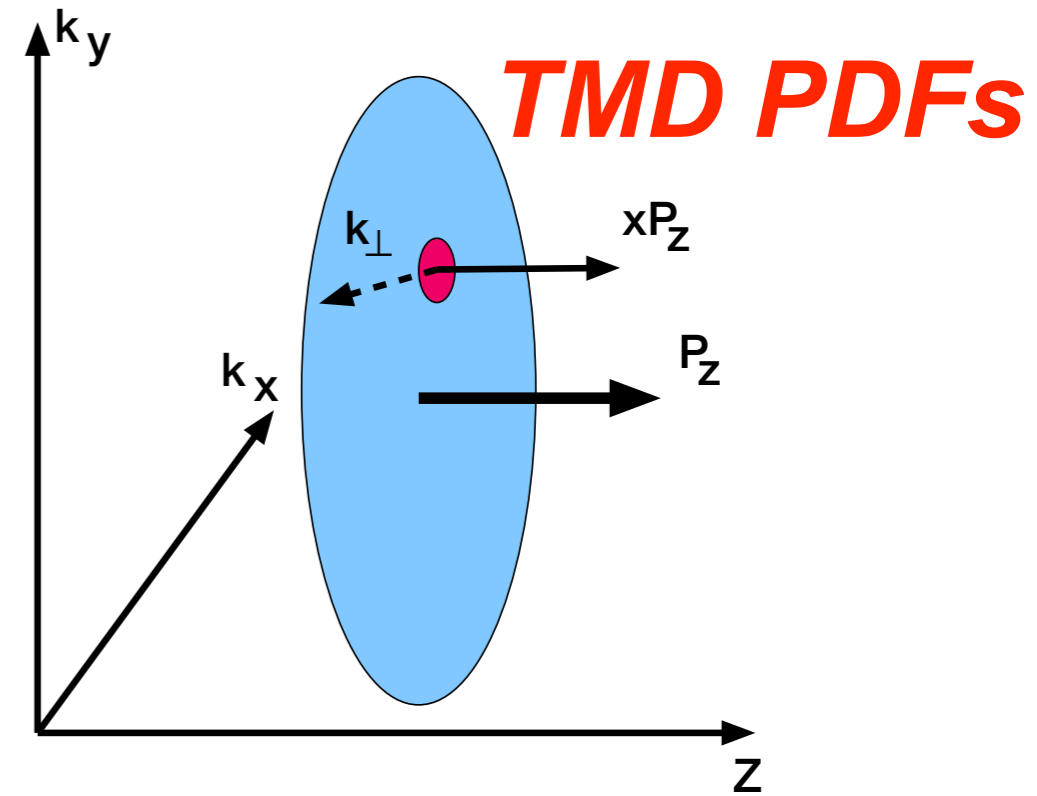
Протон в 3D



Коллинеарное приближение
(обычные PDF)

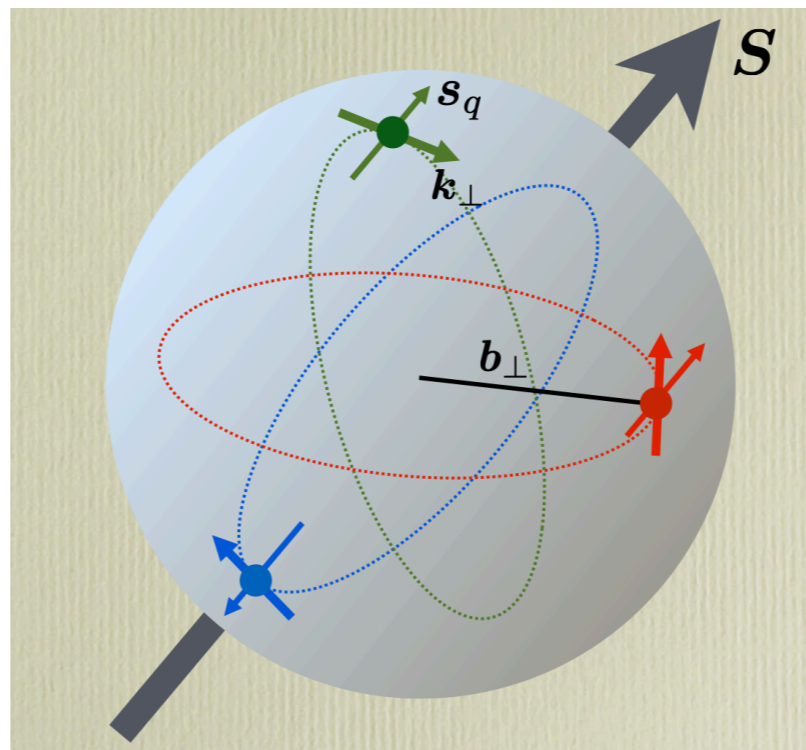


Generalized Parton Distributions



Transverse Momentum Dependent PDFs

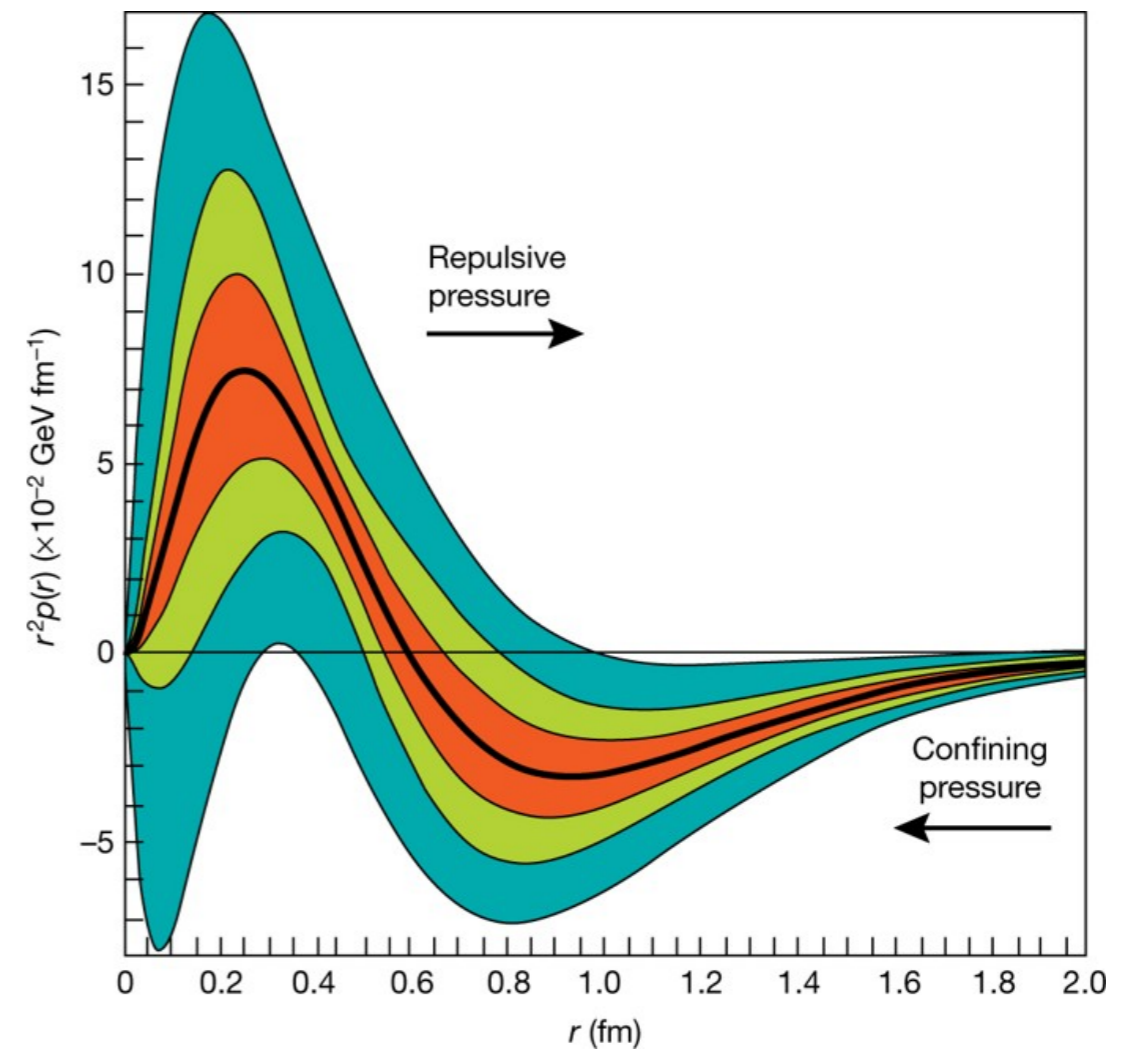
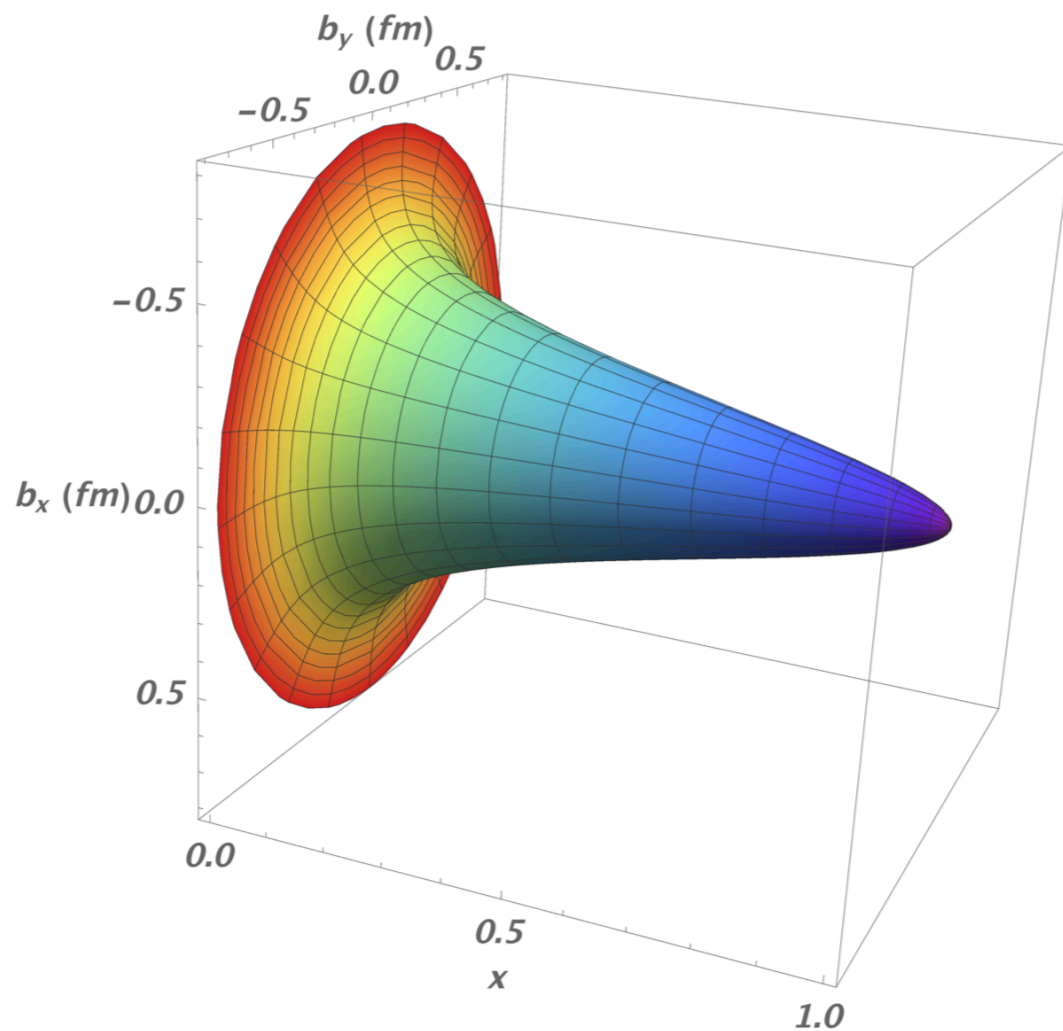
**“Трёхмерная”
структура
нуклона**



