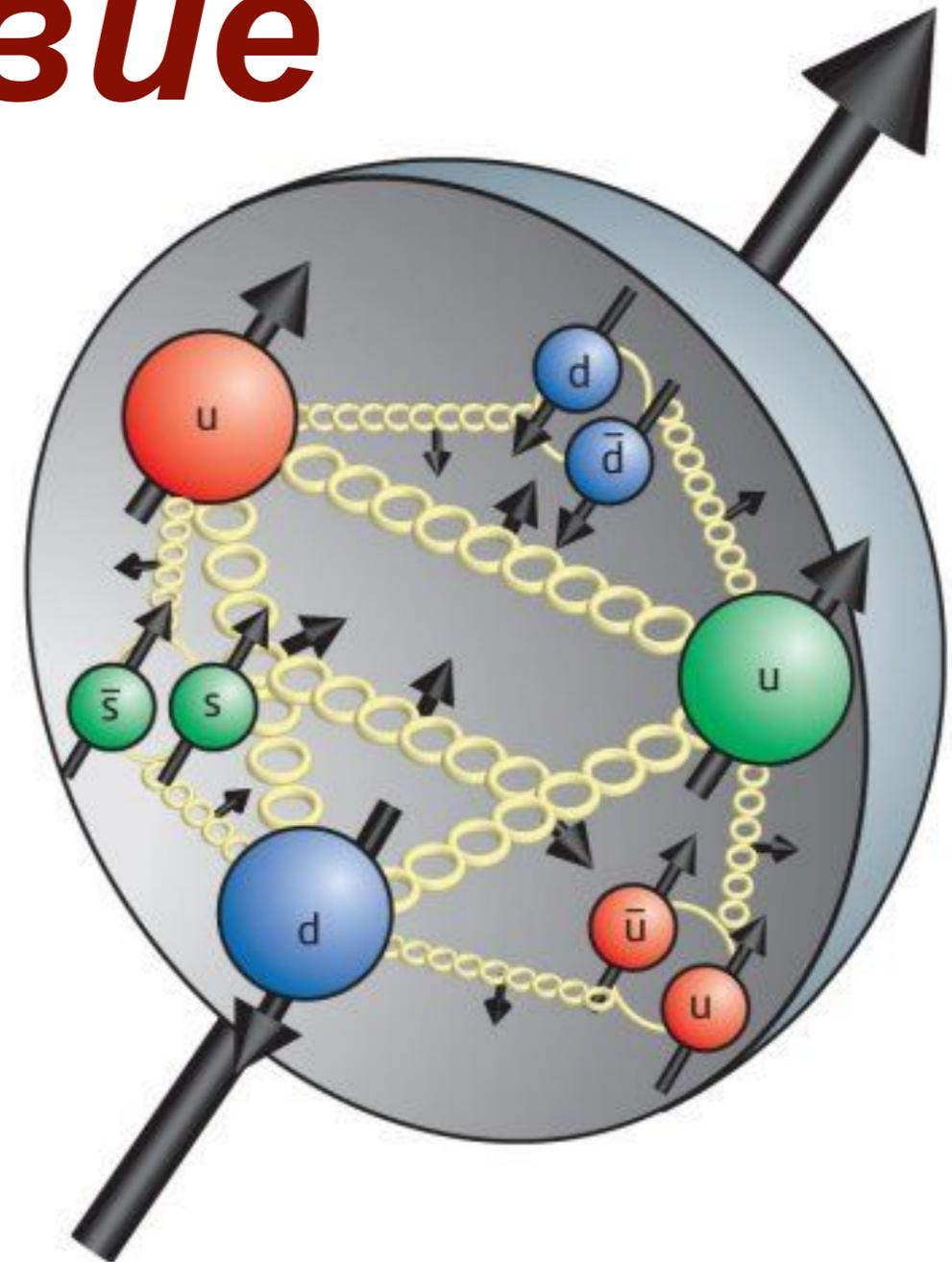
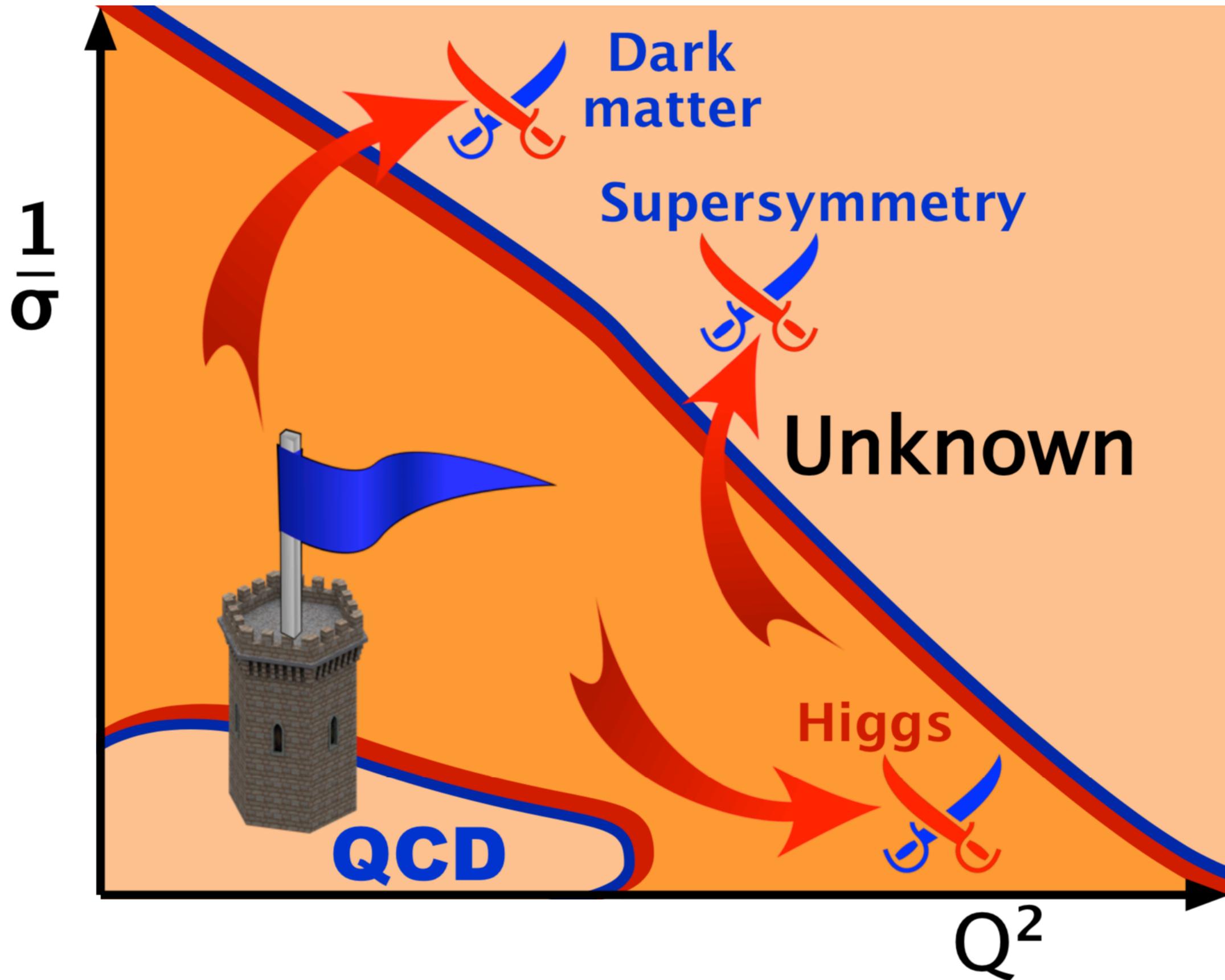


# **Сильное взаимодействие и КХД**

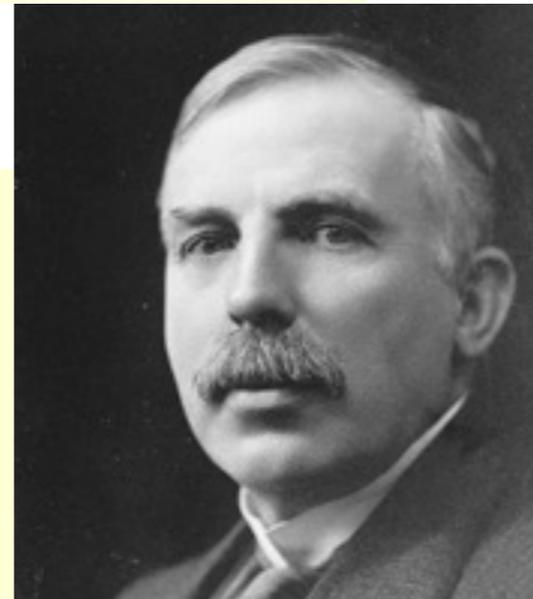
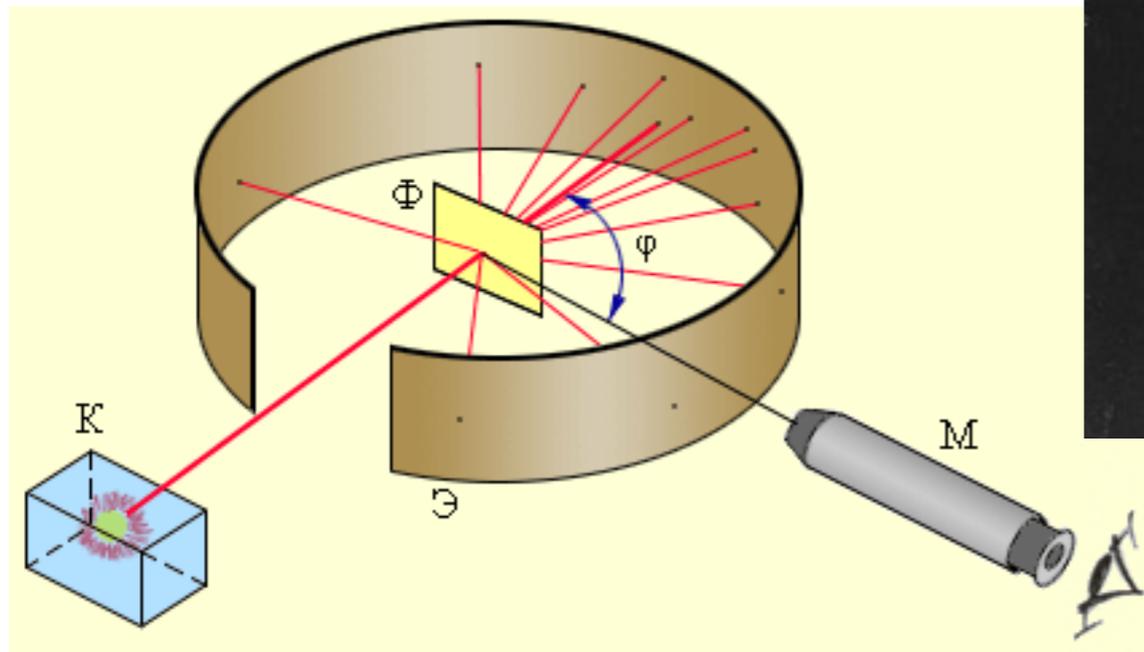
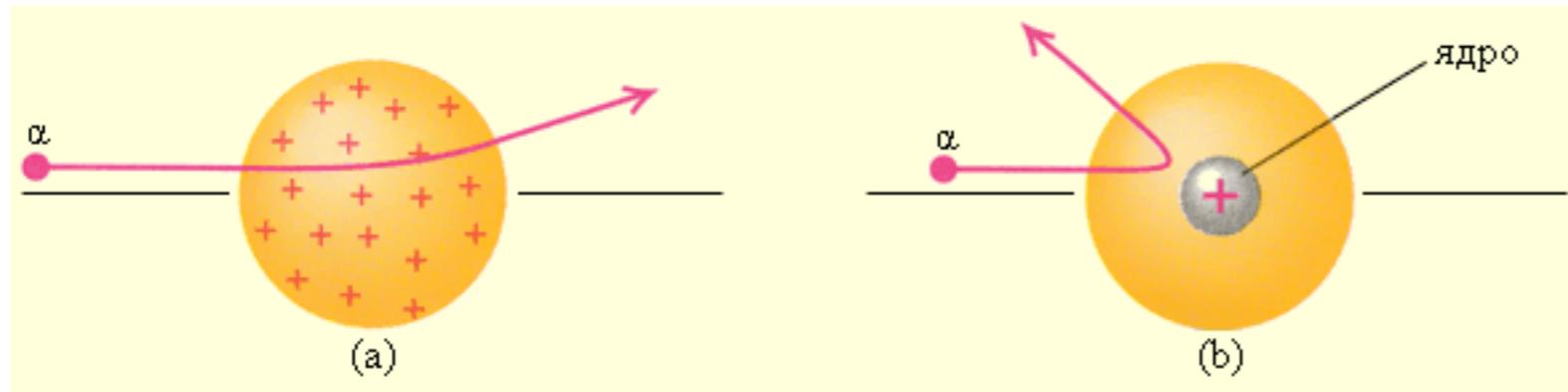
**А. В. Гуськов**  
**[avg@jinr.ru](mailto:avg@jinr.ru)**



# Рубежи современной физики частиц



# 1911: Открытие ядра



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

[ 669 ]

LXXIX. *The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  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  $\alpha$  and  $\beta$  particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the  $\beta$  than for the  $\alpha$  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  $\alpha$  or  $\beta$  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  $\alpha$  rays indicate that some of the  $\alpha$  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  $\alpha$  particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of  $90^\circ$  in passing through a layer of gold-foil about  $\cdot 00004$  cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the  $\alpha$  particle to 1.6 millimetres of air. Geiger ‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of  $\alpha$  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  $\alpha$  particle being deflected through  $90^\circ$  is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution of the  $\alpha$  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.

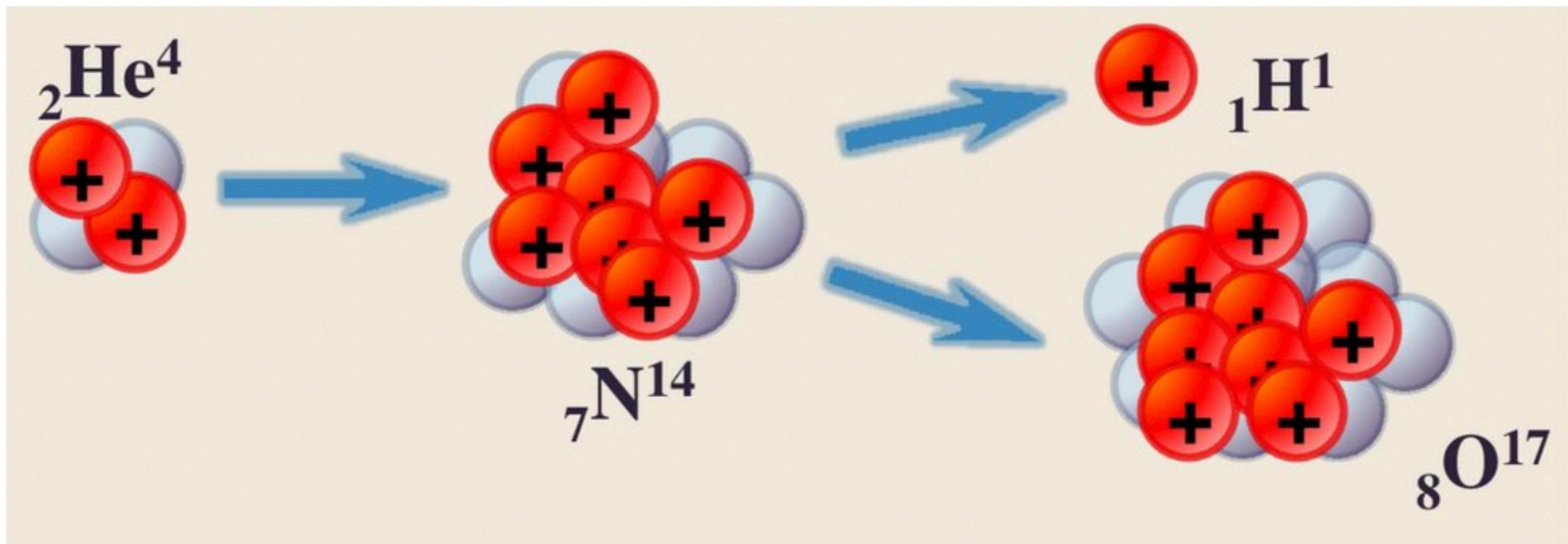
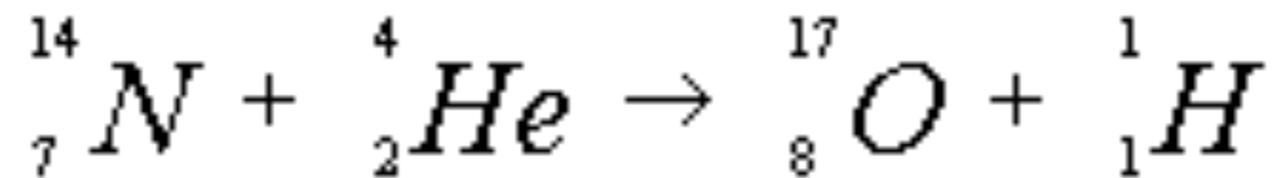
† Proc. Roy. Soc. lxxxii. p. 495 (1909).

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

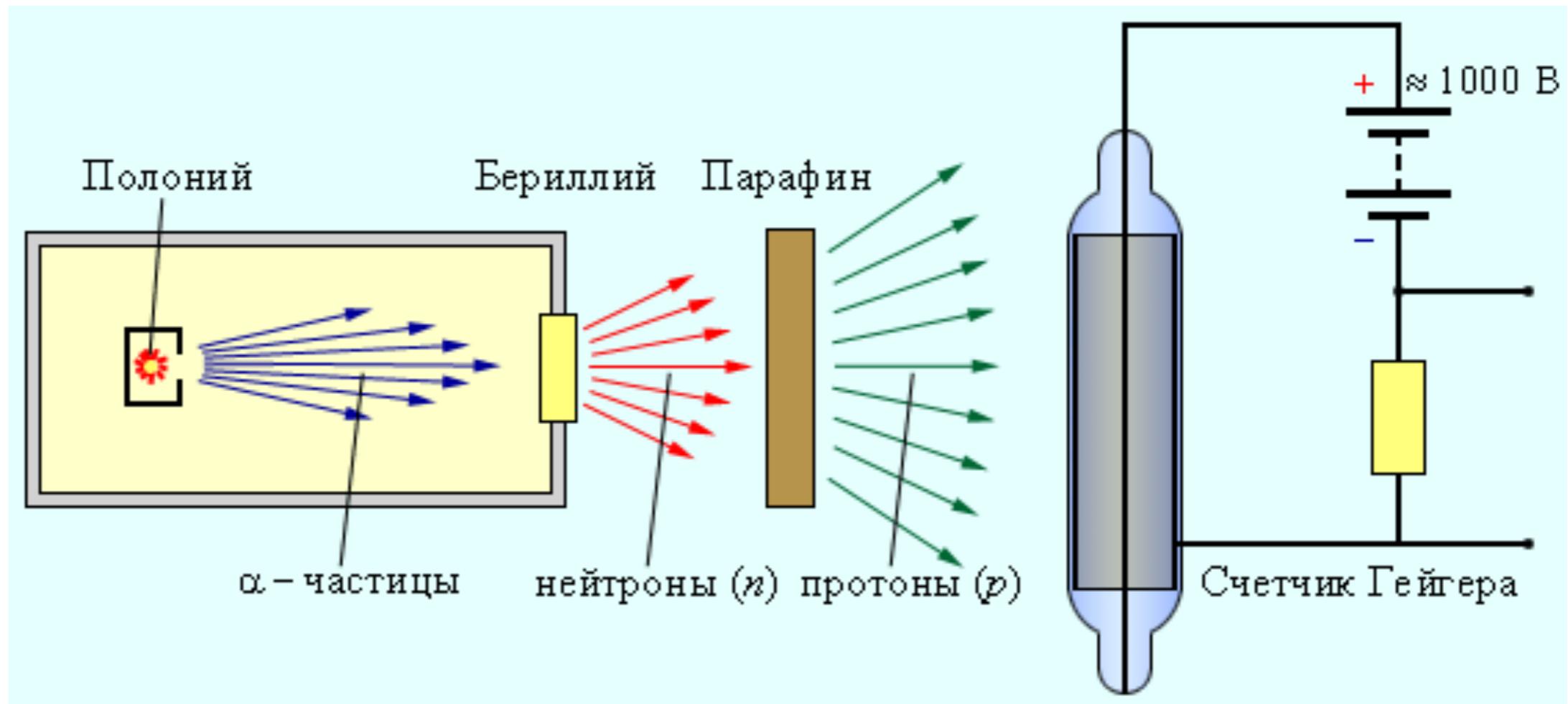
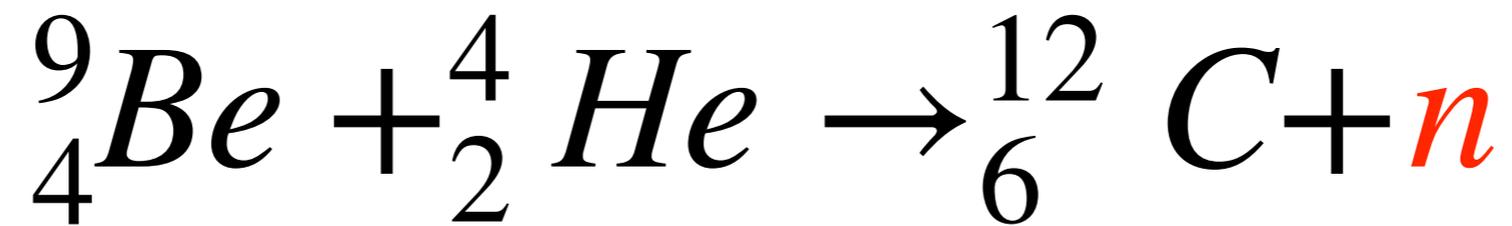
§ Camb. Lit. & Phil. Soc. xv. pt. 5 (1910).

# Открытие протона

Резерфорд, 1919 год



# 1932: Открытие нейтрона

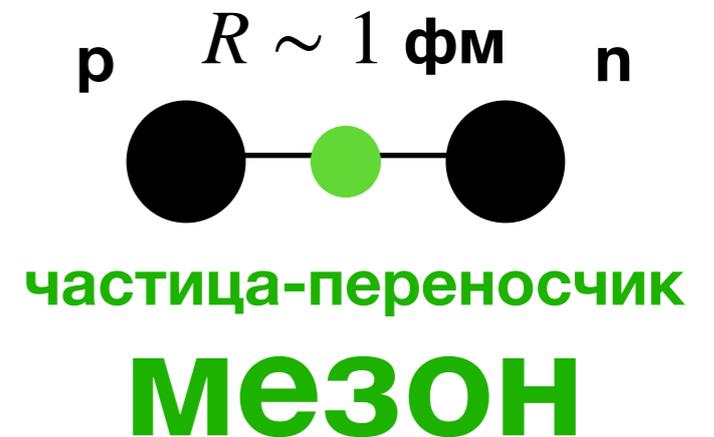


# 1934: Потенциал Юкавы

Обменная природа ядерных сил

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

$$\Delta t = R/c$$

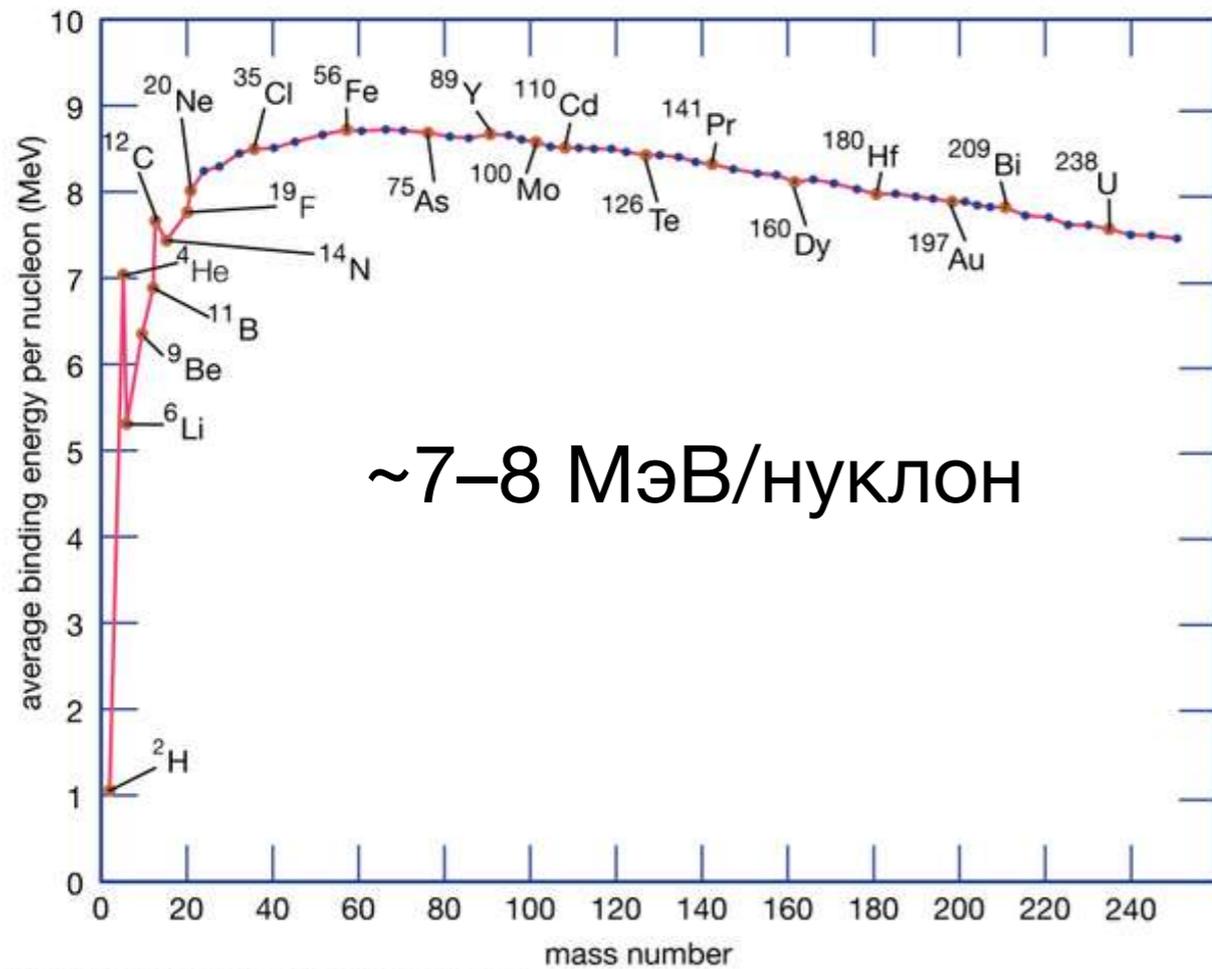


$$m = \frac{\Delta E}{c^2} \sim \frac{\hbar}{Rc} = 200 \text{ МэВ}$$

**Потенциал межнуклонного взаимодействия:**

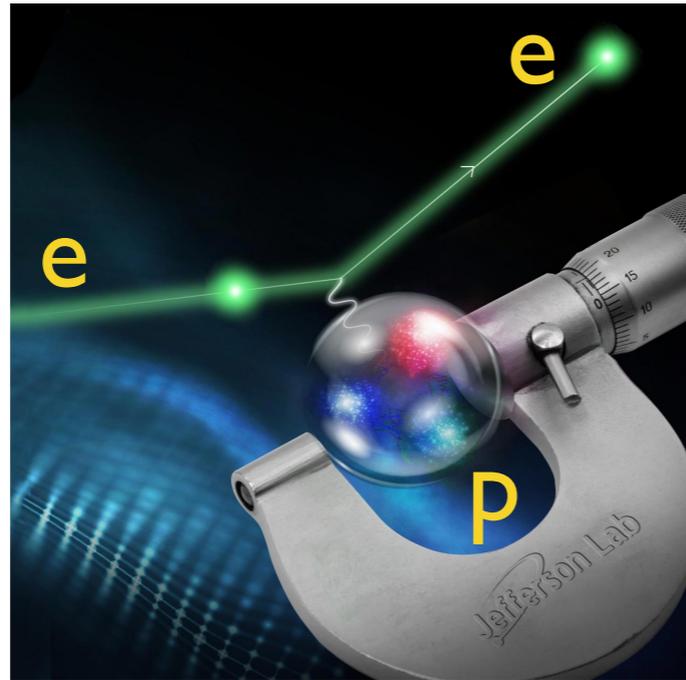
$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mcr/\hbar}}{r}$$

# 1930e: Энергия связи ядра

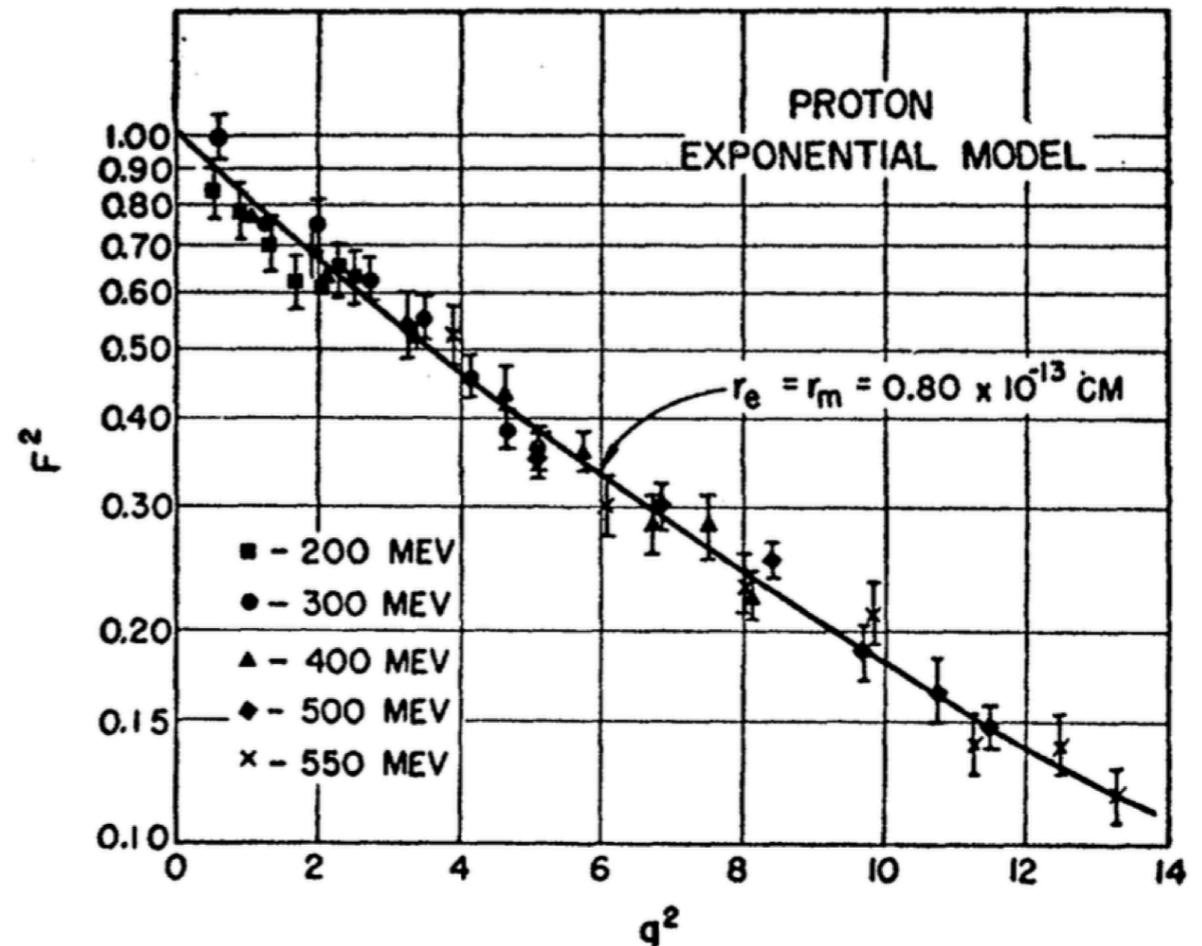




# Размер протона



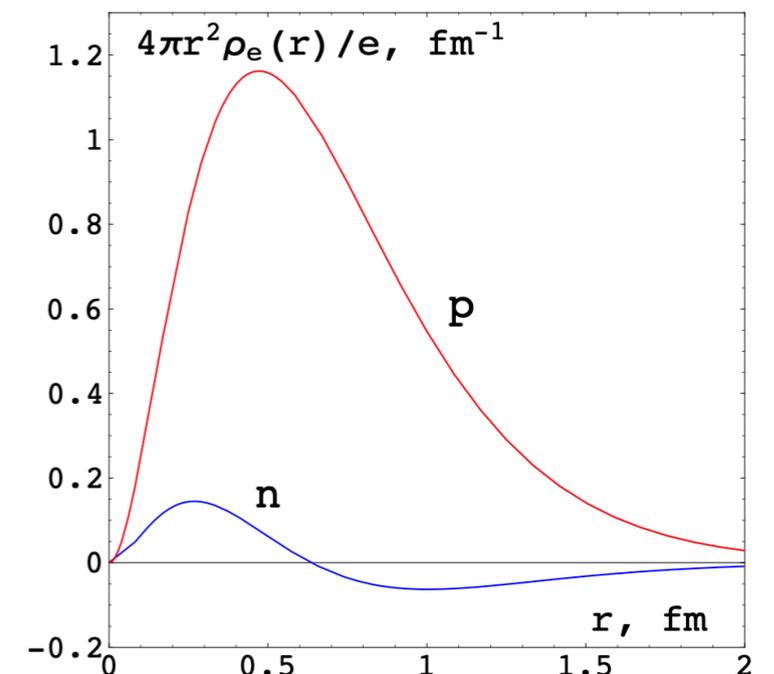
**Р. Хофштадтер -  
нобелевская премия 1961 г.**



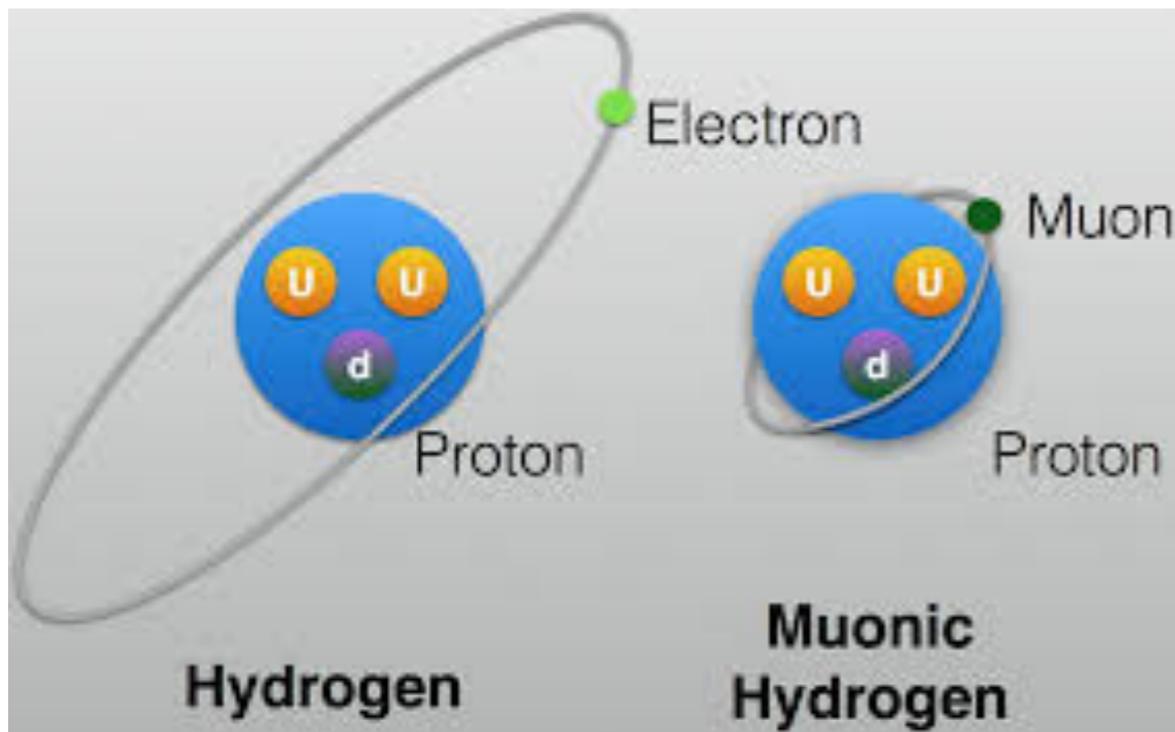
**формфактор**

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

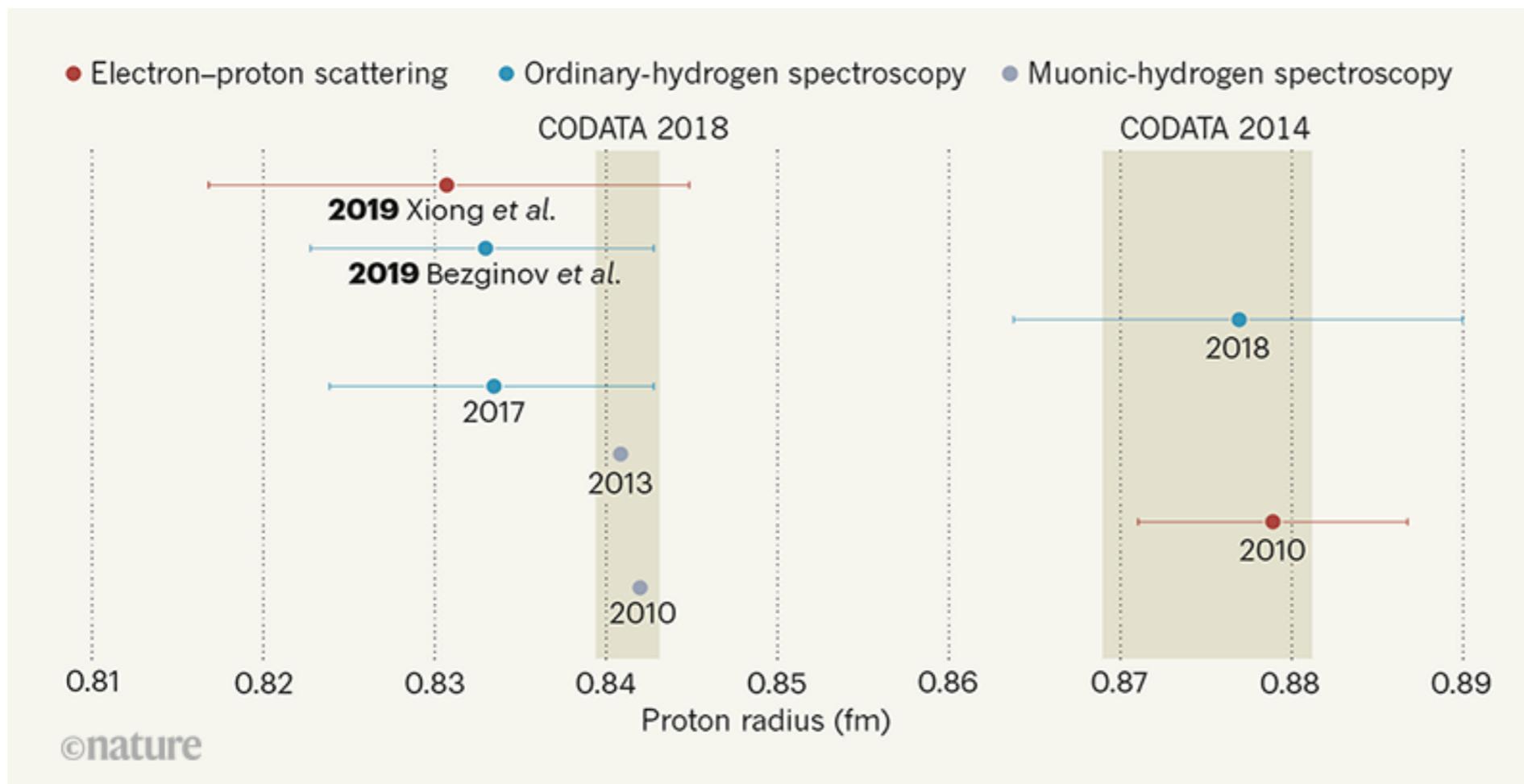
$$F(q^2) \approx 1 - \frac{q^2 \langle r^2 \rangle}{6\hbar^2} \quad \text{среднеквадратичный электрический радиус}$$