**Связь с
орбитальным
моментом**

Протон в 3D & GPD

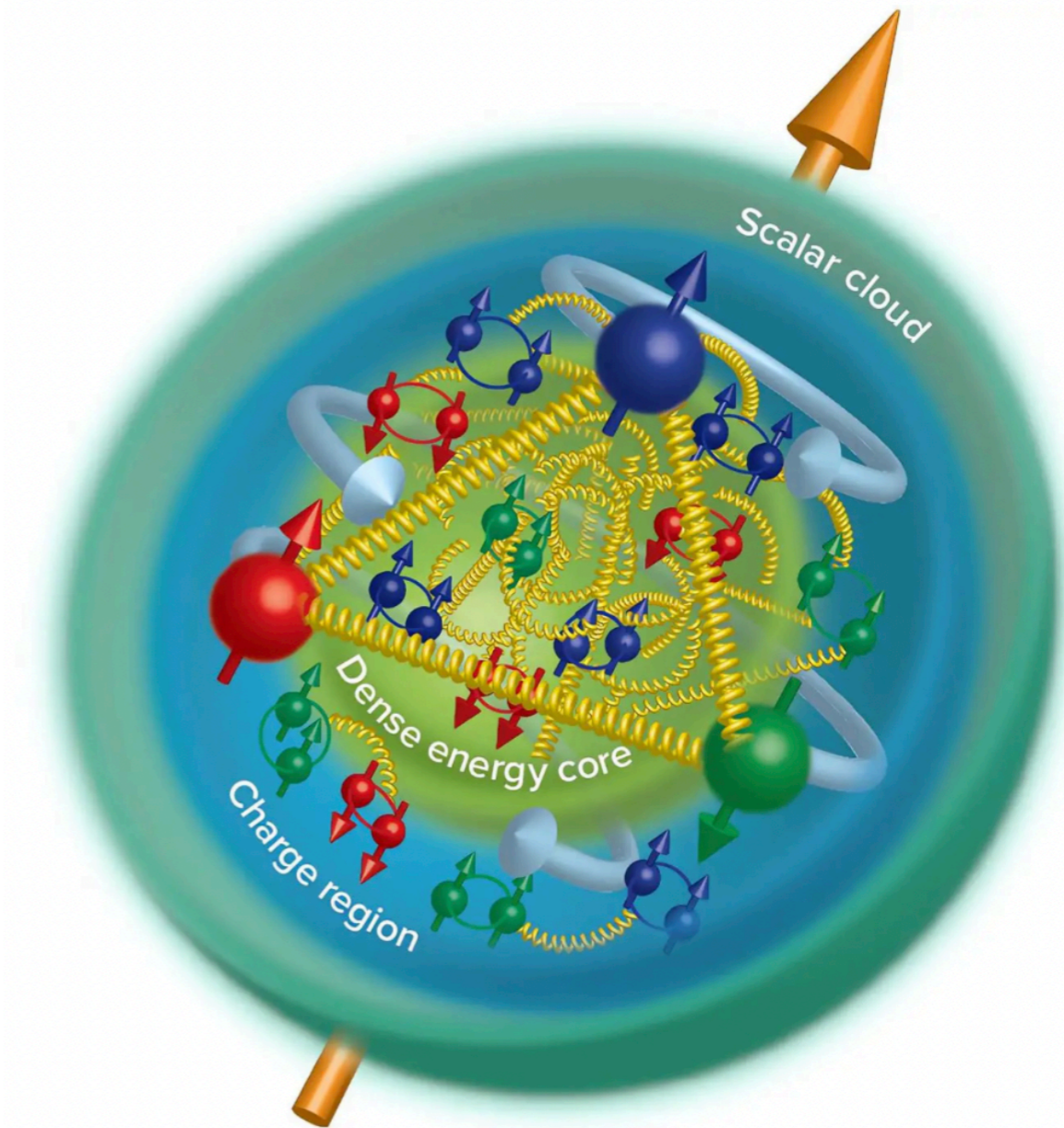
Размер протона зависит от того, на каком масштабе x мы его щупаем.



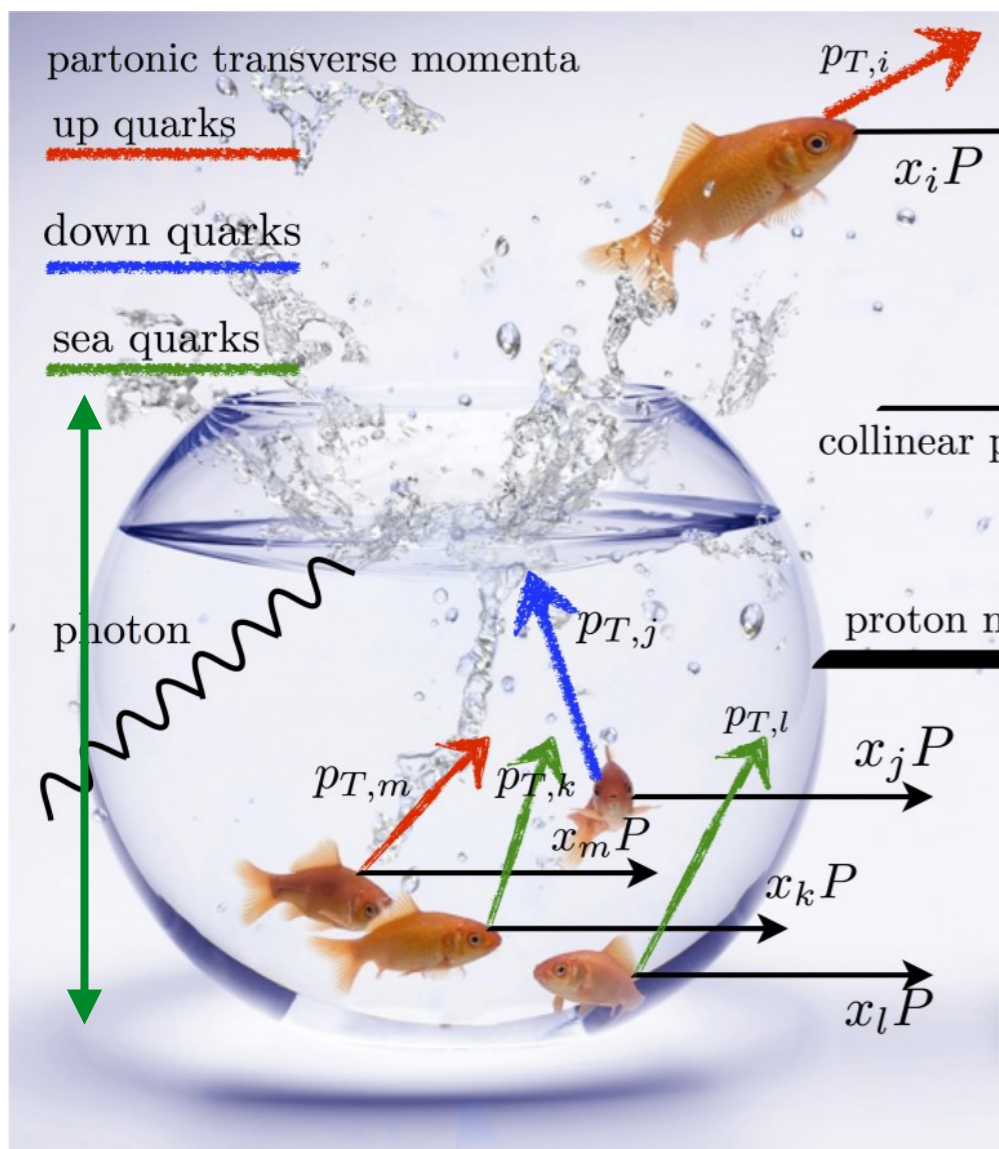
Давление в протоне достигает 10^{34} Па!