# Радиус протона



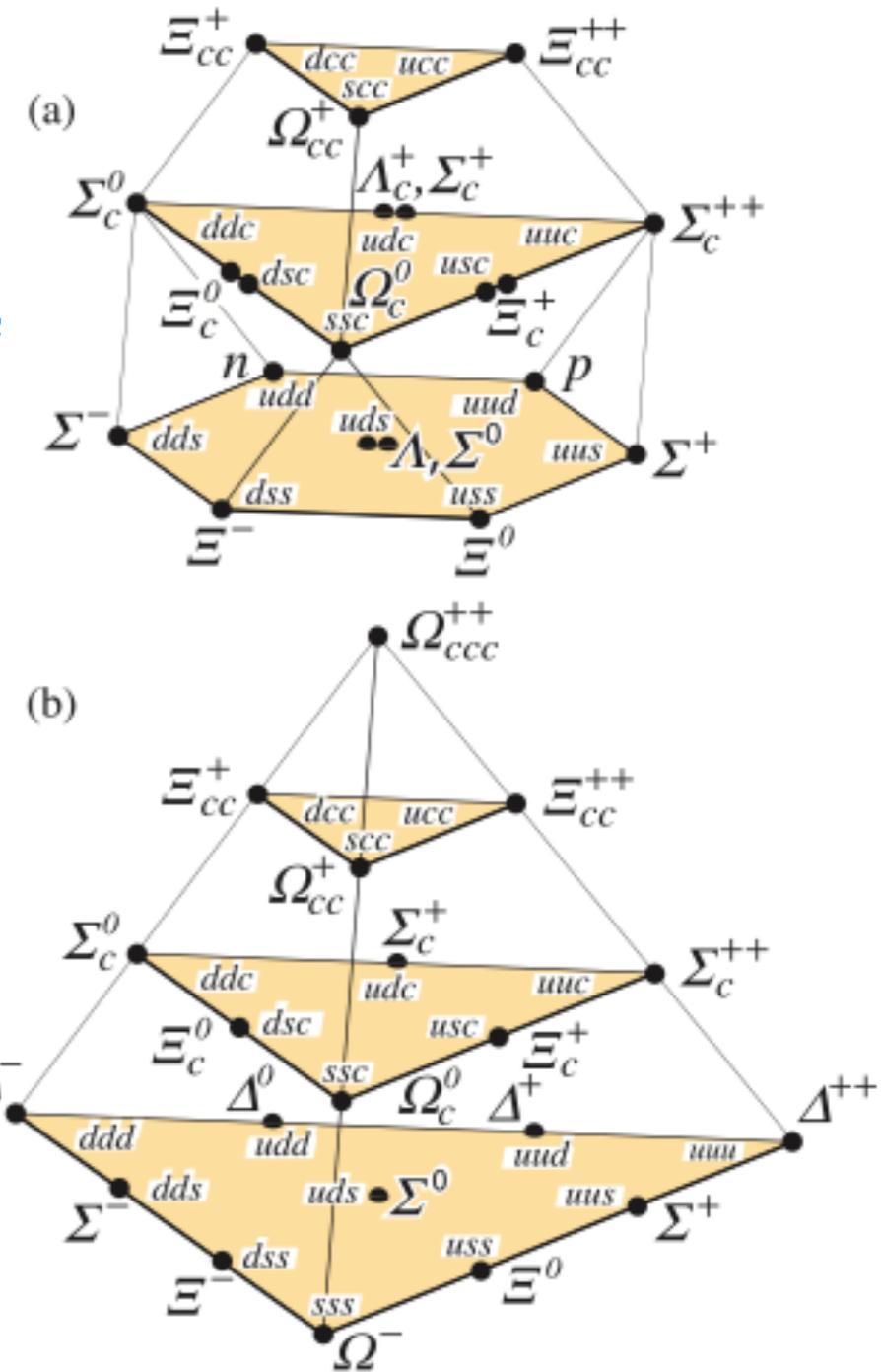
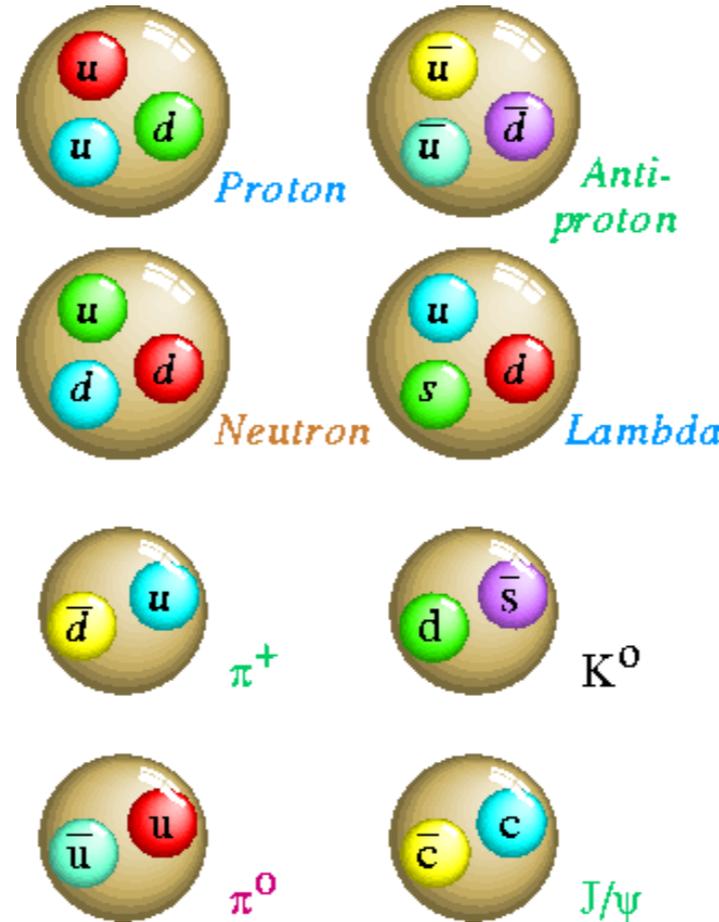
**Загадка радиуса протона: разные методы дают разные результаты**



**Решена или нет?**

# 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 →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom



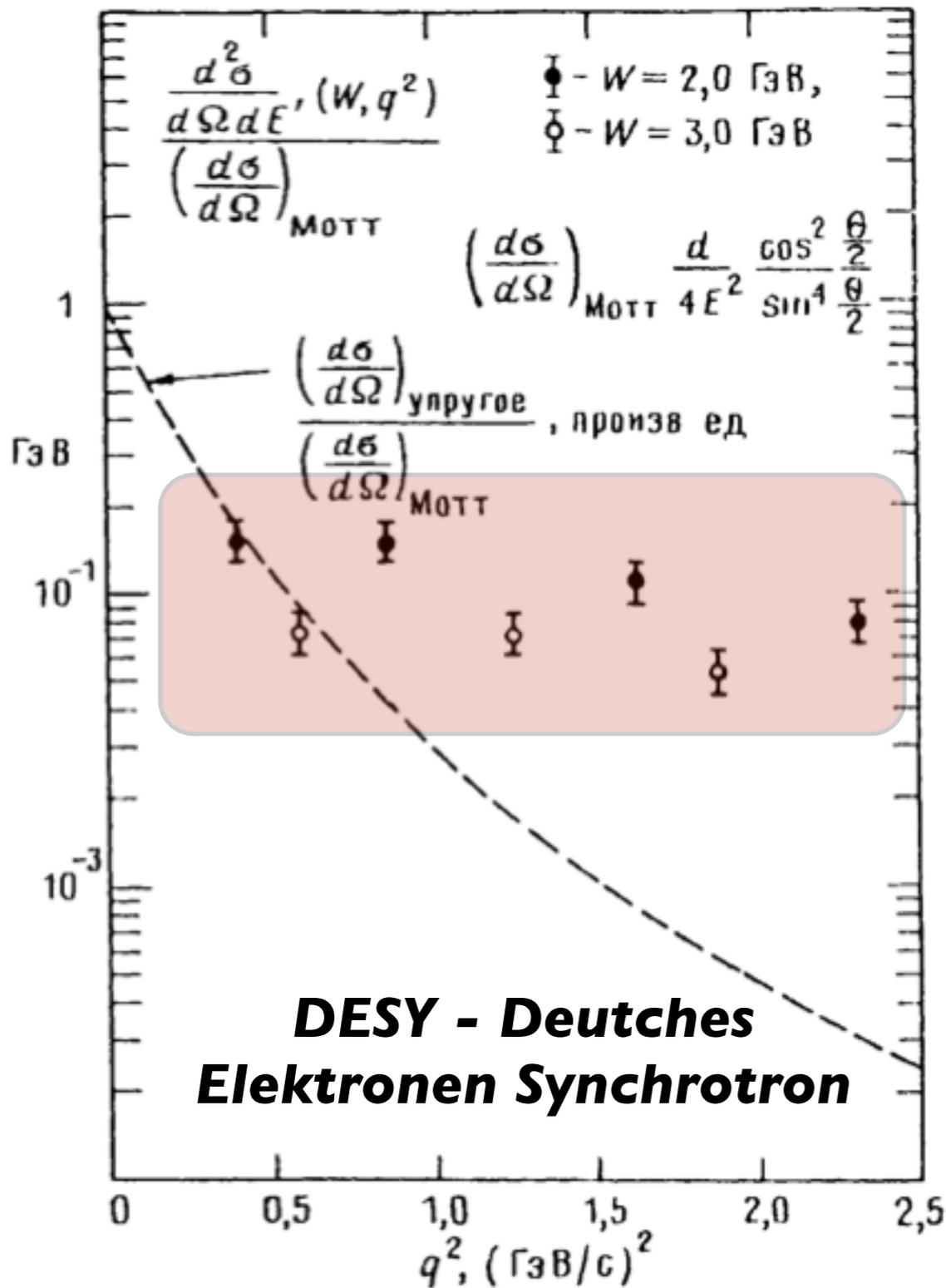
**1964 год**

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

# Партоны

Внутри нуклона есть  
точечные объекты -  
партоны

Партонная модель - 1969 г



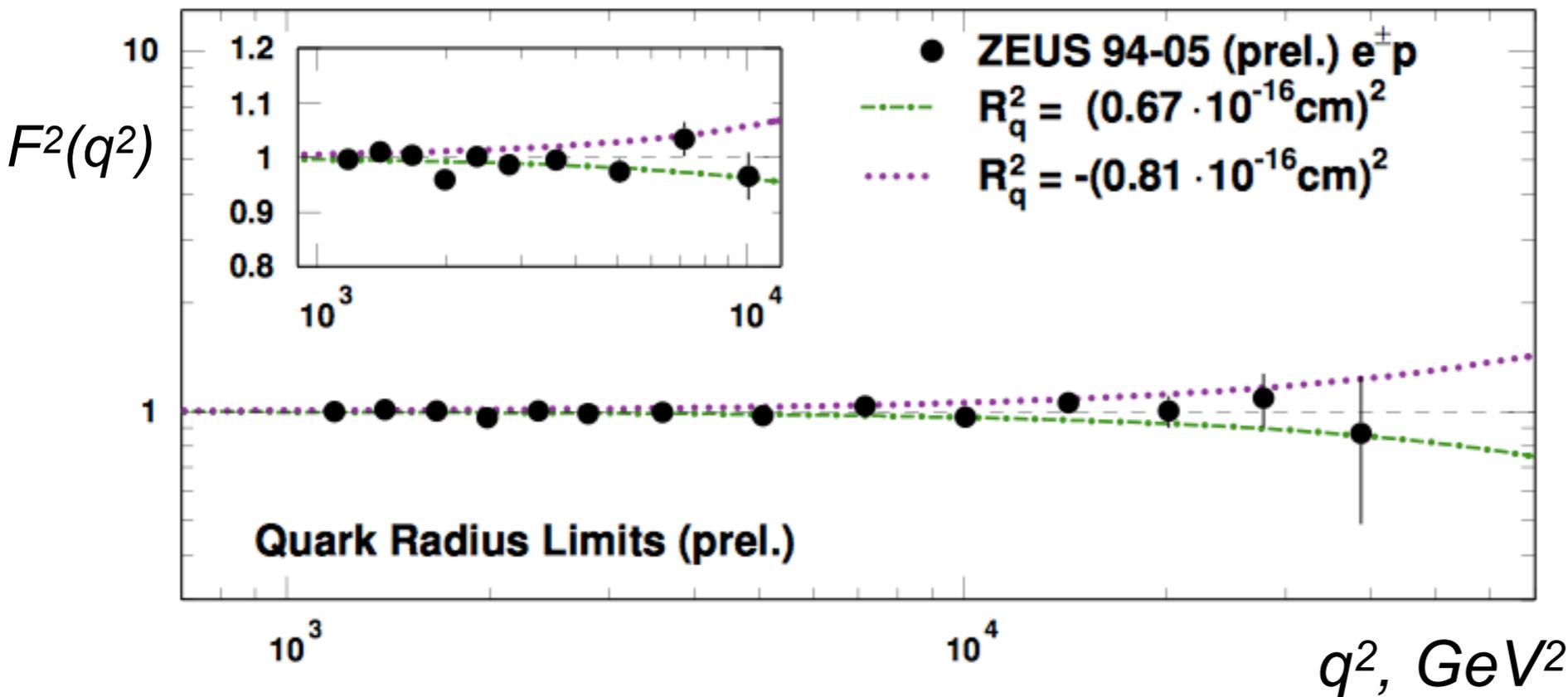
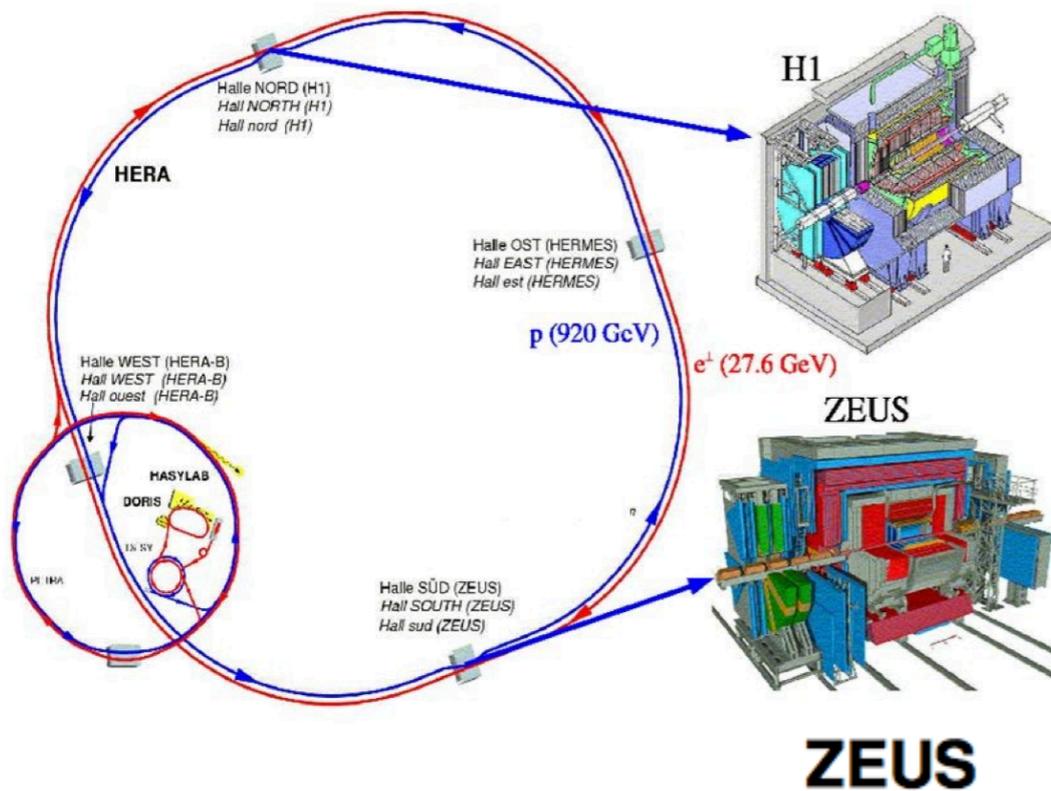
Р. Фейнман

В начале 70х партоны были  
отождествлены с кварками

# Размер кварков

## HERA - электрон-протонный коллайдер в DESY

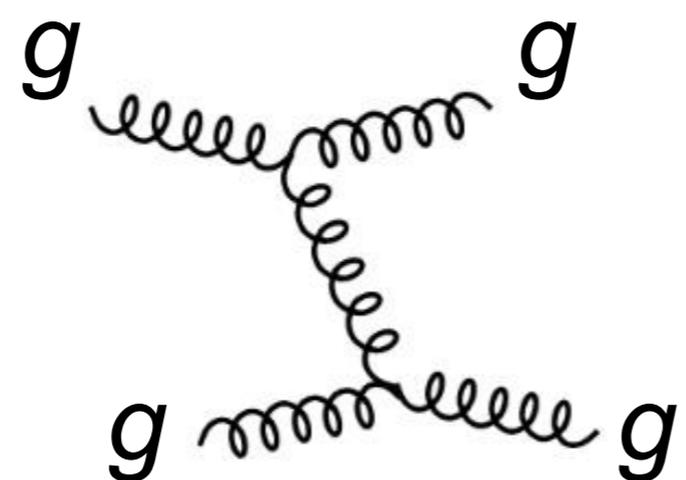
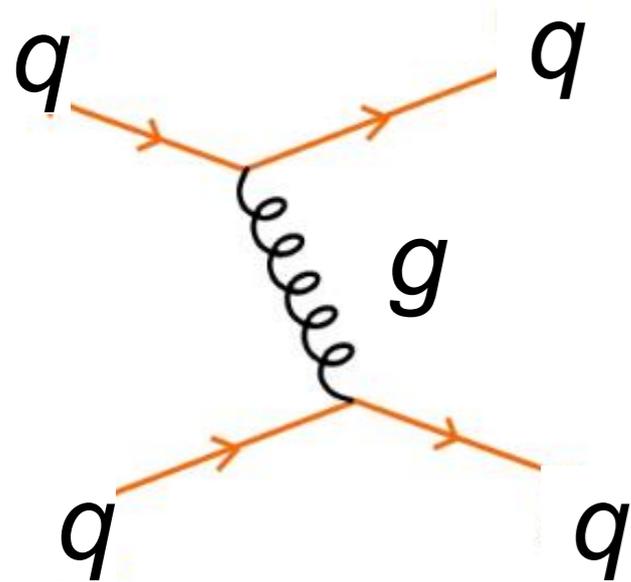
Пока нет никаких указаний на то, что кварки имеют внутреннюю структуру



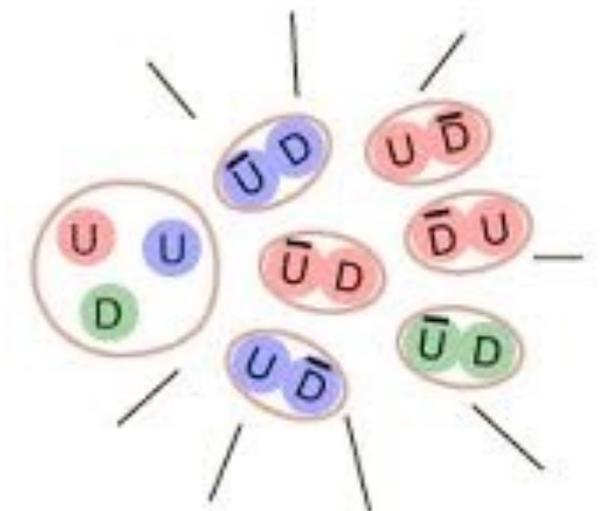
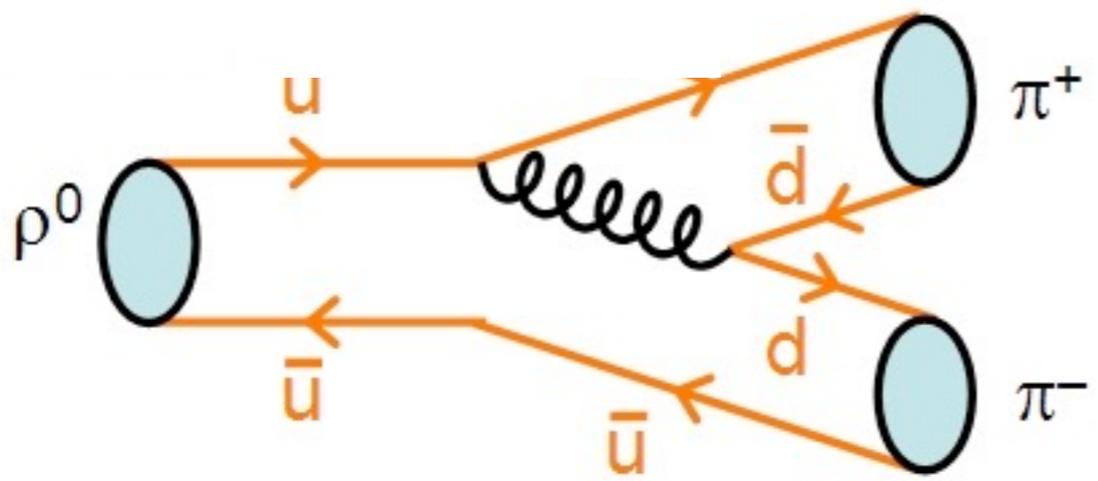
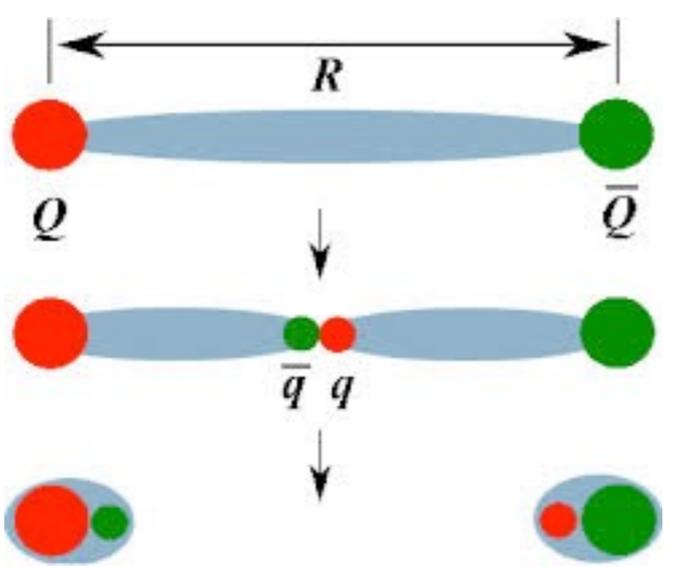
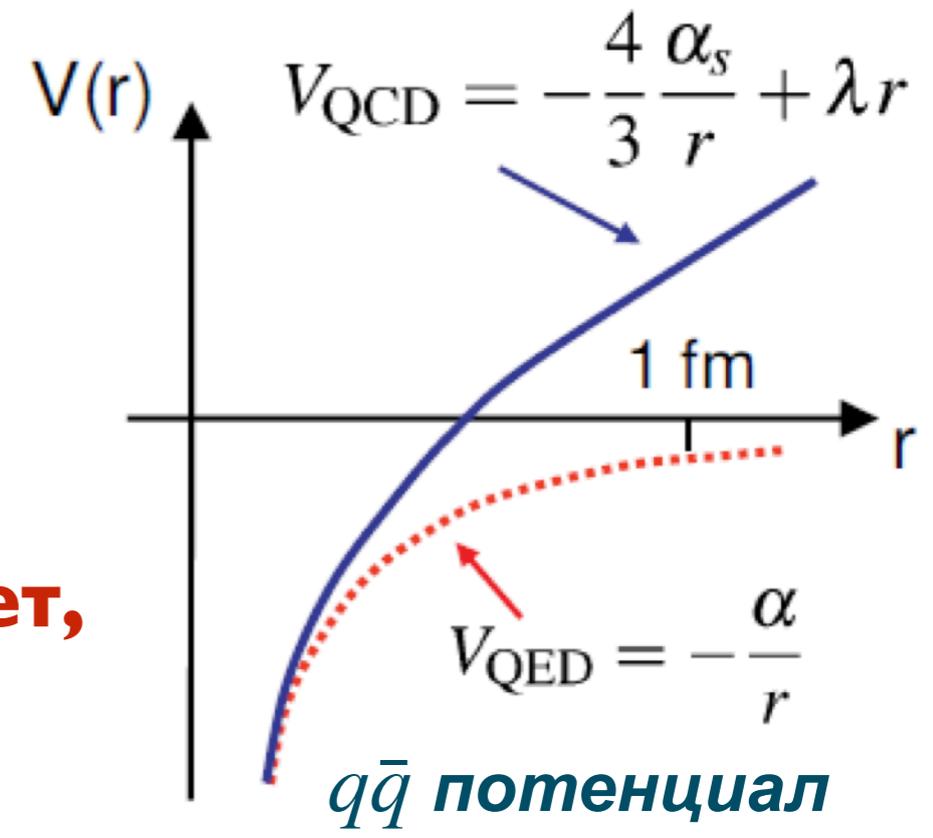
$$F(q^2) \approx 1 - \frac{q^2 \langle r_q^2 \rangle}{6\hbar^2}$$

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

# Квантовая хромодинамика



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

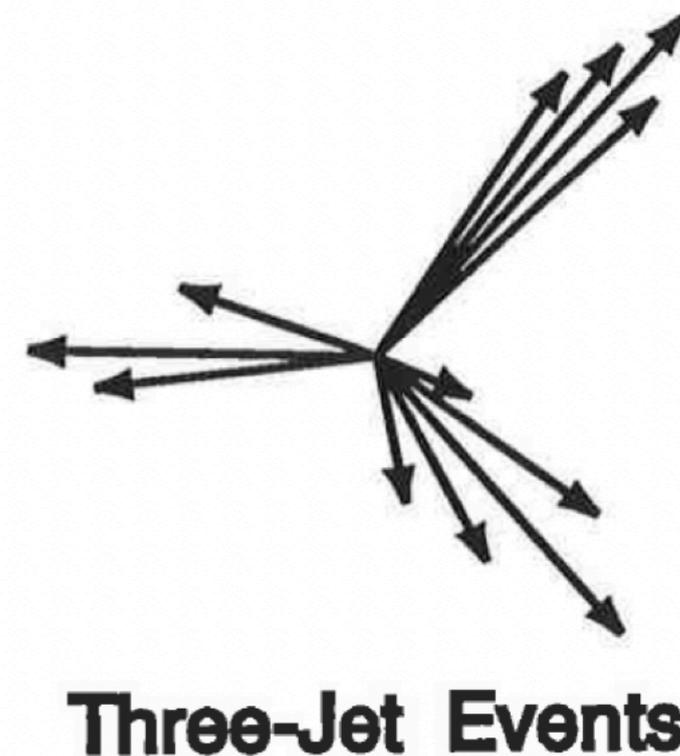
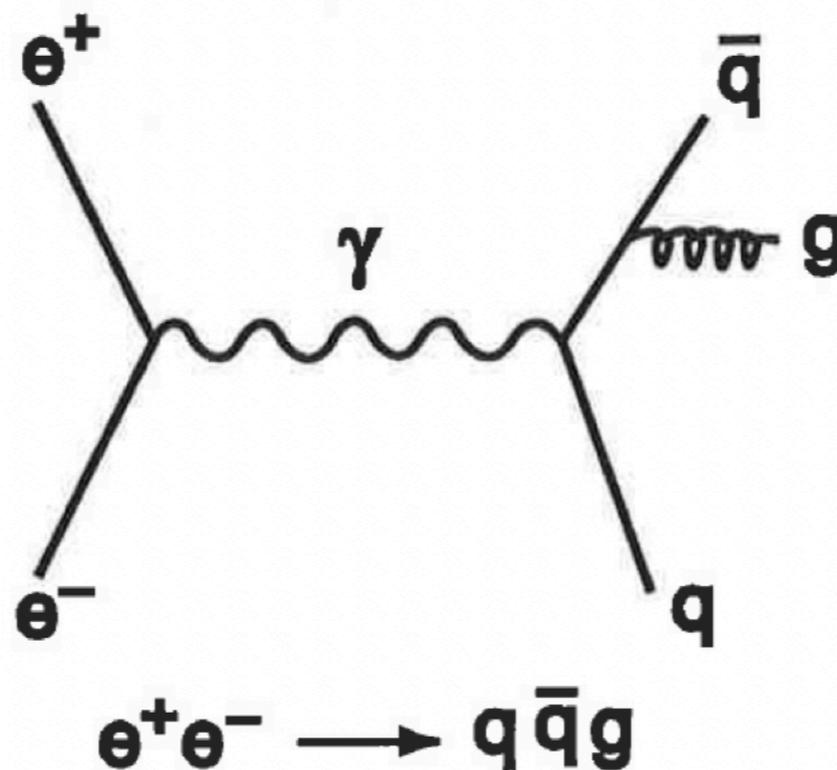


**Конфайнмент при больших но асимптотическая свобода на масштабе ~1 фм**

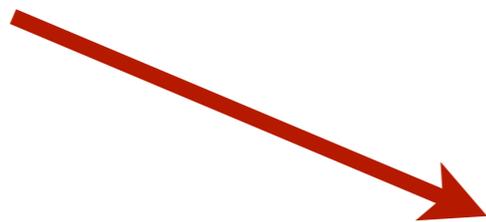
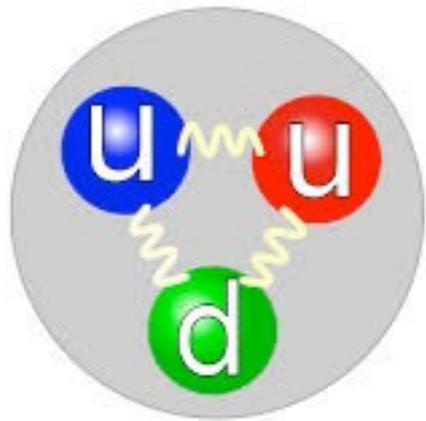
# Глюон

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

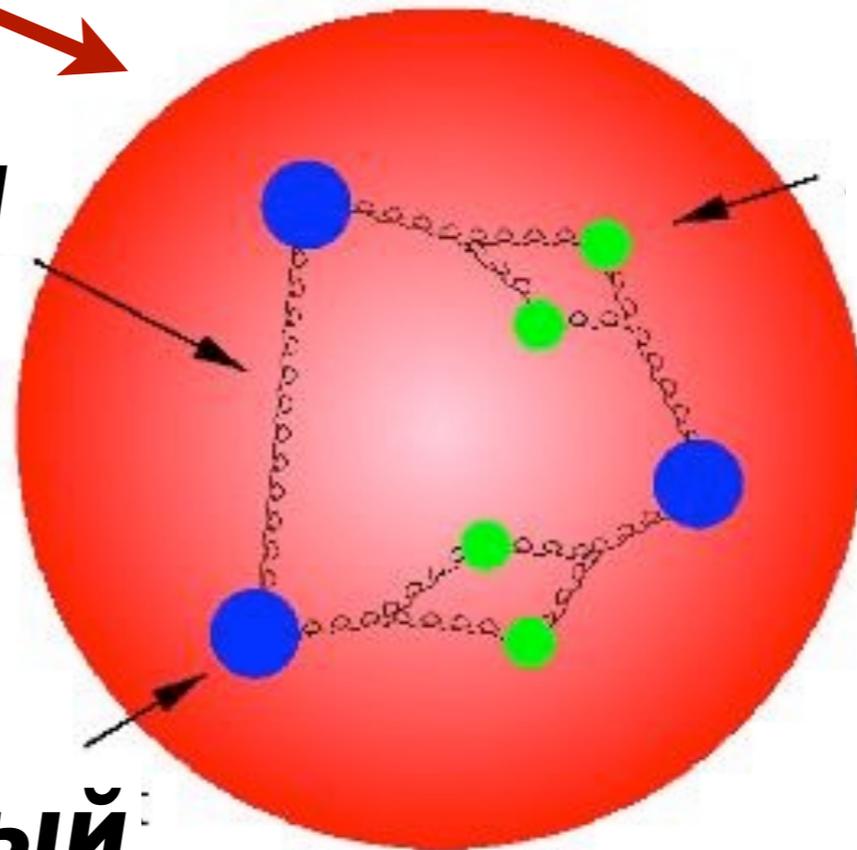
**PETRA**  
коллайдер  
 $\sqrt{s} = 27 \text{ GeV}$   
1979