Три радиуса протона

	Распределе ние	R, фм
Зарядовый	Электрический заряд	0.84
Массовый	Масса (глюоны)	0.5 - 0.75
Слабый	Слабый заряд	1.55



А откуда поперечный импульс?



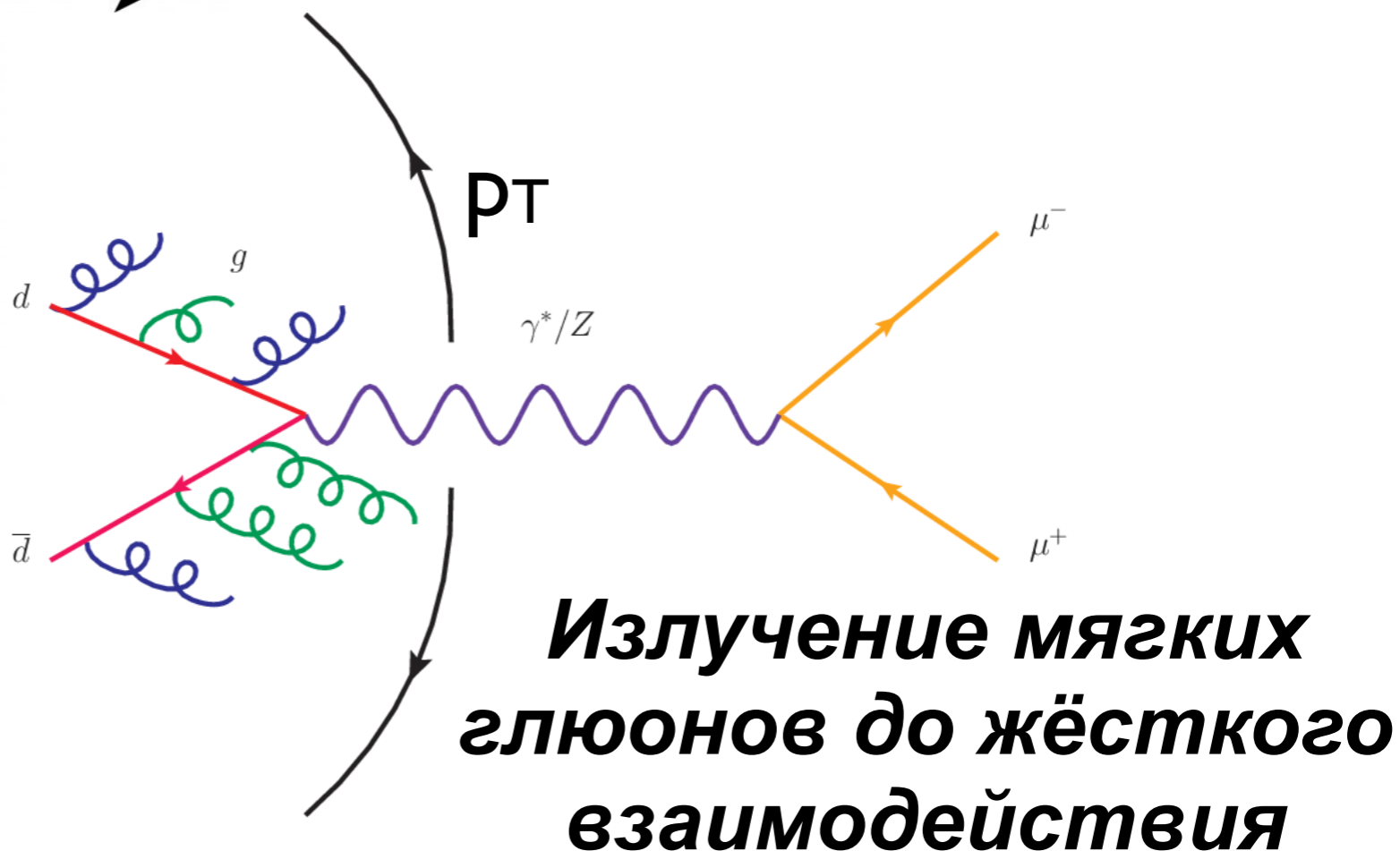
$\langle r_p \rangle = 0.88 \text{ фм}$

Соотношение неопределённостей:

$$\Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2\pi}$$

$$\Delta y \sim \langle r_p \rangle$$

$$p_T \sim \Delta p_y \geq 0.2 \text{ ГэВ/с}$$


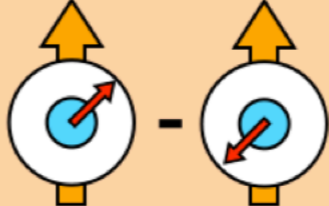
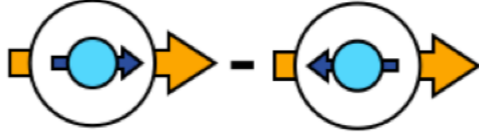
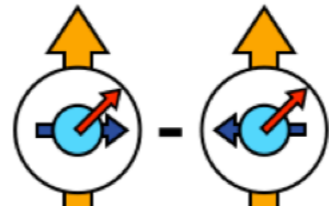

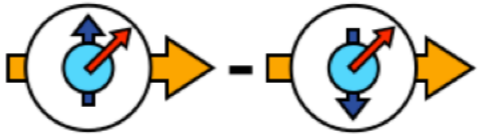
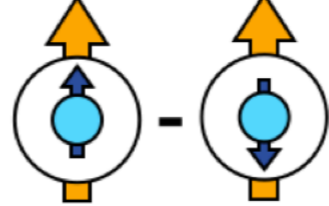
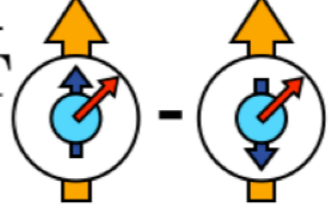


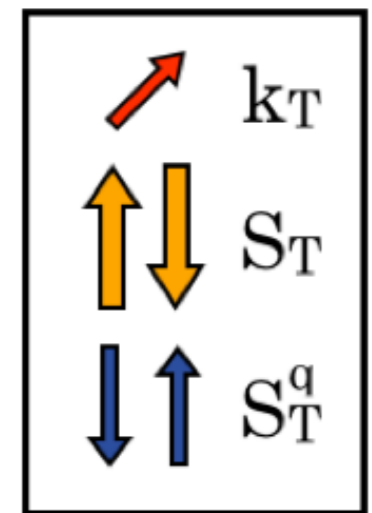
Излучение мягких глюонов до жёсткого взаимодействия

TMD PDF

Nucleon Spin Polarization

Quark Spin Polarization

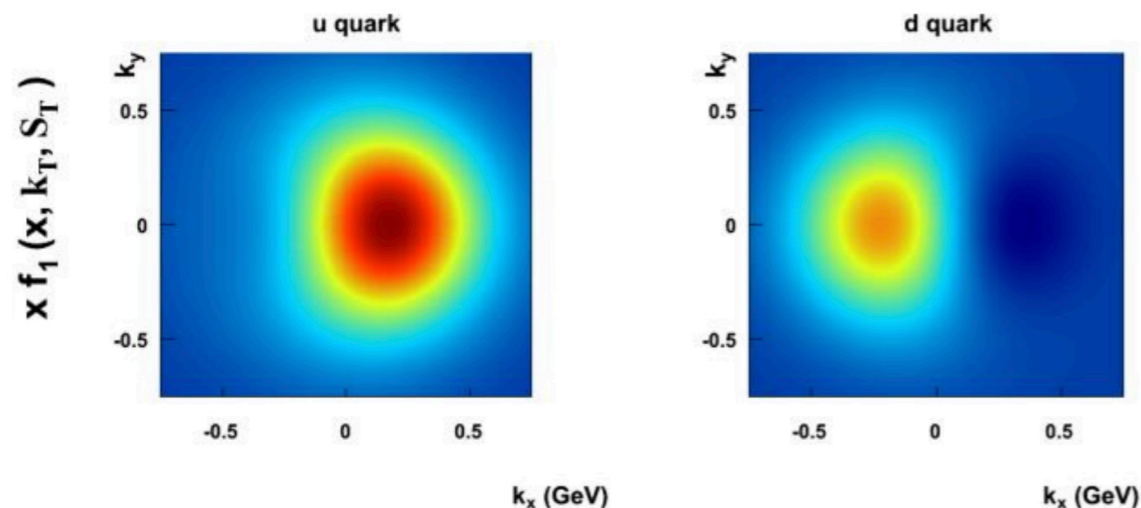
	U	L	T
U	f_1  Number Density		$f_{1T}^{q\perp}$  Sivers
L		g_{1L}^q  Helicity	g_{1T}^q  Worm-Gear T
T	$h_1^{q\perp}$  Boer-Mulders	$h_L^{q\perp}$  Worm-Gear L	h_1^q  Transversity $h_{1T}^{q\perp}$  Pretzelosity



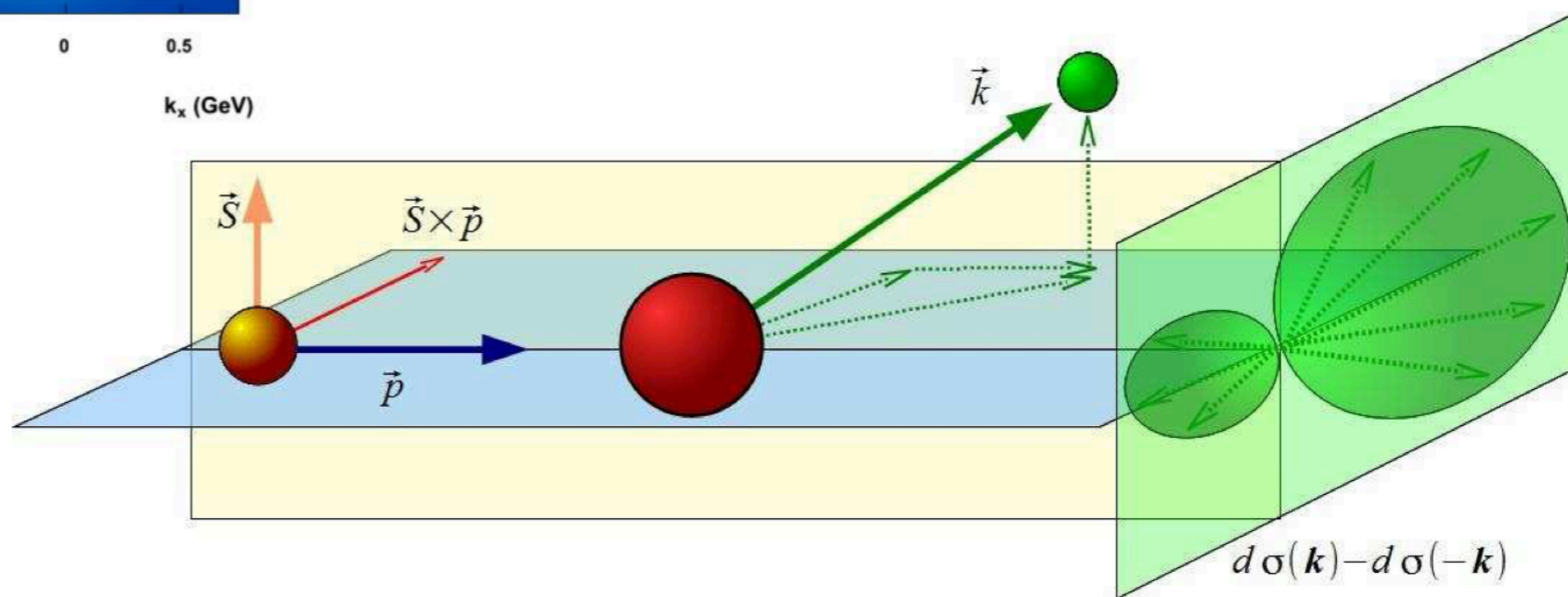
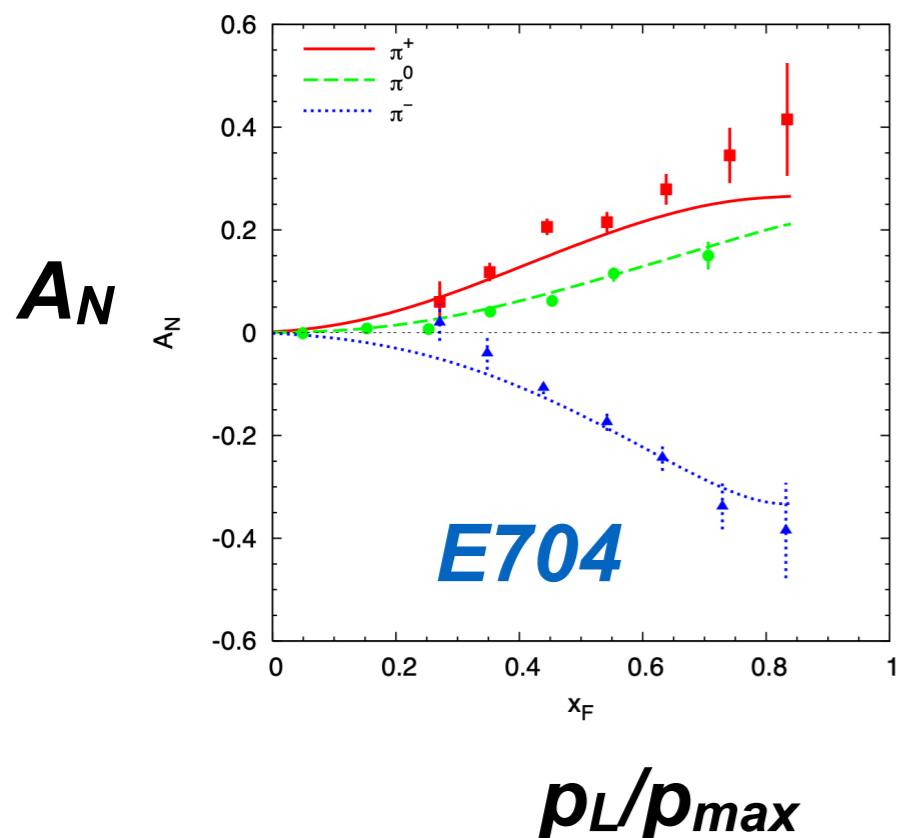
5 новых (TMD) функций, описывающих корреляцию между спином нуклона, спином партона и поперечным импульсом партона.

Эффект Сиверса

Вероятности в поперечно поляризованном протоне встретить партон, летящий **влево** и **вправо** относительно плоскости (\vec{S}, \vec{p}) разные!