# Морские кварки



**Глюон**

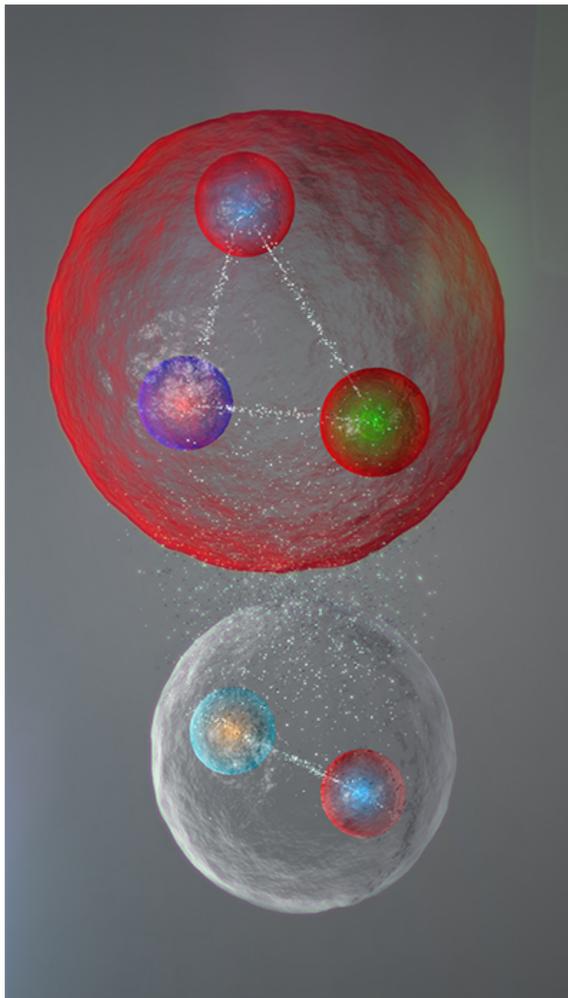


**Морские  
кварки и  
антикварки**

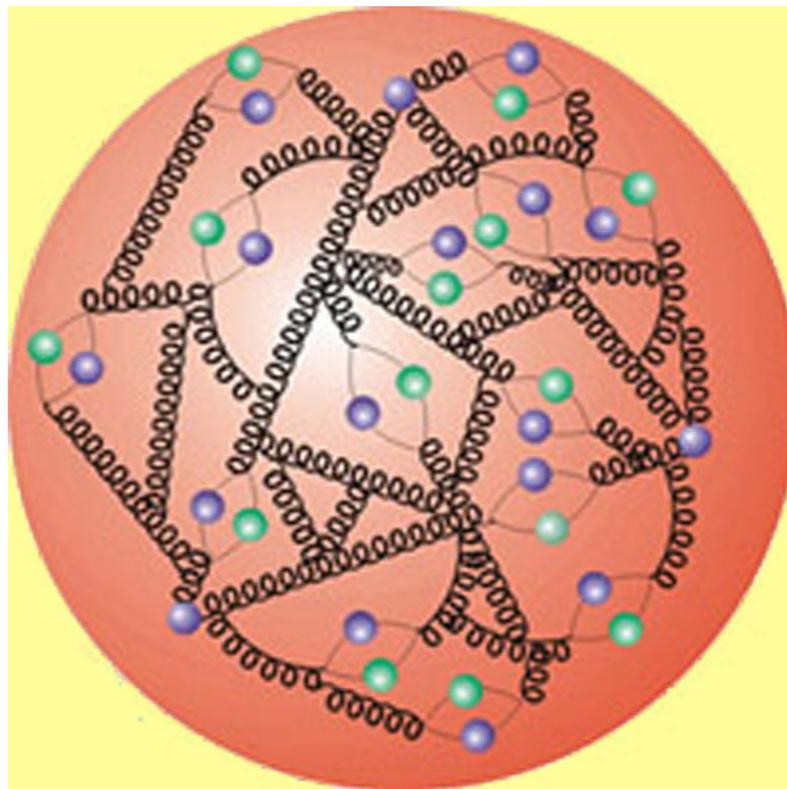
**Валентный  
кварк**

# КХД - основные направления

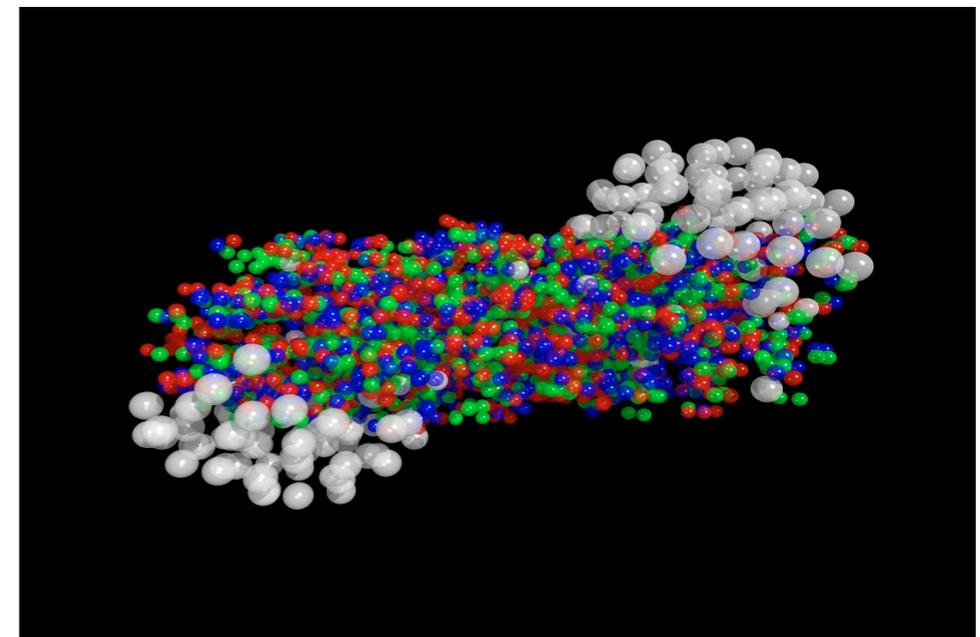
Спектроскопия  
адронов



Структура  
адронов



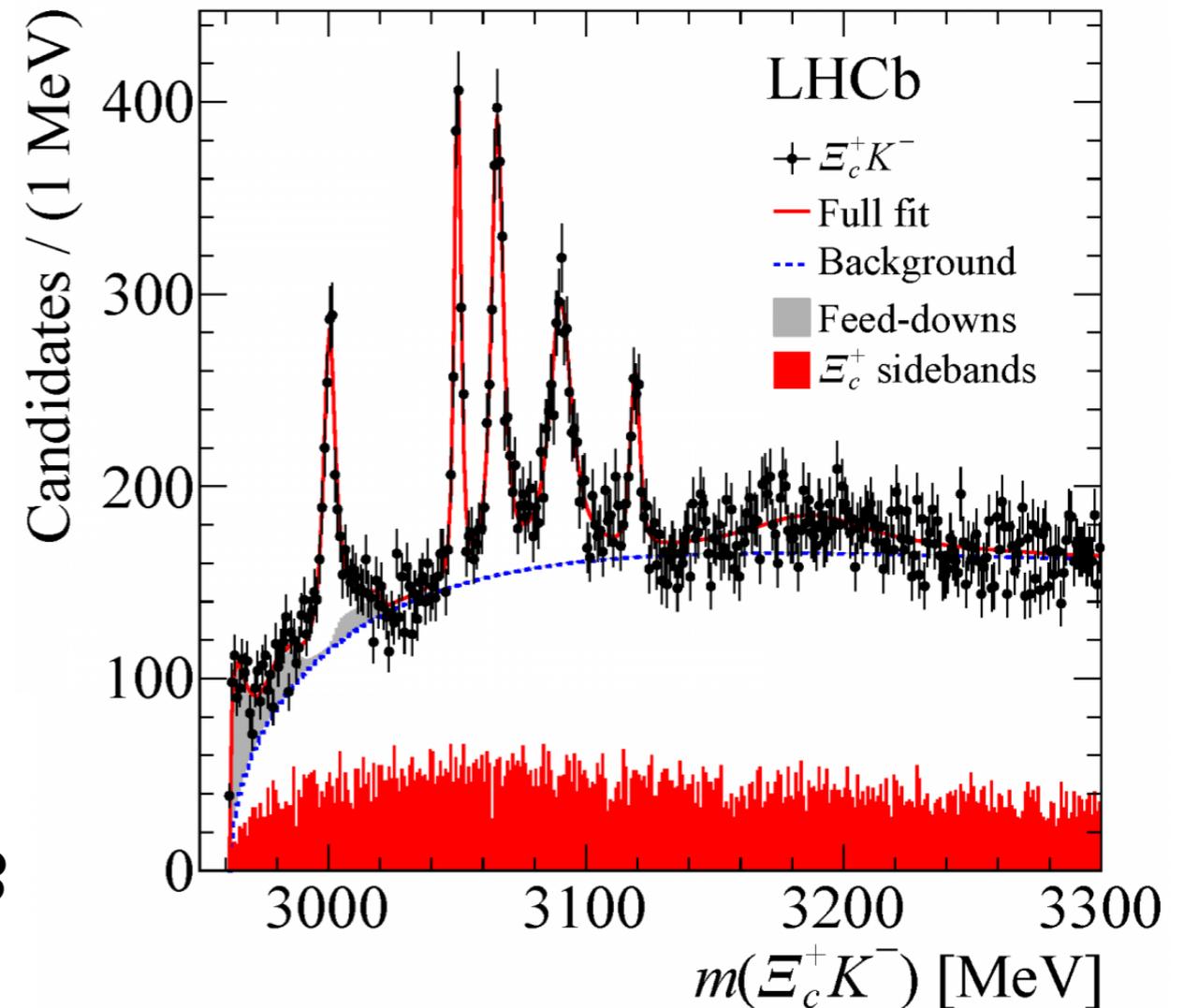
Адронная  
материя в  
экстремальных  
условиях



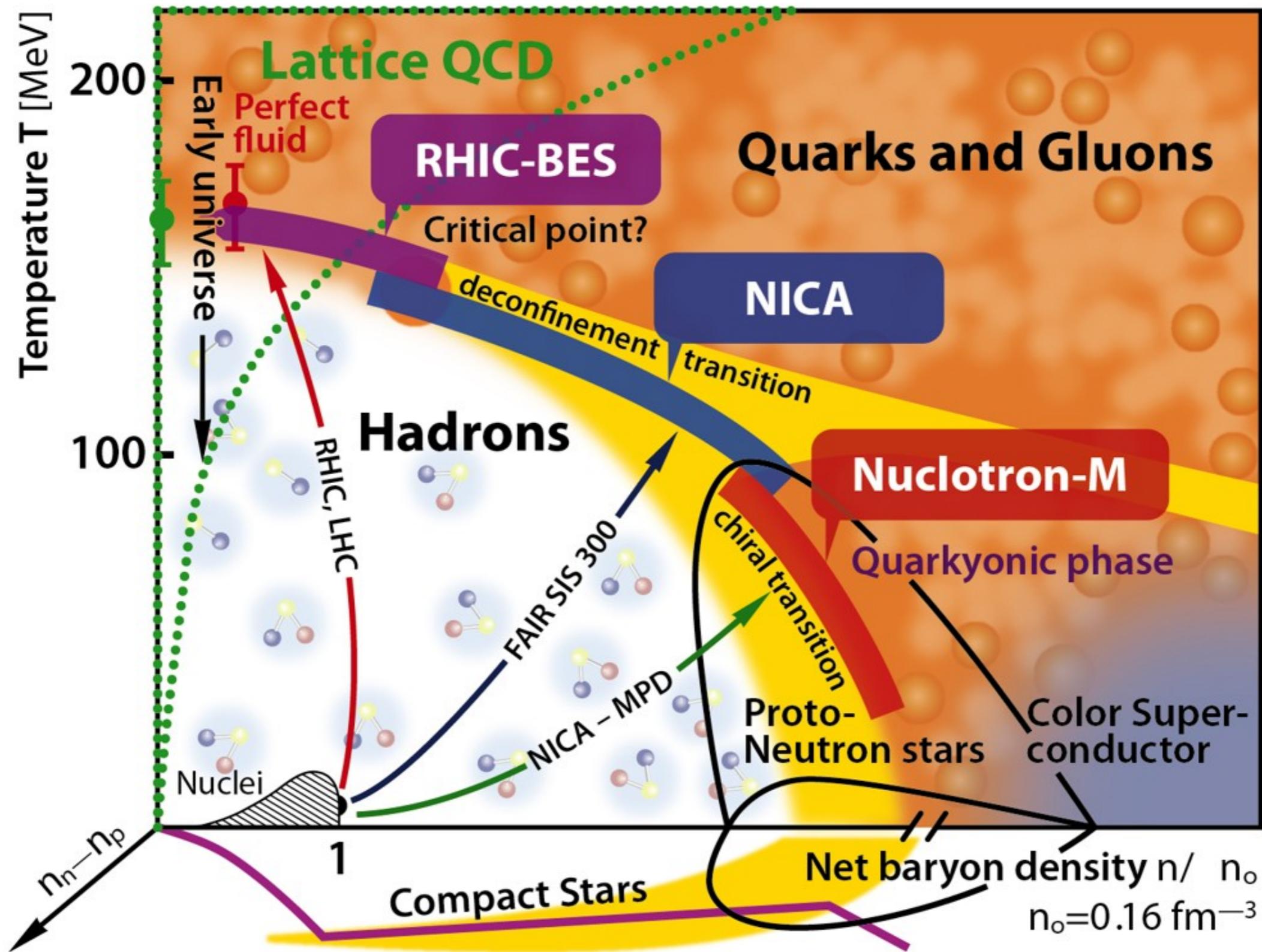
# Спектроскопия адронов



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



# Адронная материя

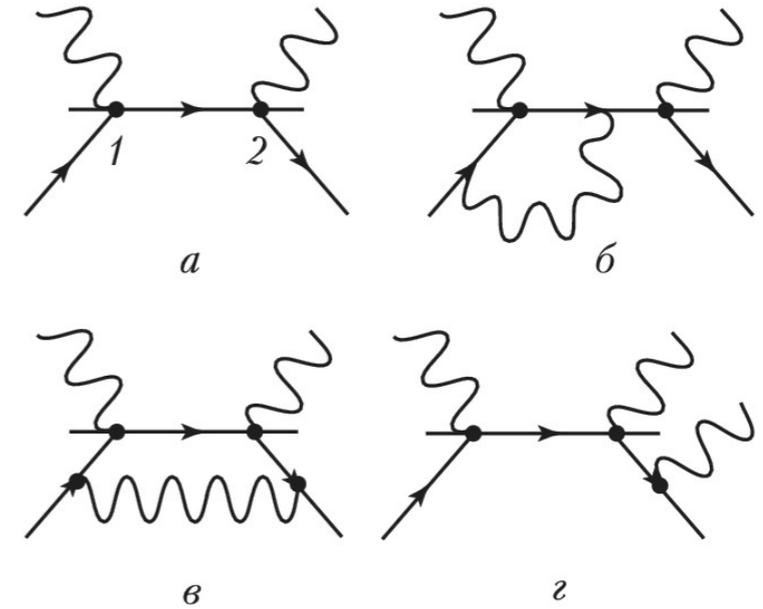


# Проблема описания свойств адронов из первых принципов

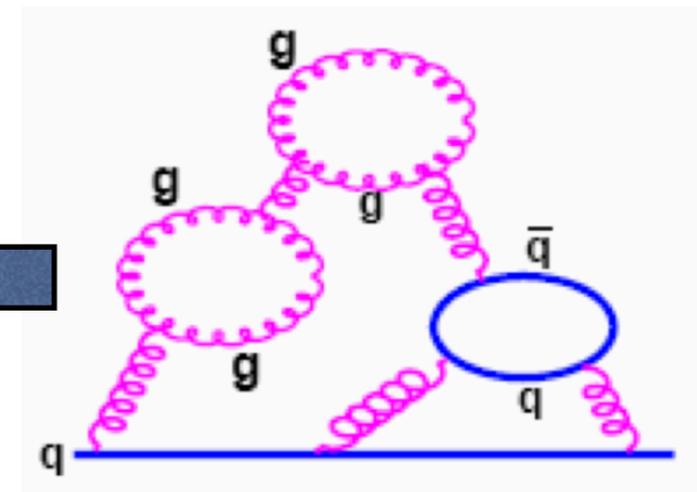
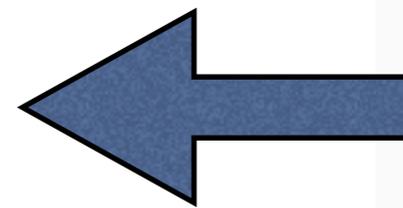
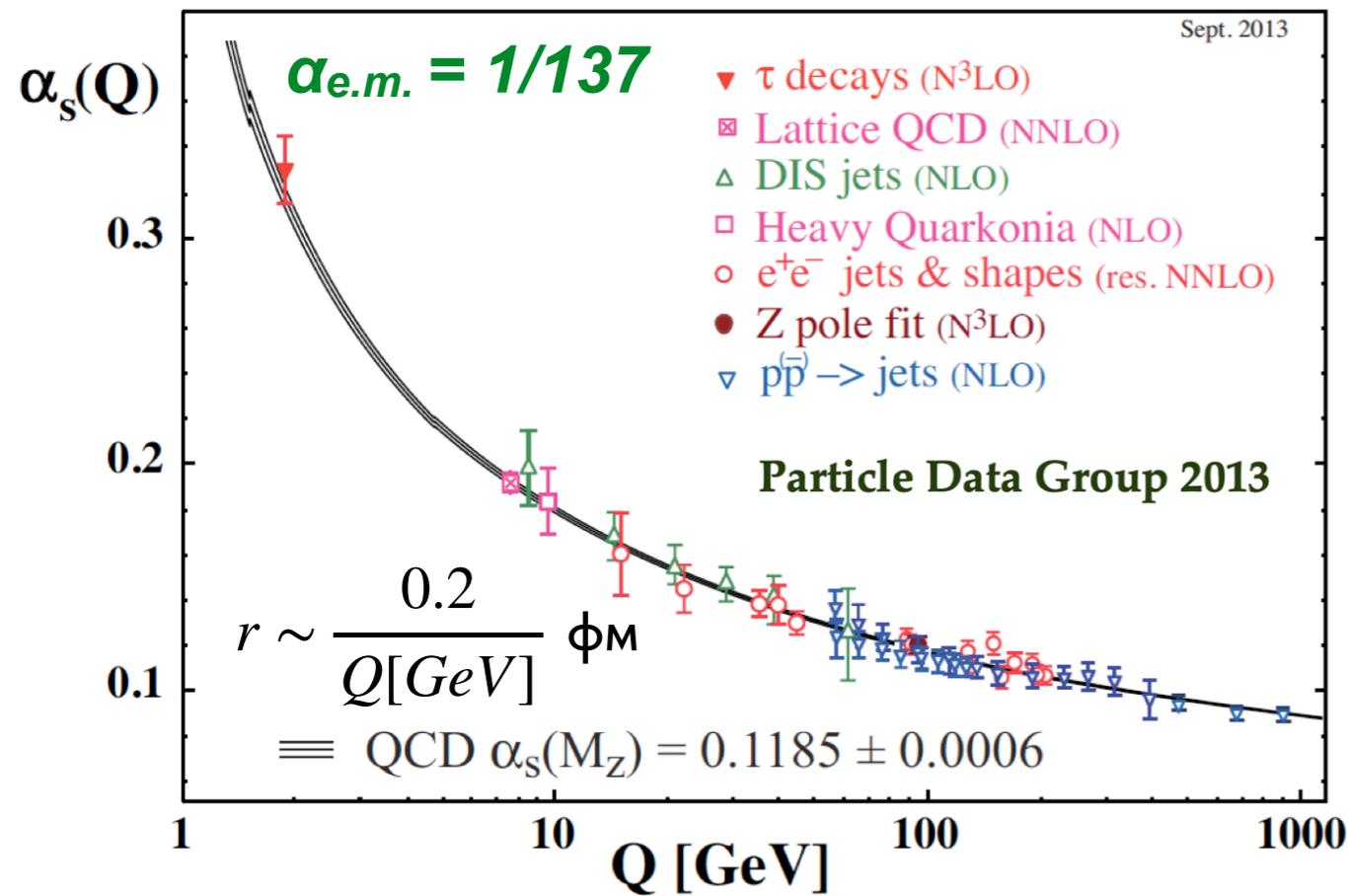
## Техника фейнмановских диаграмм

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

$\alpha$  - константа взаимодействия.



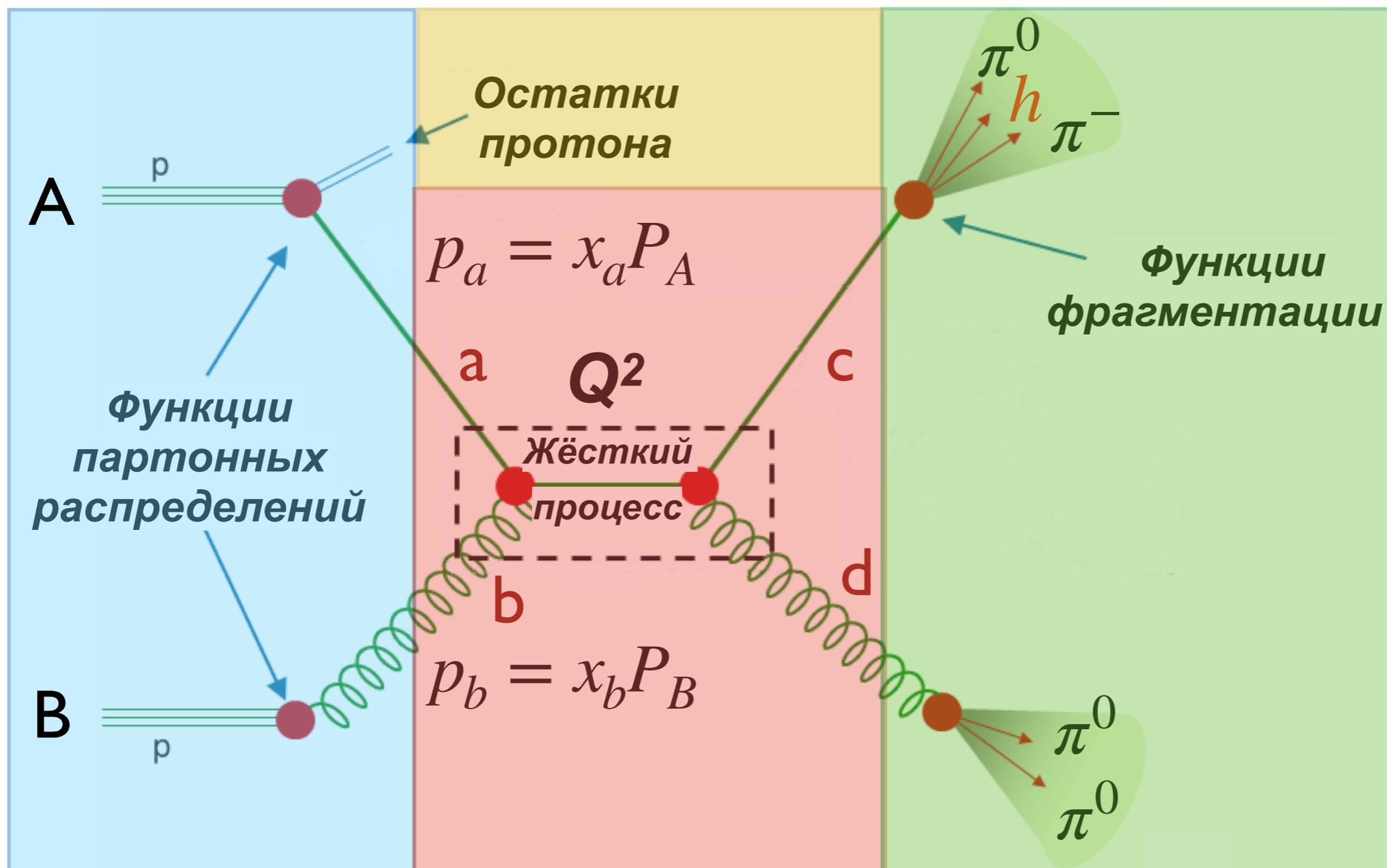
Ряд быстро сходится, если  $\alpha \ll 1$