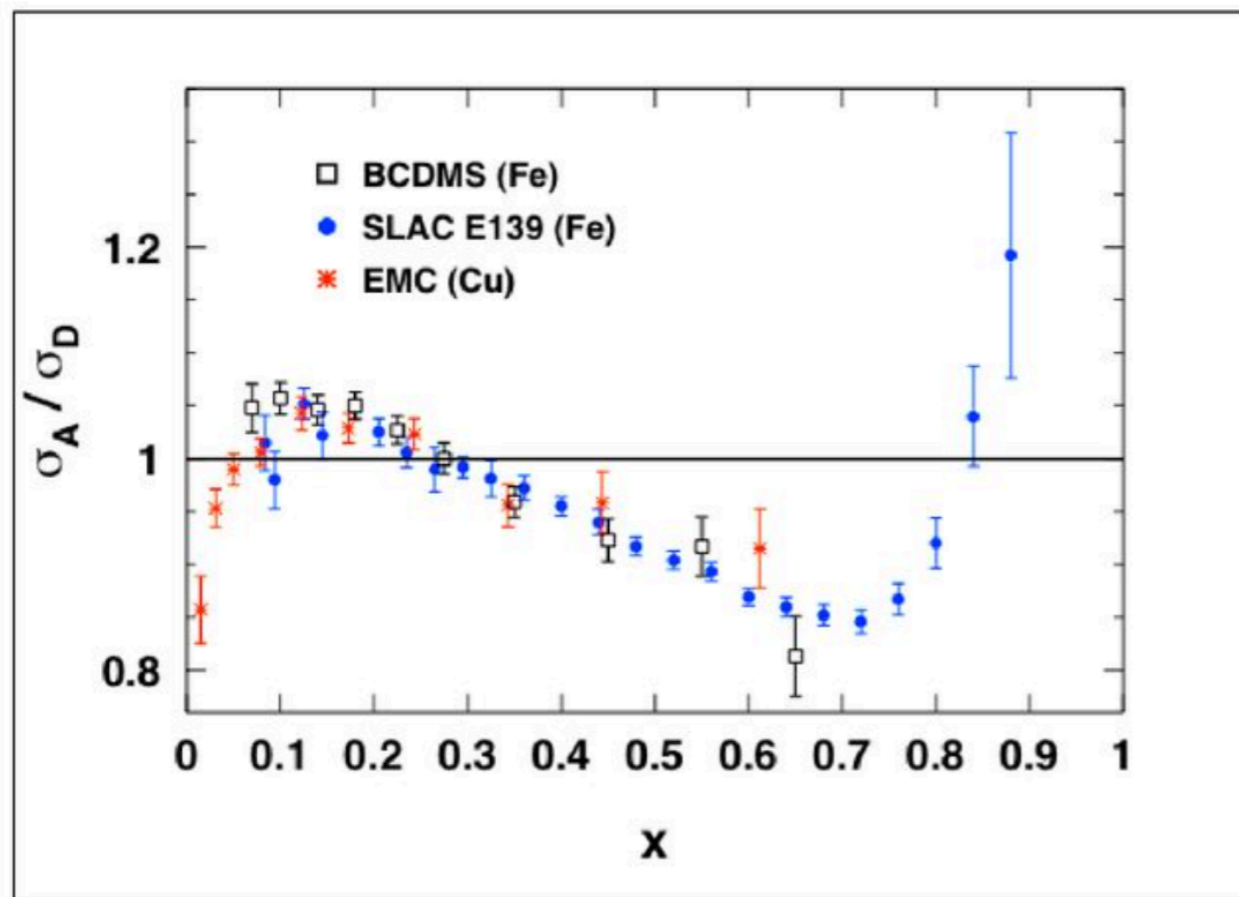


$$A_N = \frac{\sigma^\uparrow - \sigma^\downarrow}{\sigma^\uparrow + \sigma^\downarrow} \sim f_{Sivers}$$



Обычно наблюдается совместно с **эффектом Коллинза** - асимметрией, возникающей при фрагментации конечного состояния.

EMC-эффект



**Впервые наблюдался
коллаборацией EMC в
1982 году**

**Нуклон “знает” в
каком ядре он
находится!**

Обмен парой “кварк-антикварк”

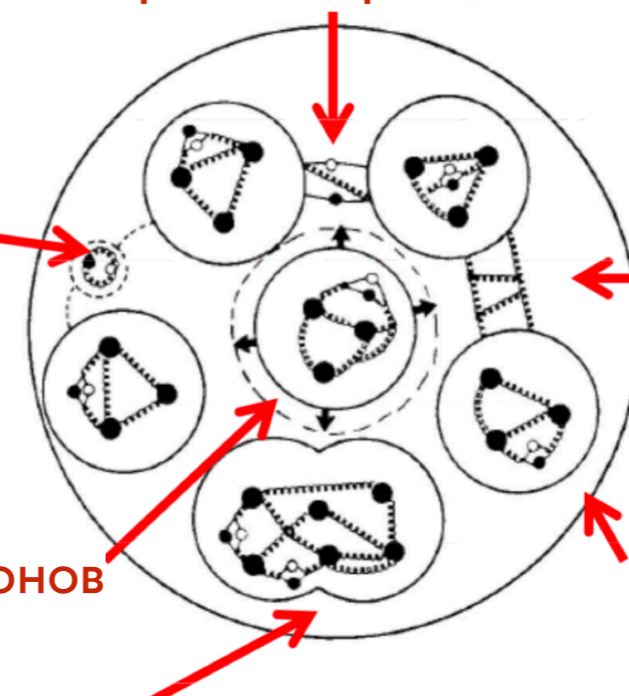
Пионный обмен

Глюонный обмен

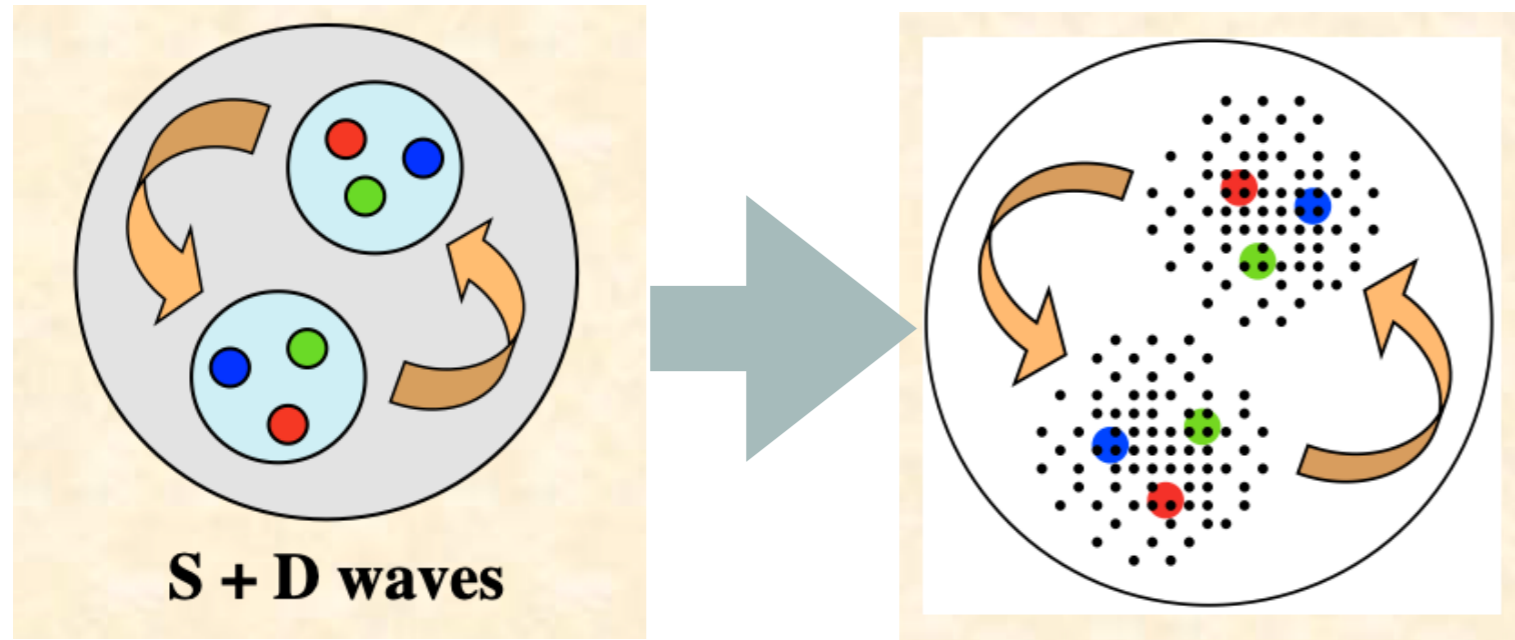
Раздувание нуклонов

Уменьшение массы
нуклона

Мультикварковые
мешки



Дейтрон



Дейтрон всегда служил референсом для изучения EMC-эффекта. Но и в нём самом ядерные эффекты присутствуют!

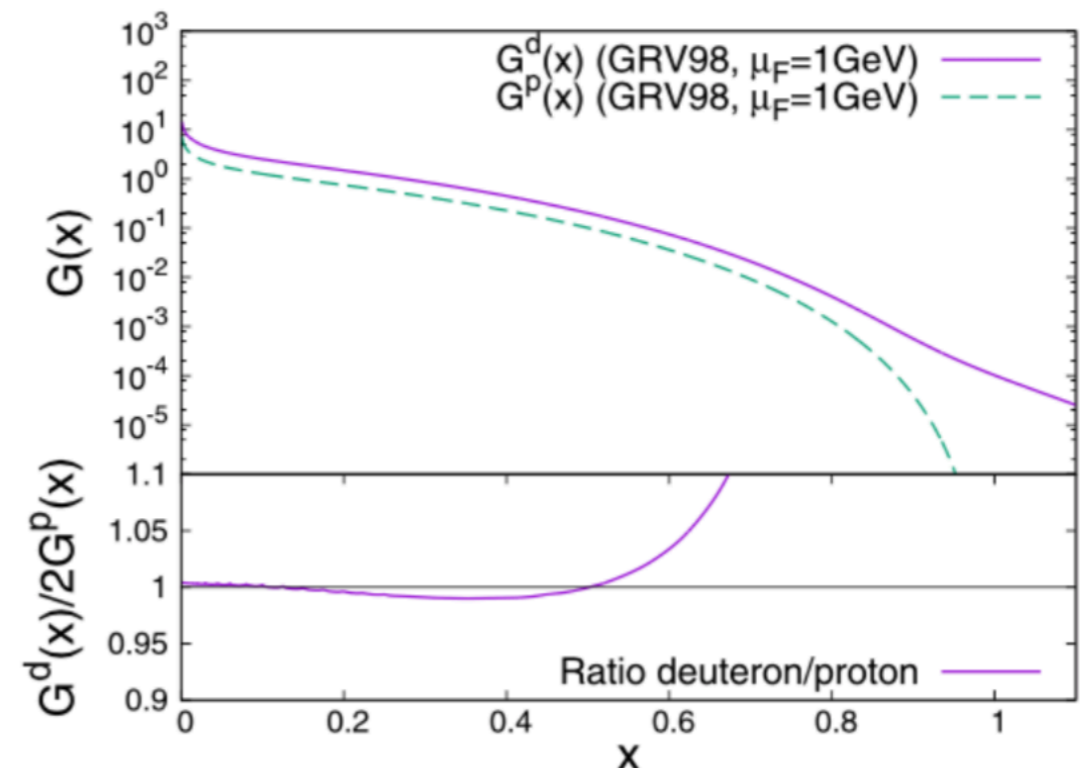
Дейтрон - это не есть просто связанное состояние протона и нейтрона!

$$|6q\rangle = c_1 |NN\rangle + c_2 |\Delta\Delta\rangle + \boxed{c_3 |CC\rangle}$$

скрытый цвет

- небарионная компонента, доля некоторой в некоторых моделях достигает 90%

Больше глюонов с большим значением x



SPD на NICA

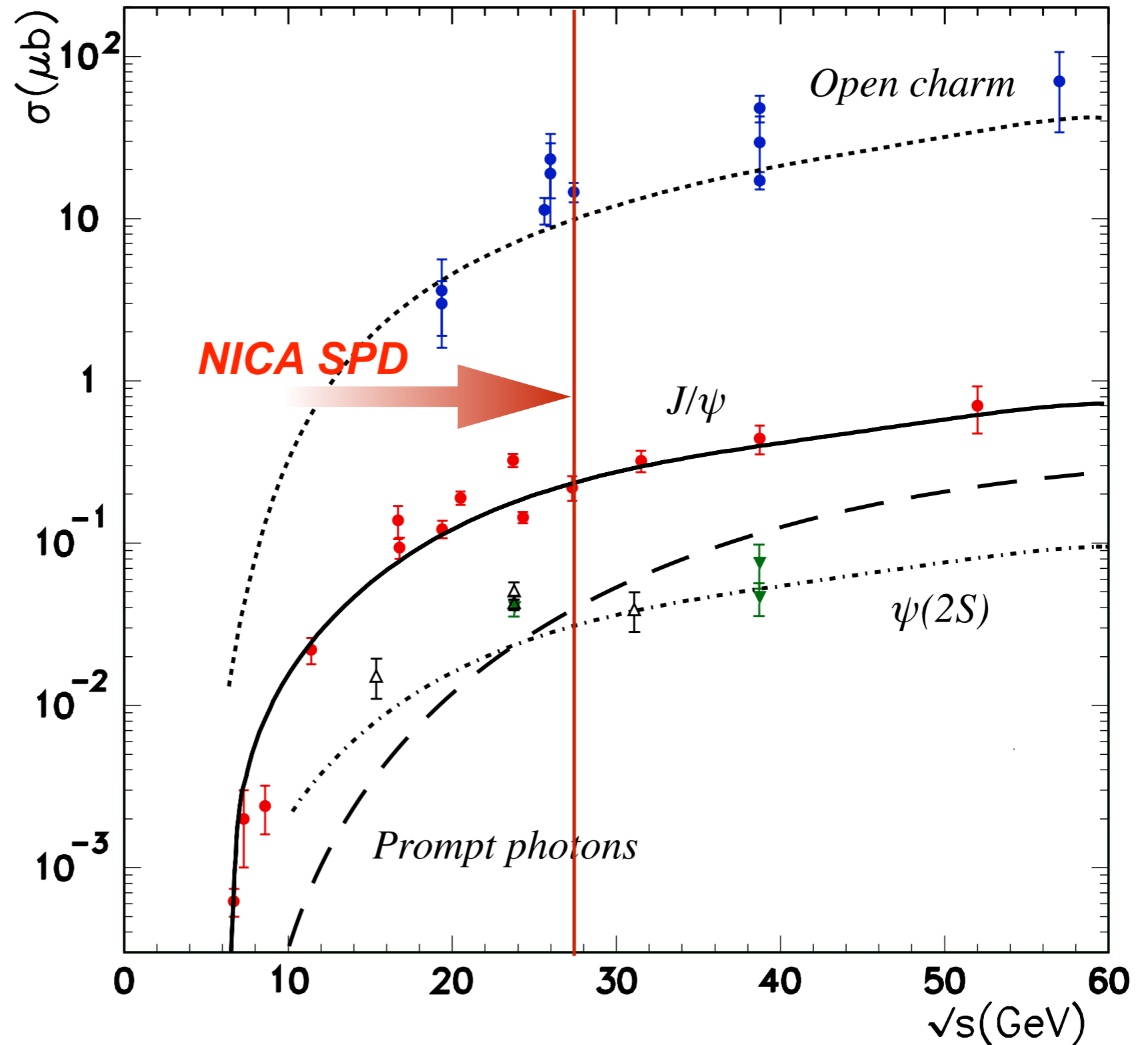
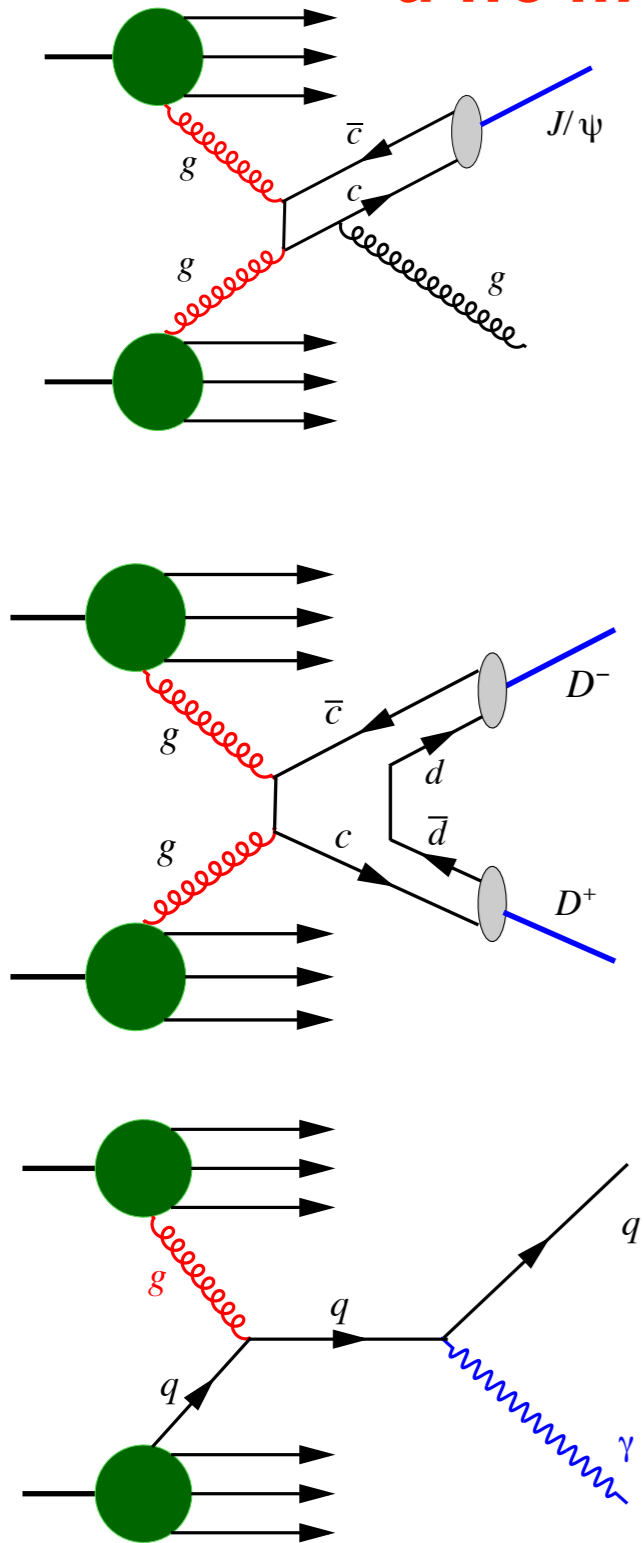