**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

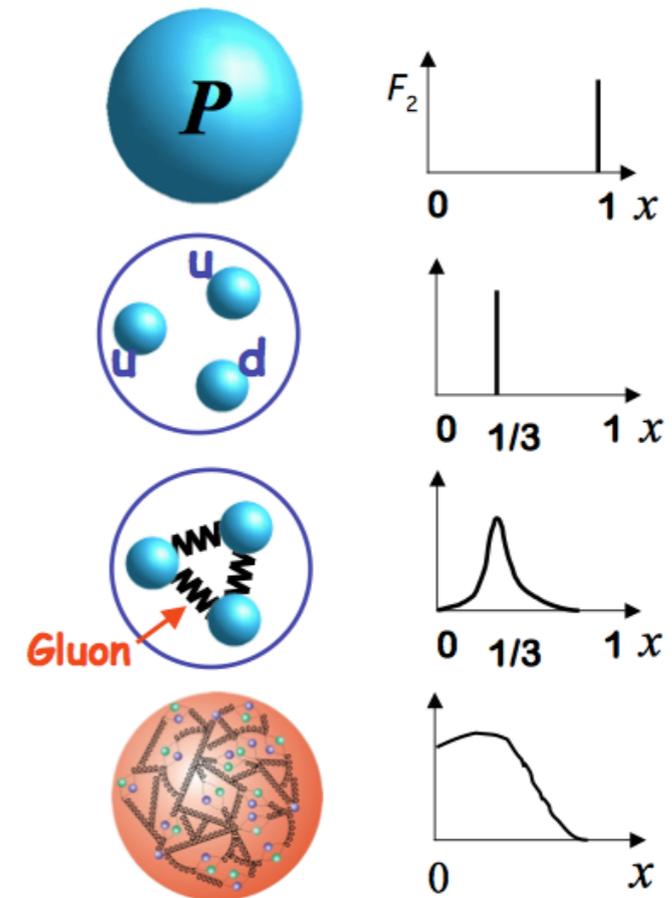
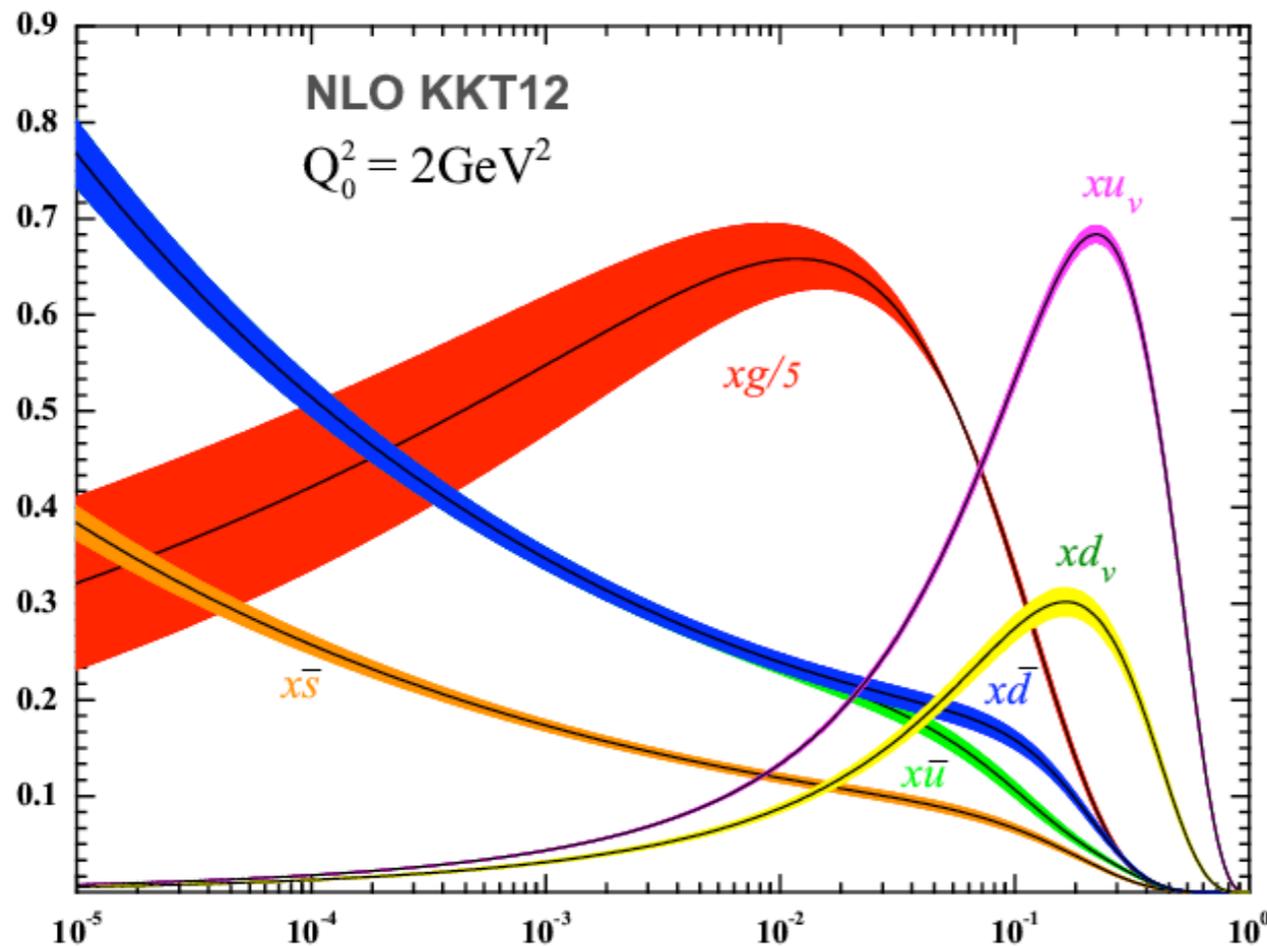
$Q$  - характерная энергия, переданная жёстком пр

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

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

# Партонные распределения

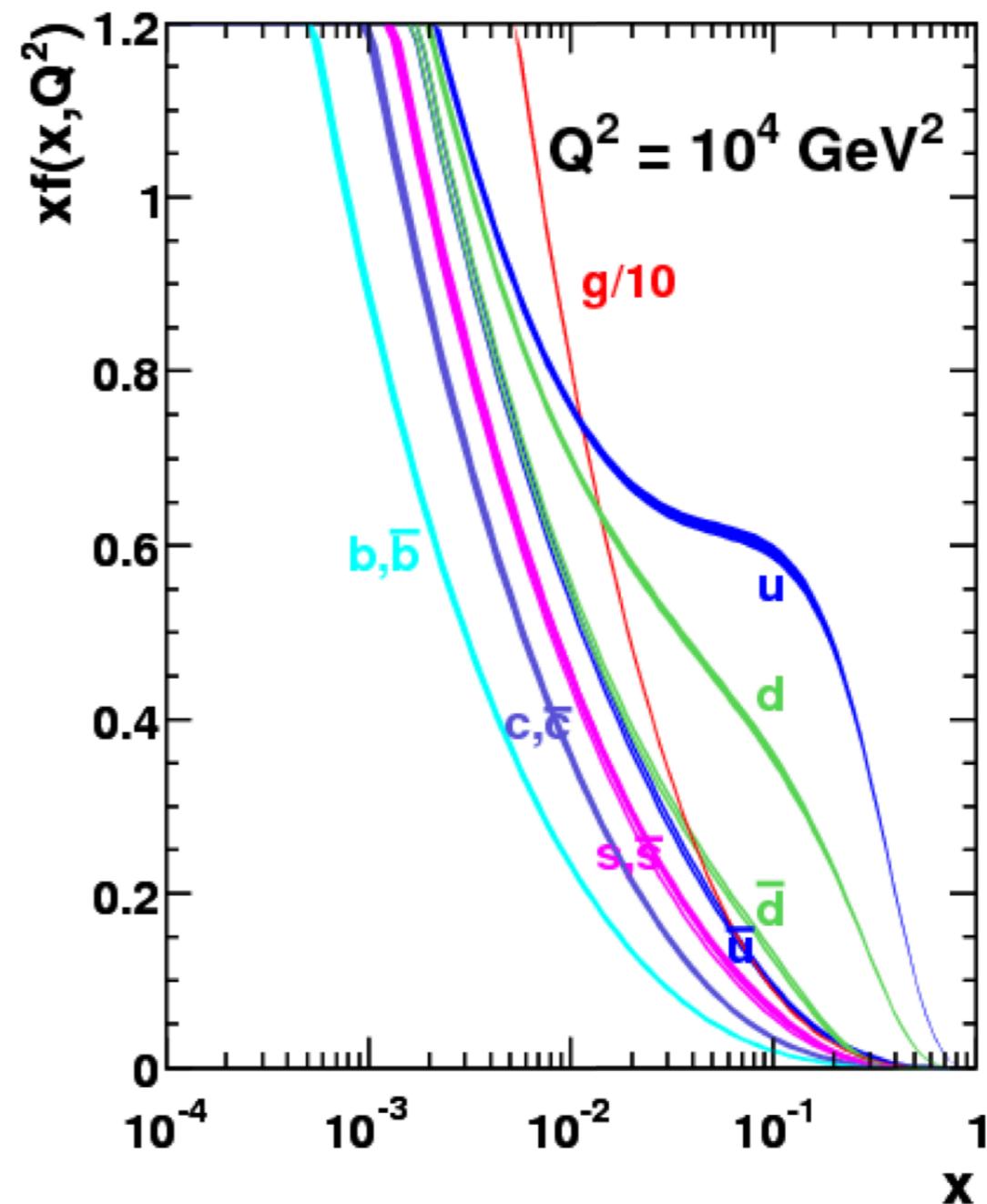
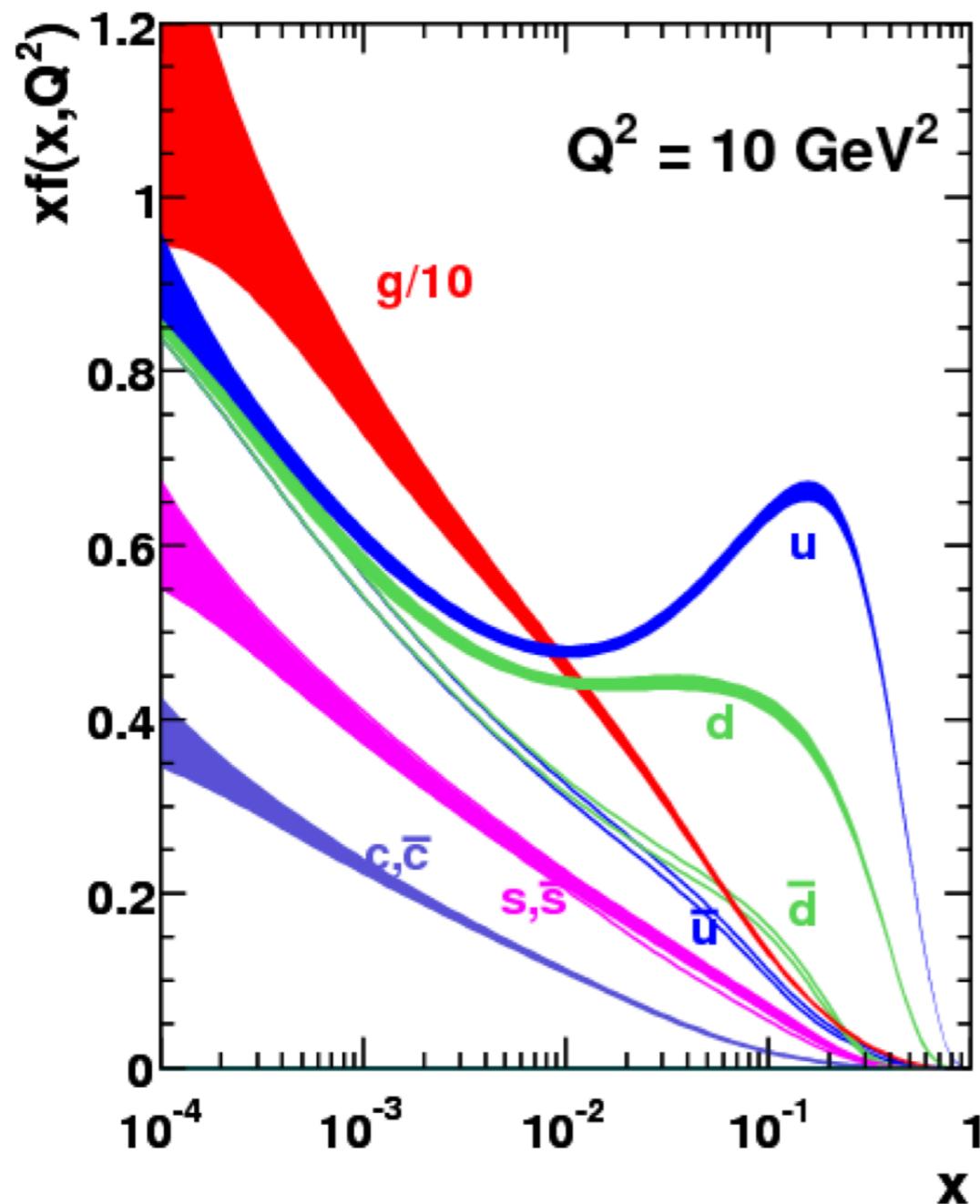
Функции партонных распределений (PDF)  $f(x, Q^2)$  определяют **вероятность** найти в нуклоне партон, несущий долю импульса  $x$ .



Универсальны, 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 !**

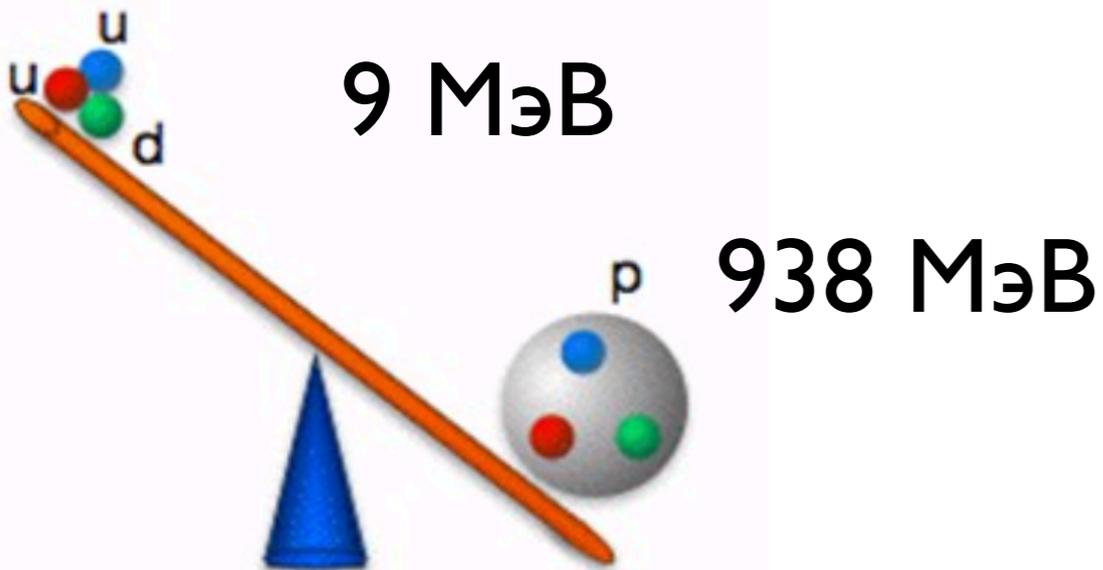
# Партонные распределения



**С ростом  $Q^2$  растёт роль морских кварков!**

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

# Масса протона

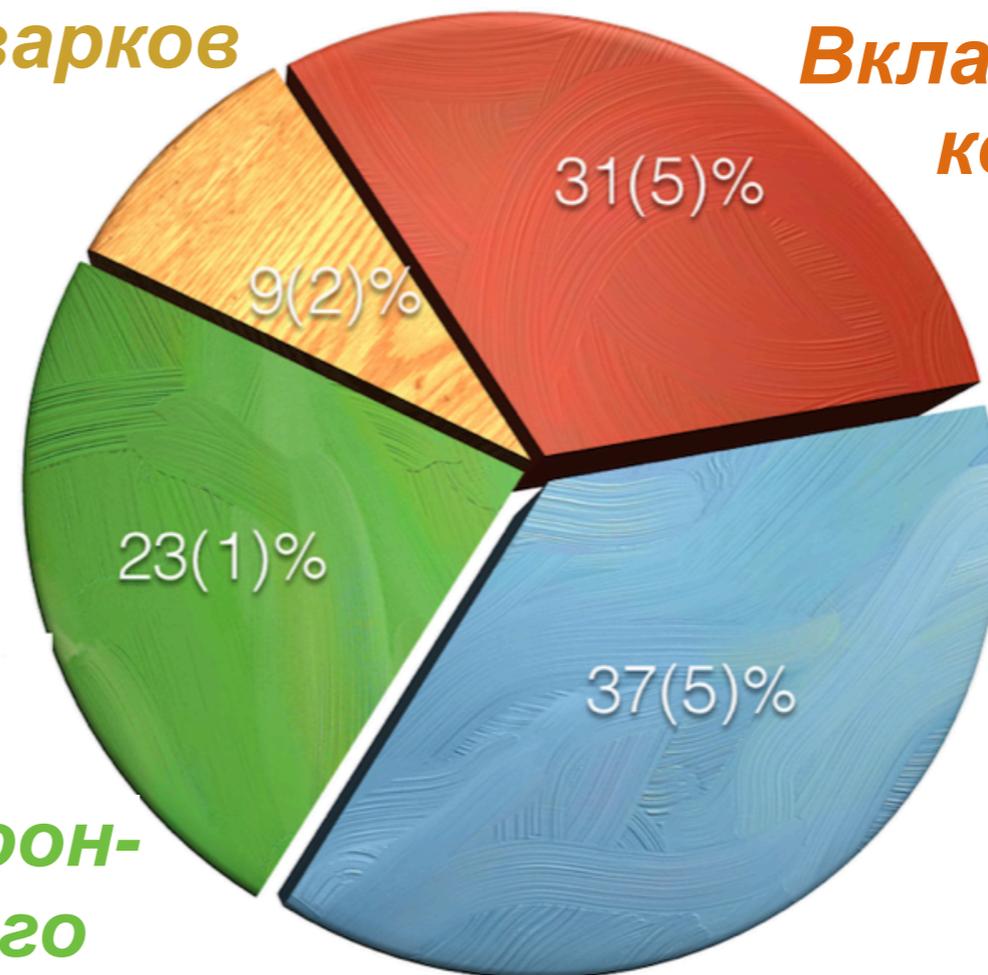


**Механизм Хиггса  
практически не причастен  
к формированию массы  
протона!**

*Вклад массы кварков*

*Вклад энергии кварков*

Модельно-зависимая  
декомпозиция массы протона



*Вклад глюон-  
глюонного  
взаимодействия*

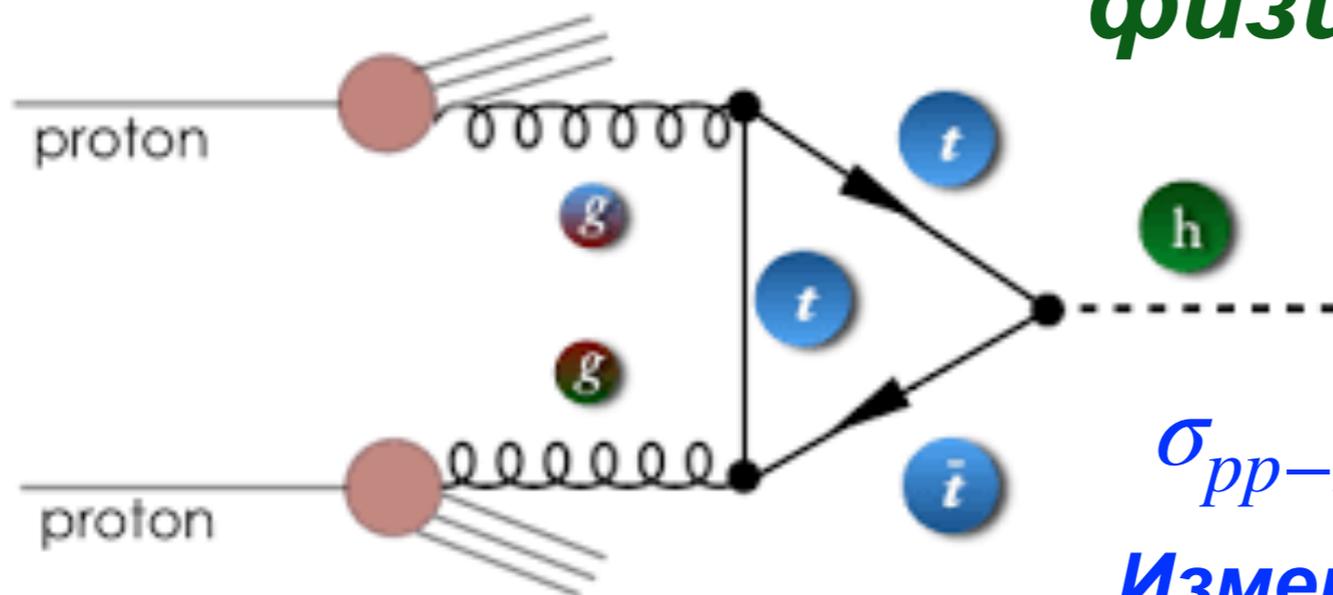
*Вклад энергии глюонов*



# Зачем изучать PDF?

Функции партонных распределений протона являются такими же **фундаментальными величинами**, как его масса, магнитный момент, электромагнитный радиус и т. д.

Функции партонных распределений в силу их универсальности являются необходимым ингредиентом для поиска и изучения новой физики.

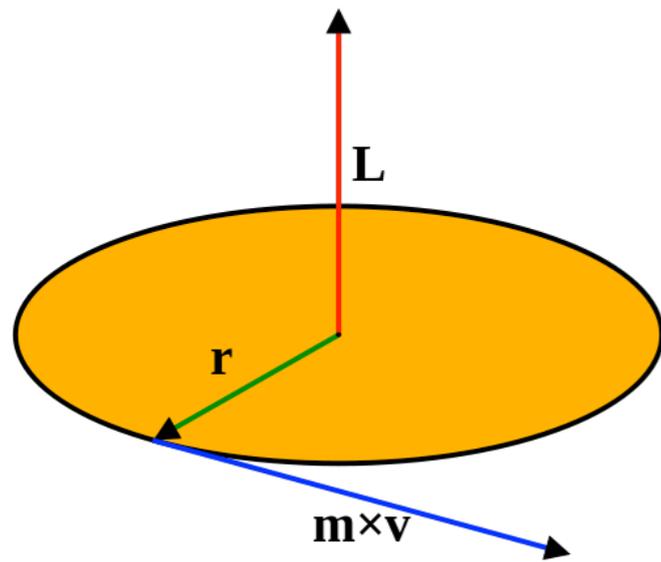


$$\sigma_{pp \rightarrow H} = f(x_1) \otimes f(x_2) \otimes \hat{\sigma}_{gg \rightarrow H}$$

Измерение

Теория

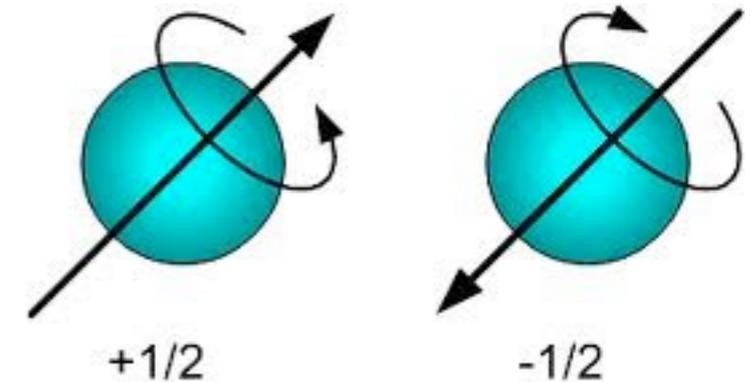
# Спин частицы



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

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

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



Спин имеет квантовую природу

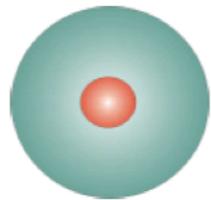
Измеряется в единицах  $\hbar$

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

Спин протона - 1/2  
дейтрона - 1

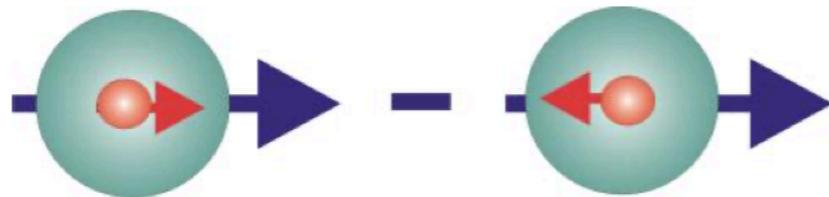
# Поляризованный протон

$f(x)$



**Неполяризованное  
распределение**

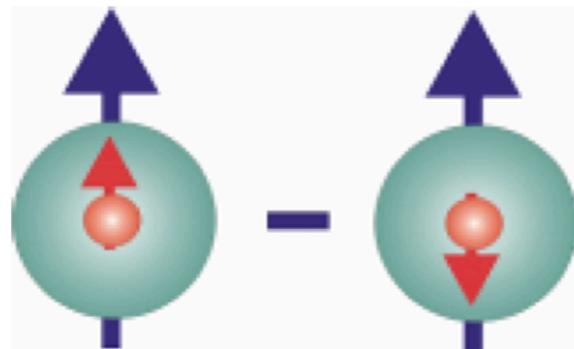
$\Delta f(x)$



**Helicity**

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

$\Delta_T f(x)$



**Transversity**

$A_{TT}$

$P$

# Спиновый кризис

Эксперимент EMC  
(ЦЕРН) 1988 год

Вклад кварков в  
спин протона -  
не более 30% !

Наивная кварковая  
модель

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

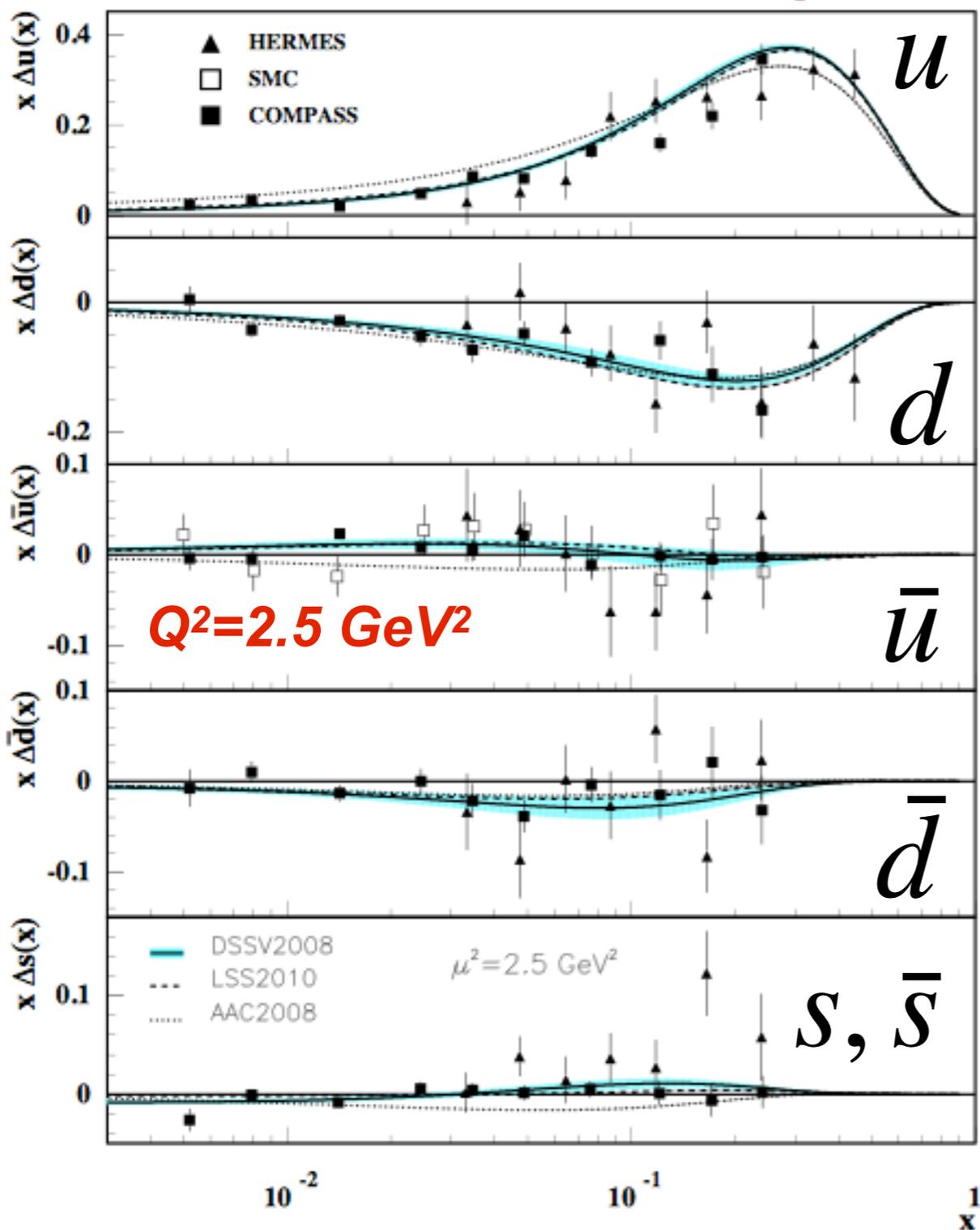
Реальная  
ситуация

$L$  - орбитальные моменты  
кварков и глюонов

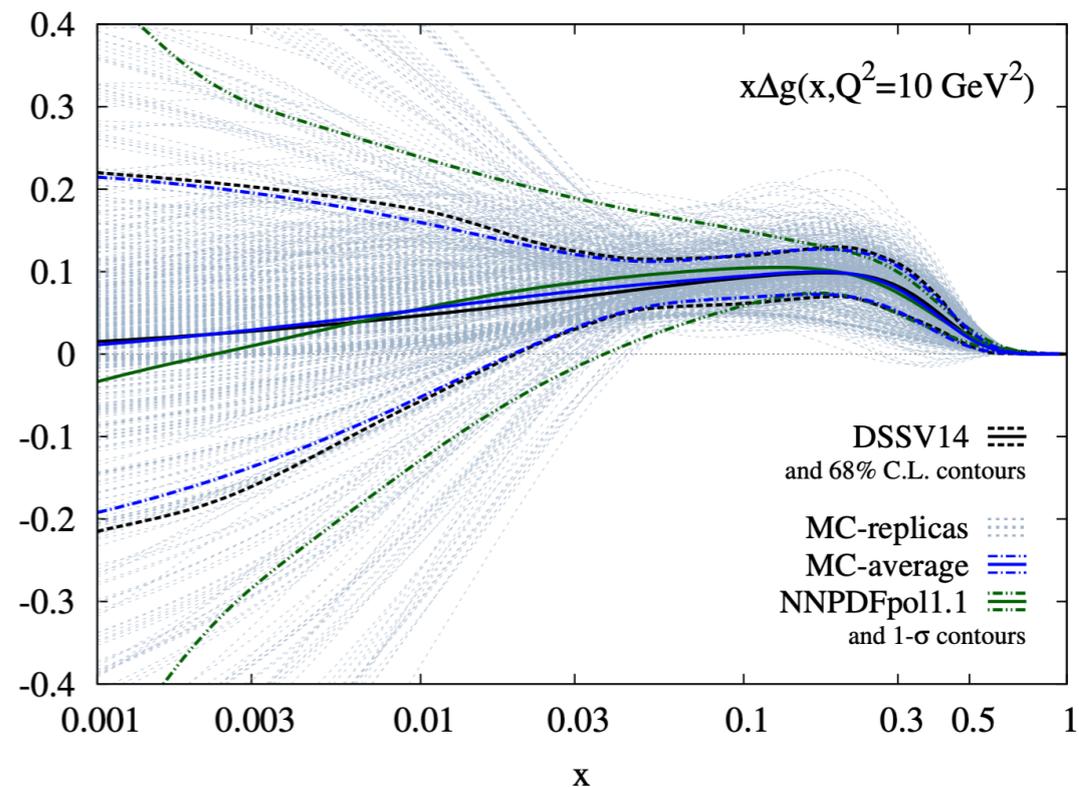
$$S_N = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

# Спиновый кризис

Продольная поляризация каждого из типов кварков:



... и глюонов:

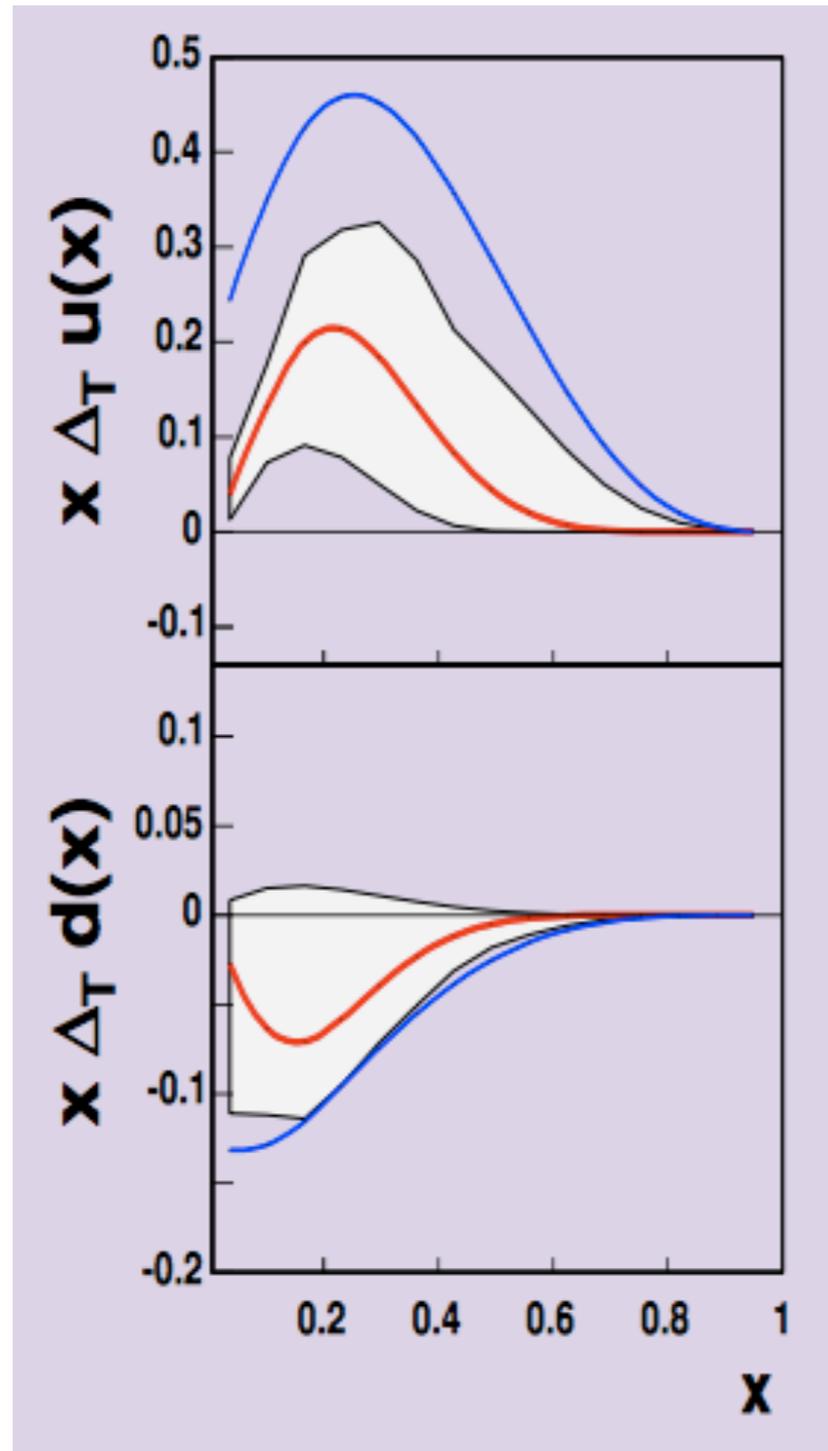


$$S_N = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

~30%

~ ?

# Поляризация кварков

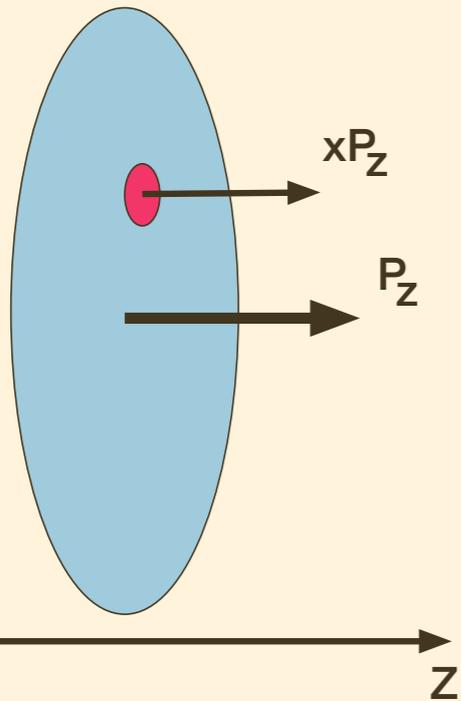


## Поперечная поляризация ( $h_1$ )

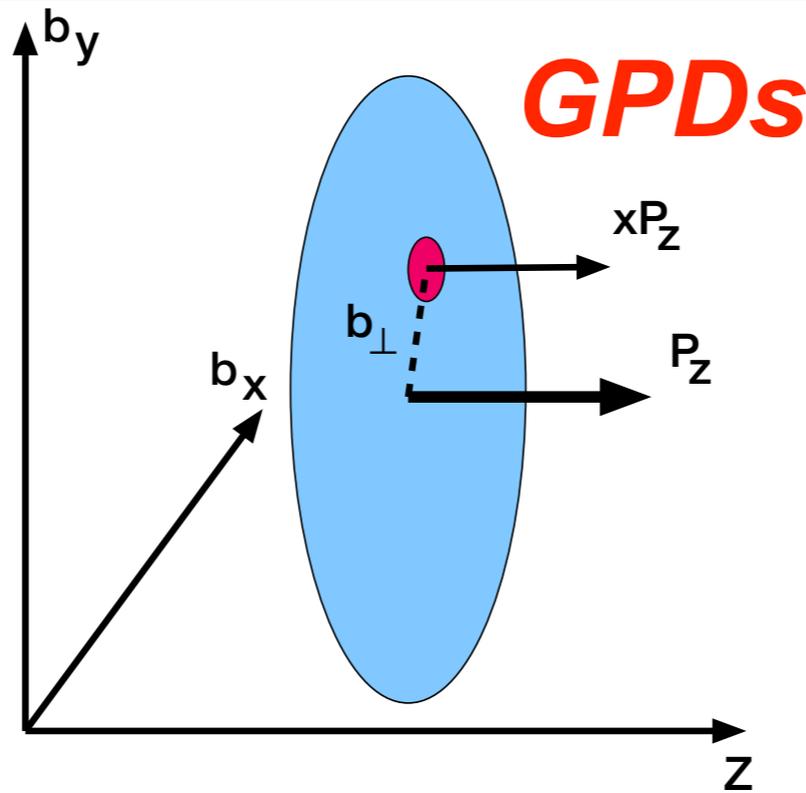
- ***u* и *d* кварки поляризованы в противоположные стороны**

- ***слишком большая неопределённость***

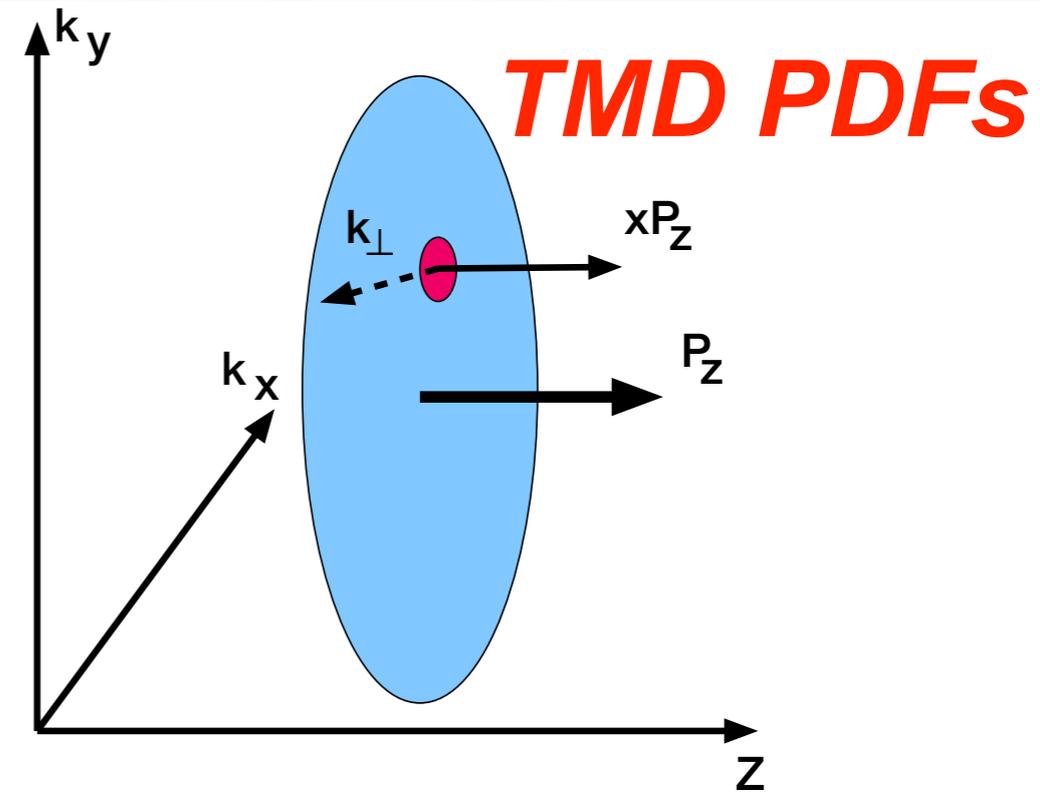
# Протон в 3D



Коллинеарное приближение  
(обычные PDF)