SPD at NICA



SPD - установка для комплексного изучения глюонной структуры нуклона

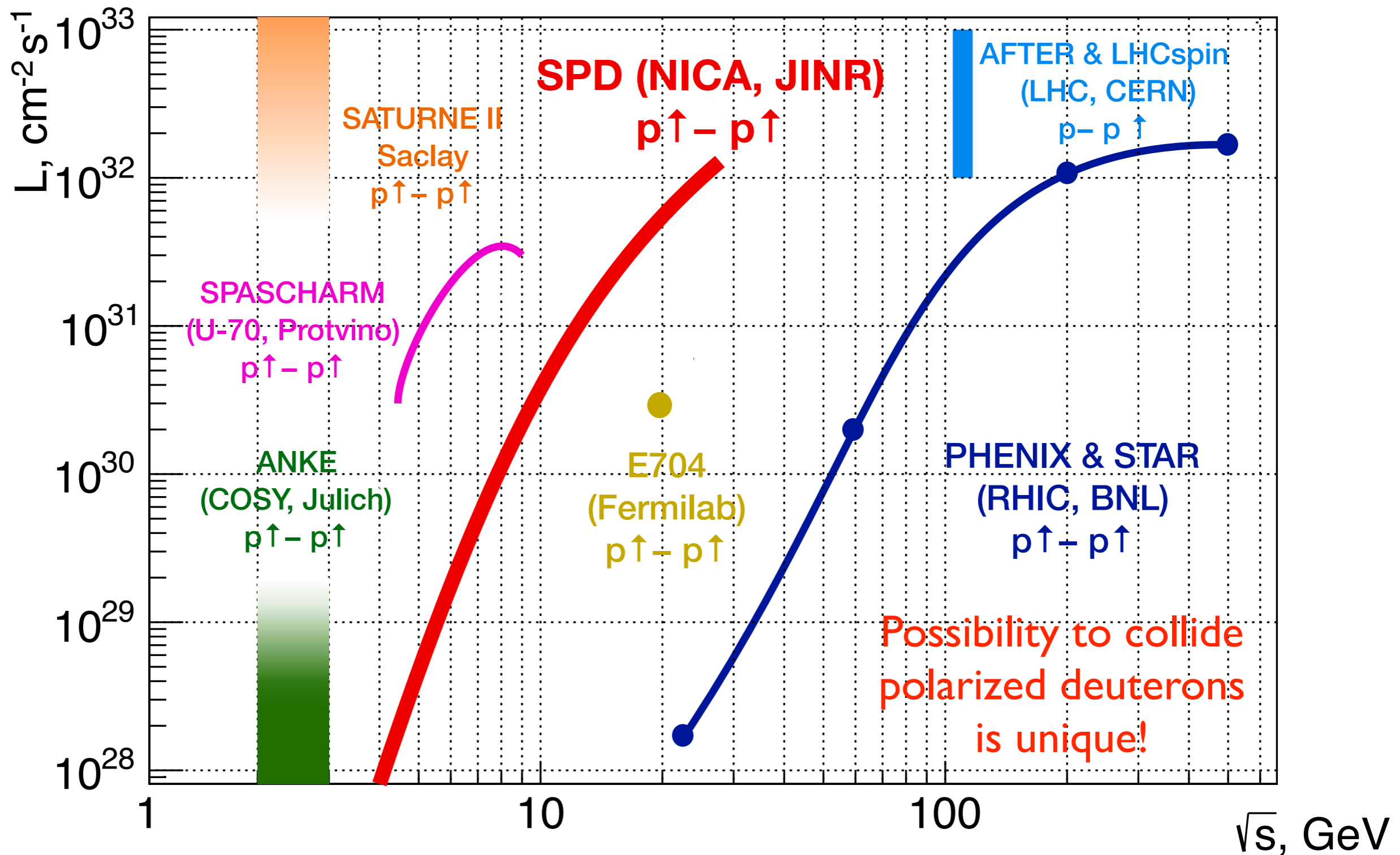
и не только J/ψ !



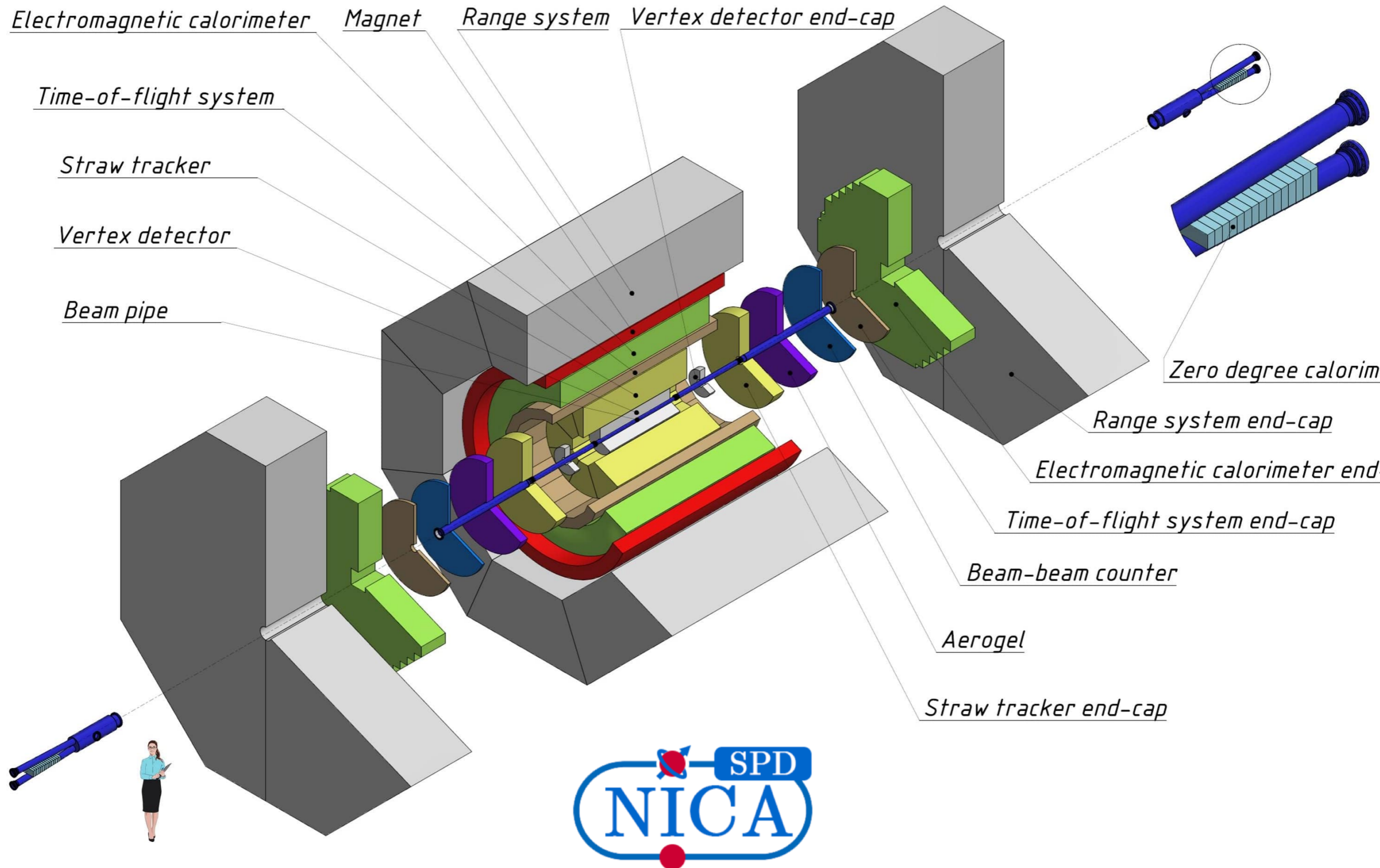
А что в мире?

Непертурбативная КХД

Пертурбативная КХД



Концепция детектора SPD



Status of the SPD project

SPD **Conceptual Design Report** was presented firstly in Jan 2021 and approved by the JINR PAC for Particle physics after an international expertise in Jan 2022

<https://arxiv.org/abs/2102.00442>

SPD **Technical Design Report** was presented firstly in Jan 2023, then was updated in 2024 and passed international expertise this year.

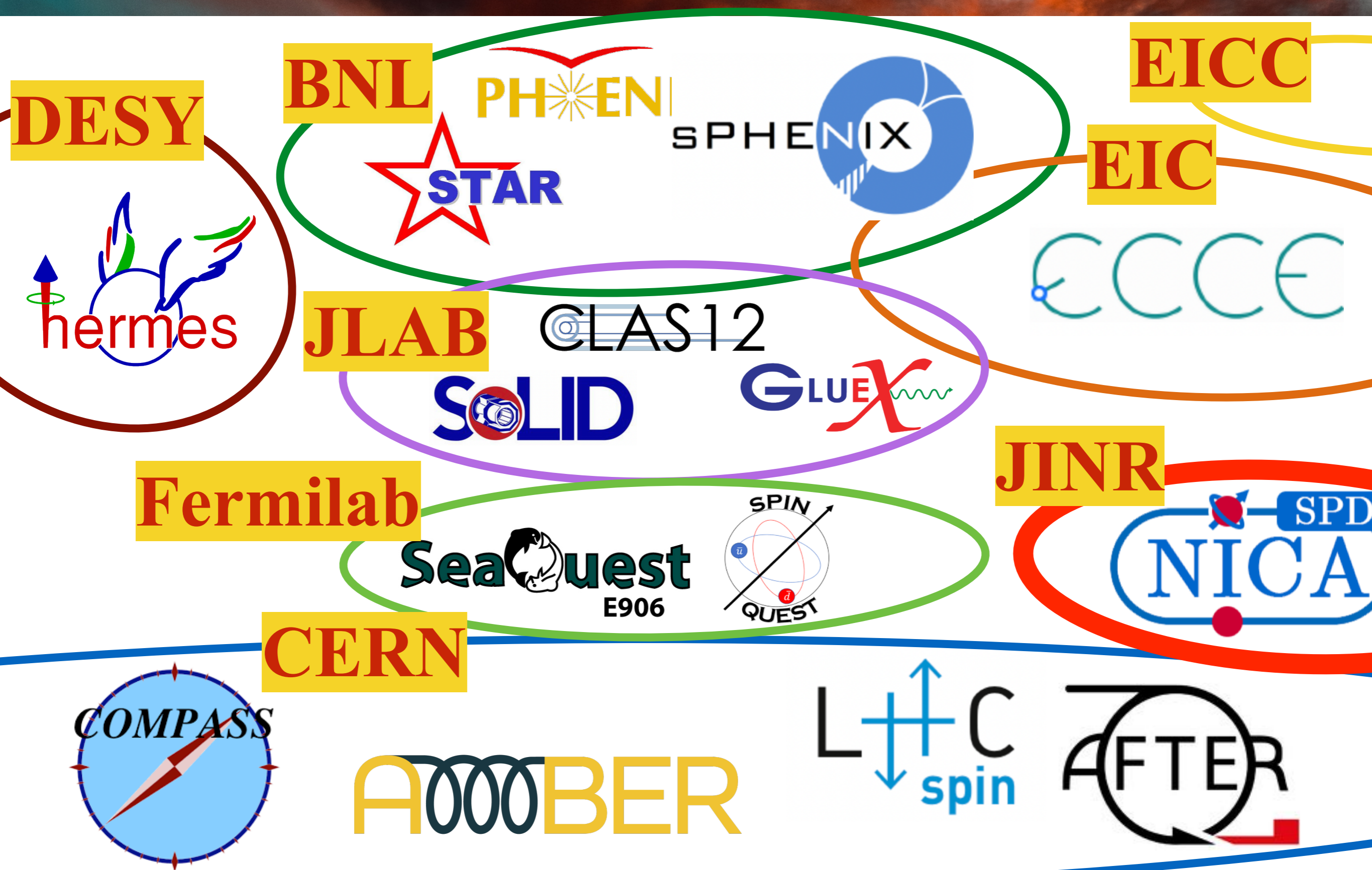
<https://arxiv.org/abs/2404.08317>

The **first phase** of the SPD project is included into the JINR's 7-year plan (2024-2030)

The **SPD international collaboration** established in 2021. Currently it consists of 35 institutes from 15 countries and more than 400 participants



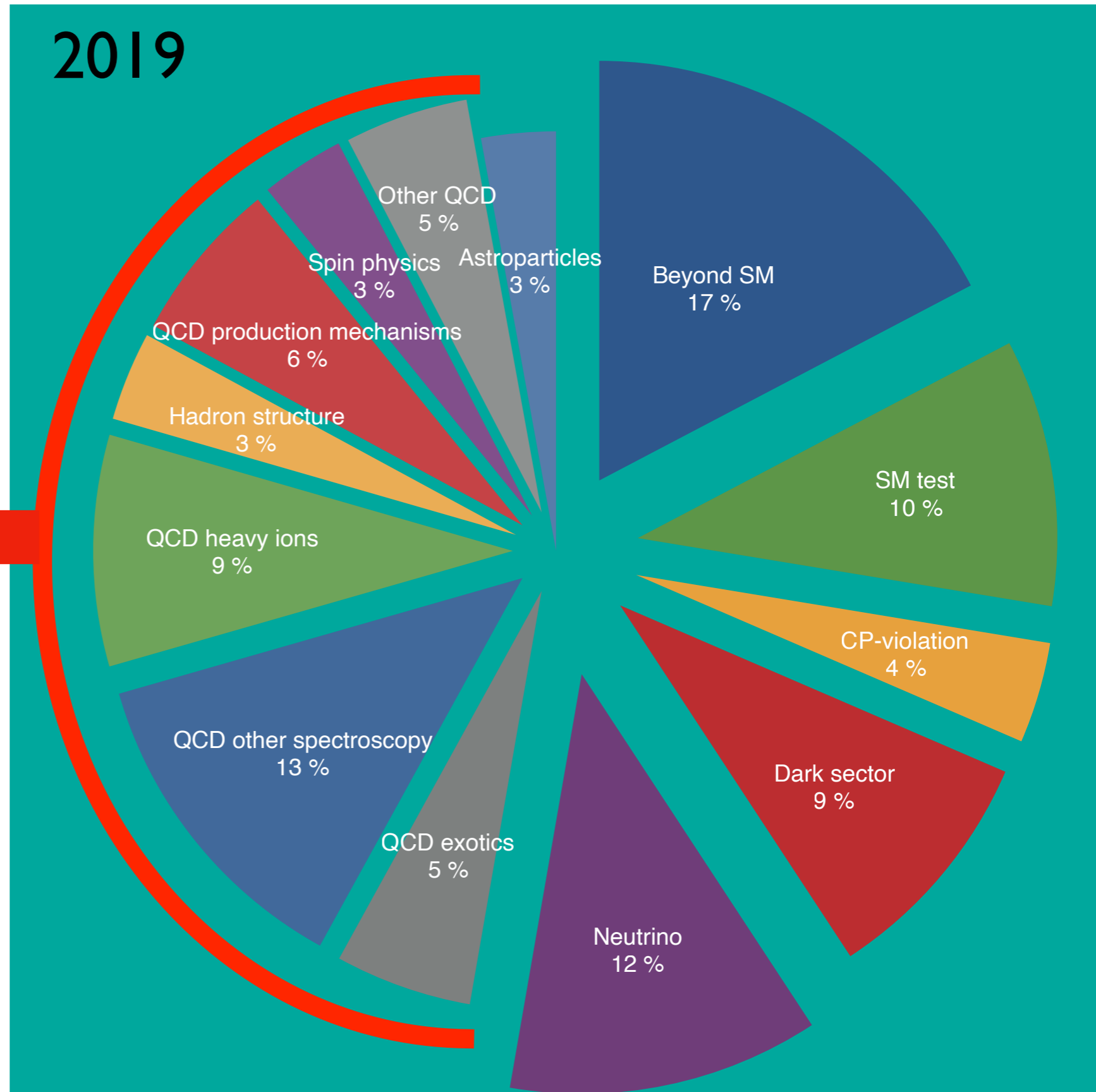
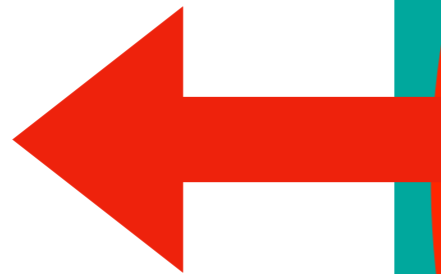
Структура адронов: XXI век



Физика частиц по разделам

2019

QCD
44%



На основе
публикаций в [arXive](#)

Эволюция знаний

Наивные представления



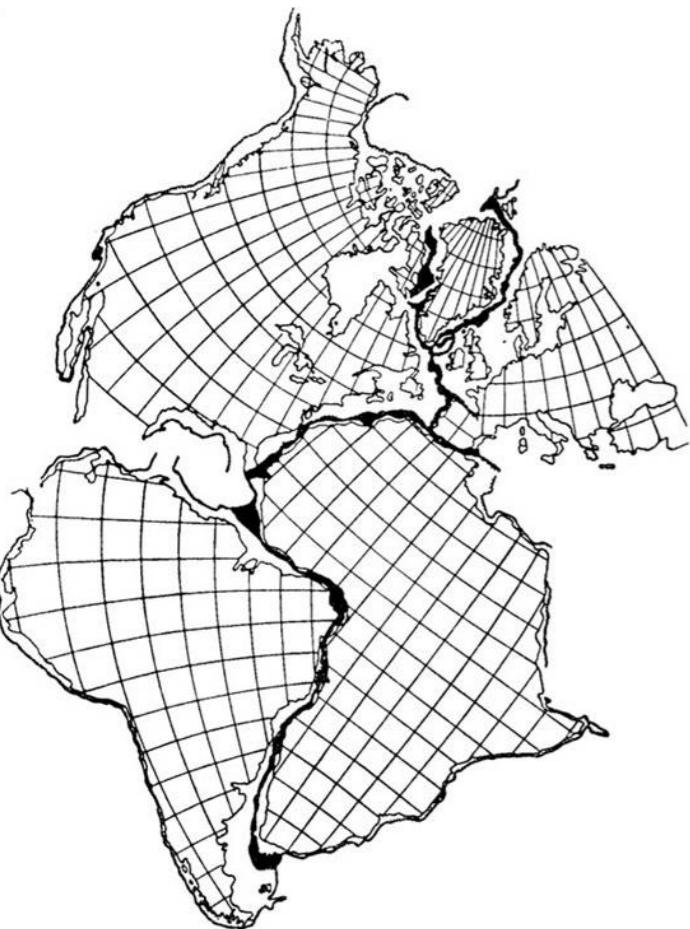
Эратосфен Киренский
276 год до н. э. - 194 год до н. э.



Земля - шар!
II век до н. э.



**Великие географические
открытия, XV-XIX век**



Дрейф материков, 1912 г