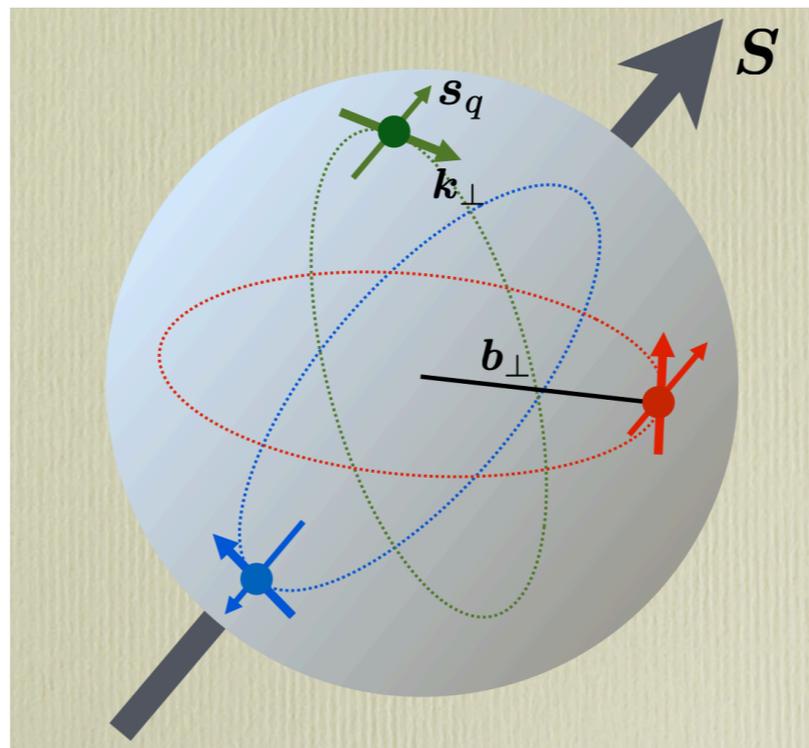


**Generalized Parton Distributions**



**Transverse Momentum Dependent PDFs**

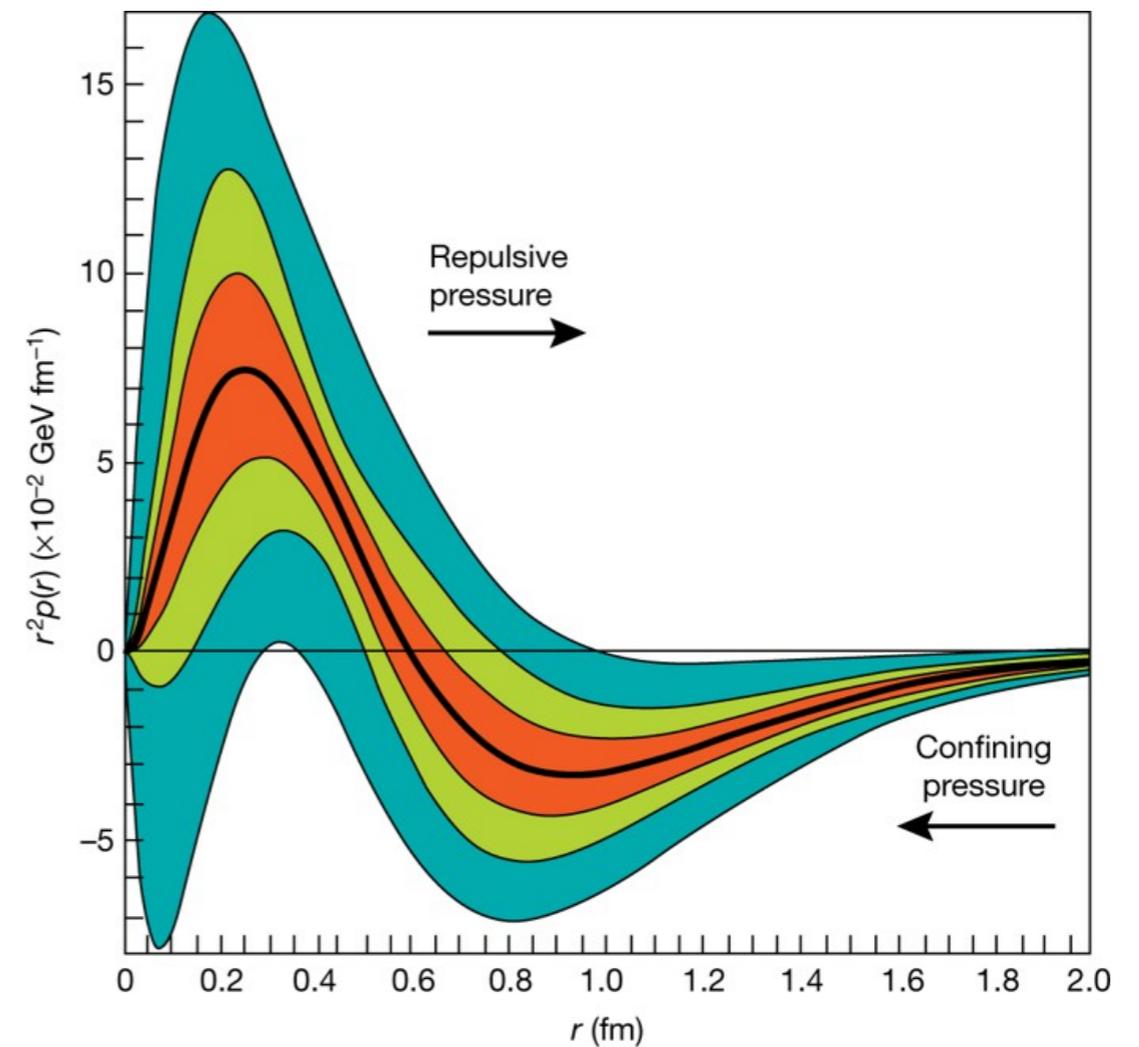
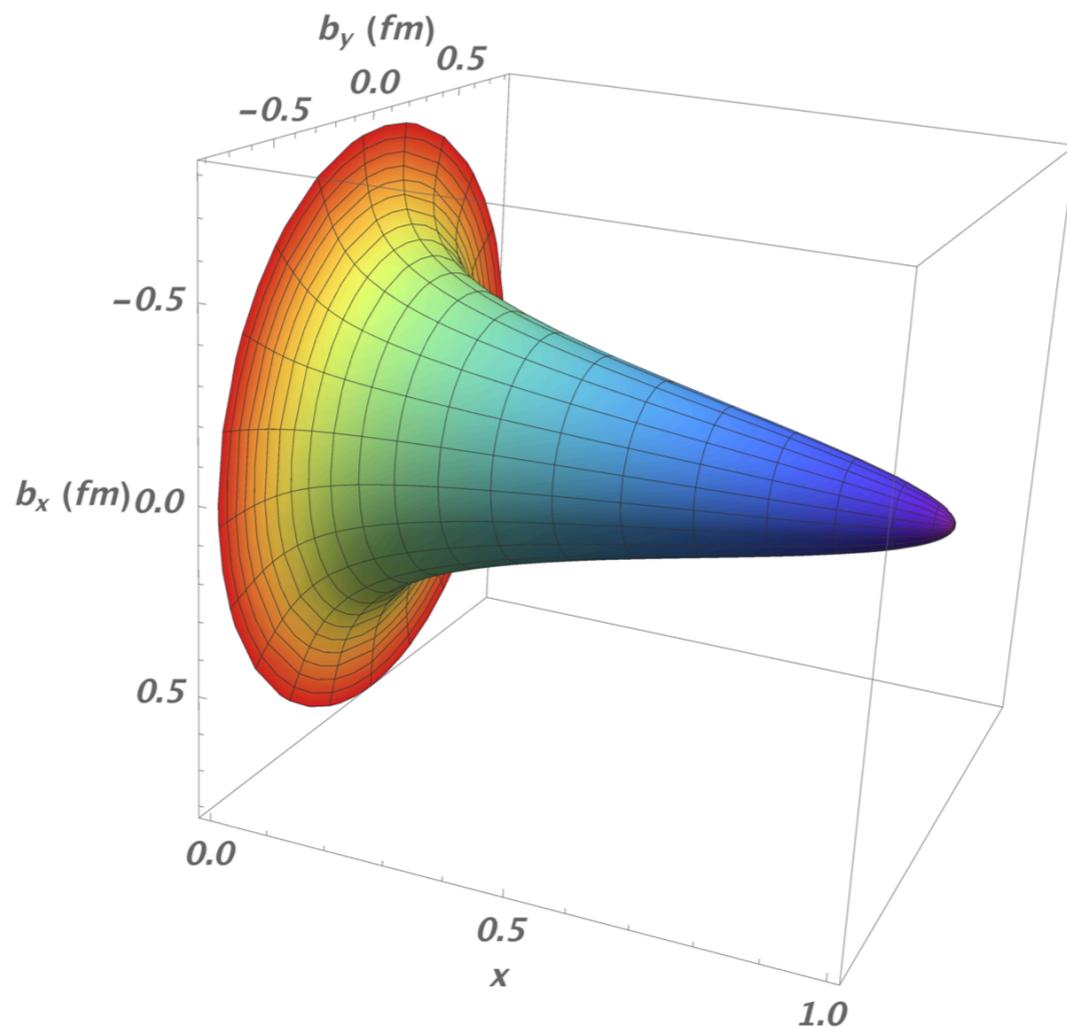
**“Трёхмерная”  
структура  
нуклона**



**Связь с  
орбитальным  
моментом**

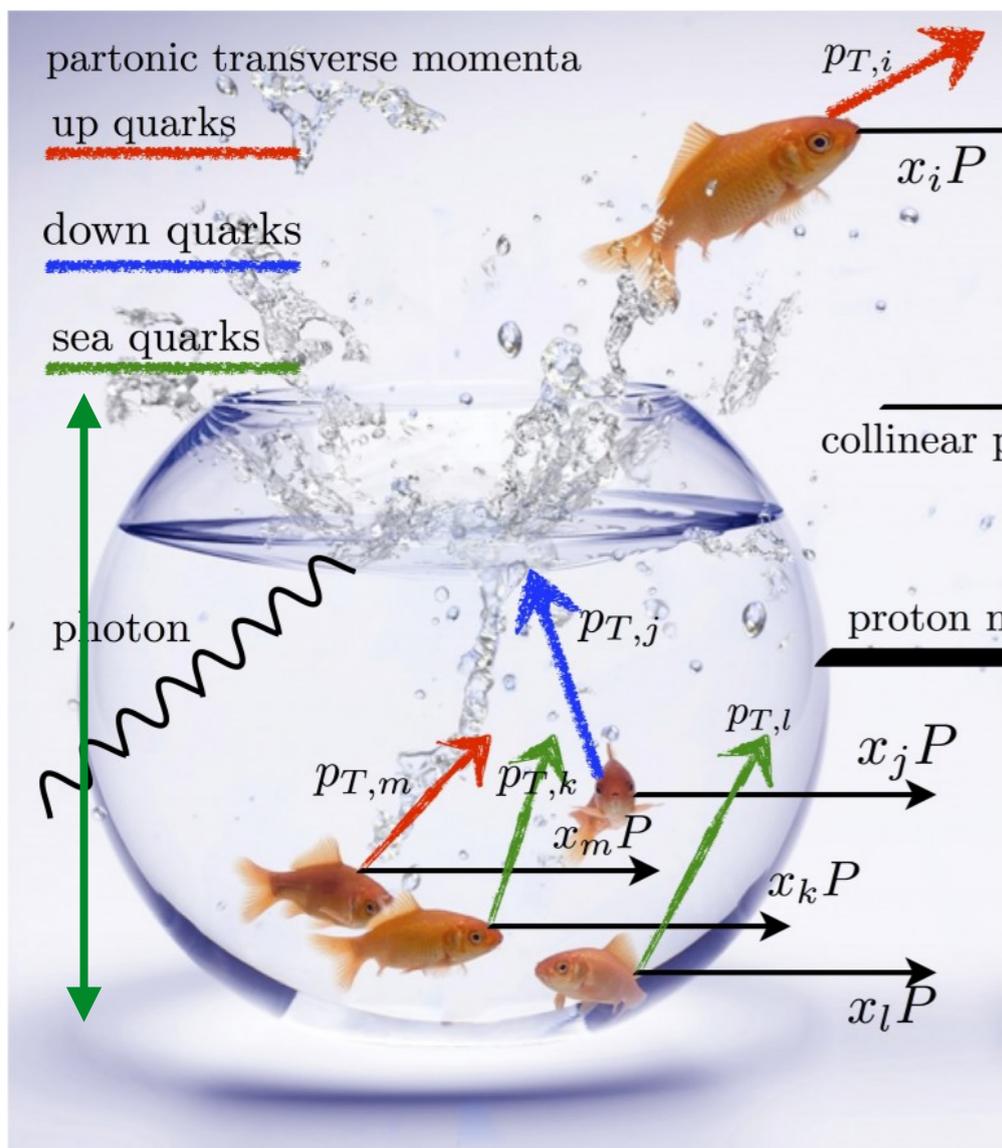
# Протон в 3D & GPD

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



Давление в протоне достигает  $10^{34}$  Па!

# А откуда поперечный импульс?



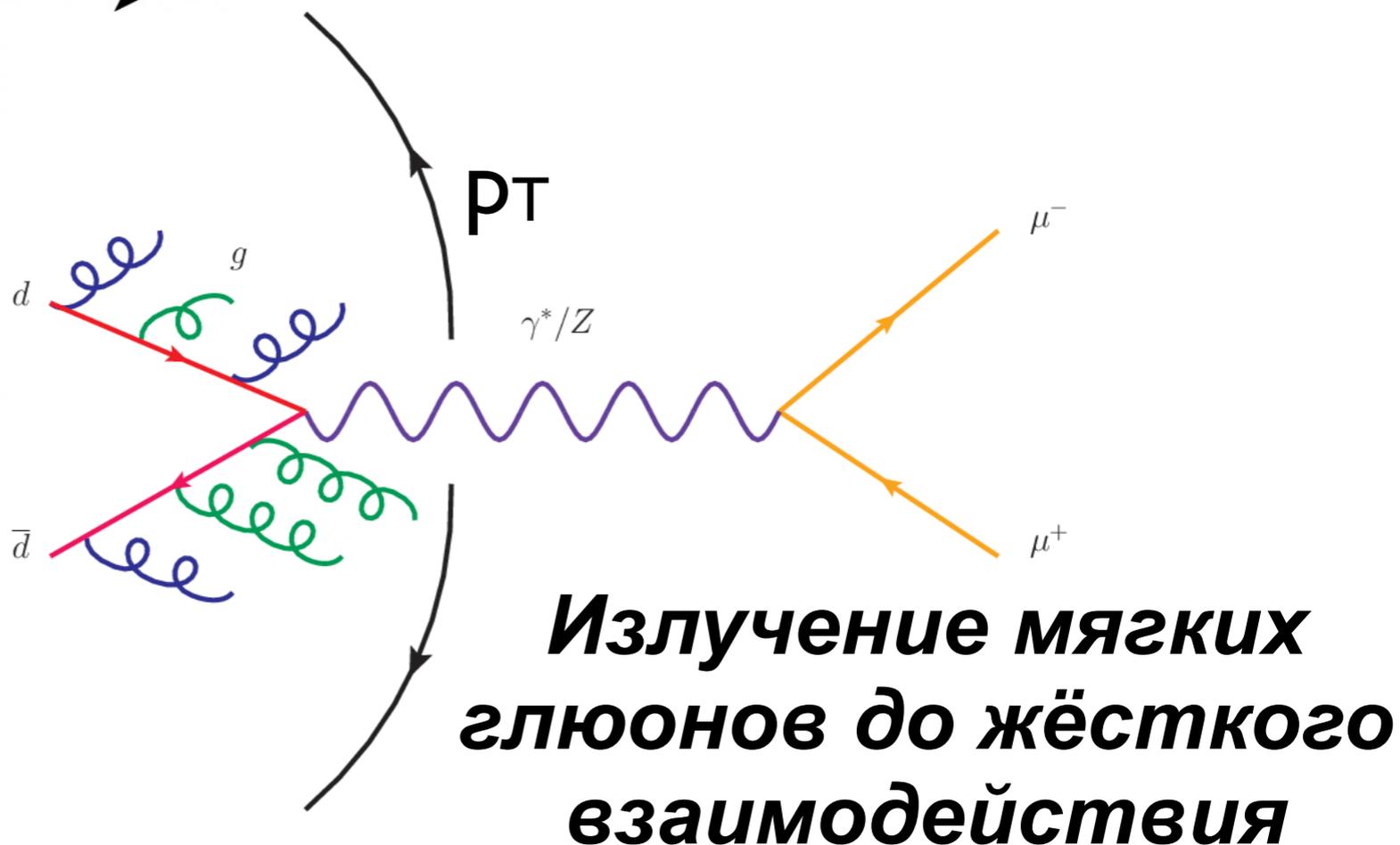
$\langle r_p \rangle = 0.88 \text{ фм}$

Соотношение неопределённостей:

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

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

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

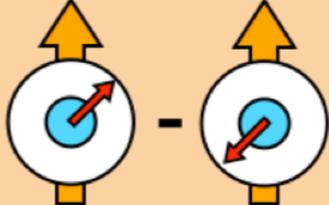
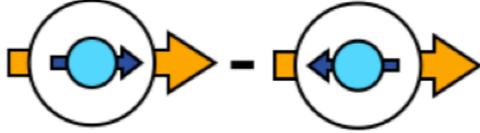
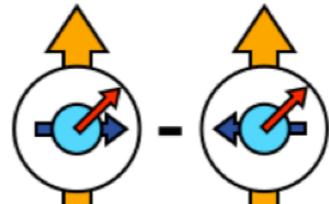
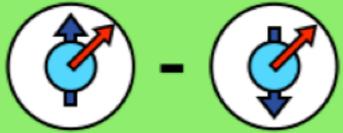
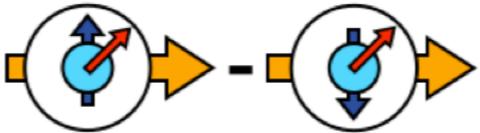
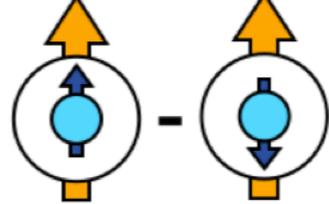
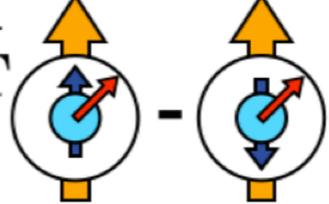


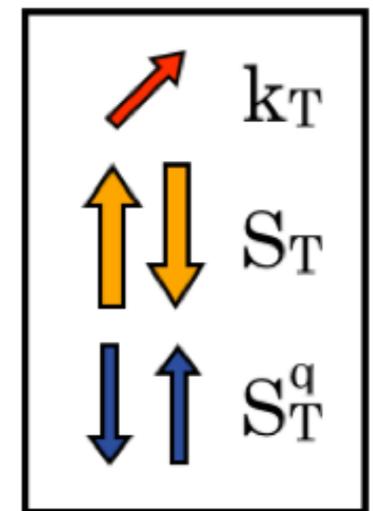
Излучение мягких глюонов до жёсткого взаимодействия

# TMD PDF

## Nucleon Spin Polarization

Quark Spin Polarization

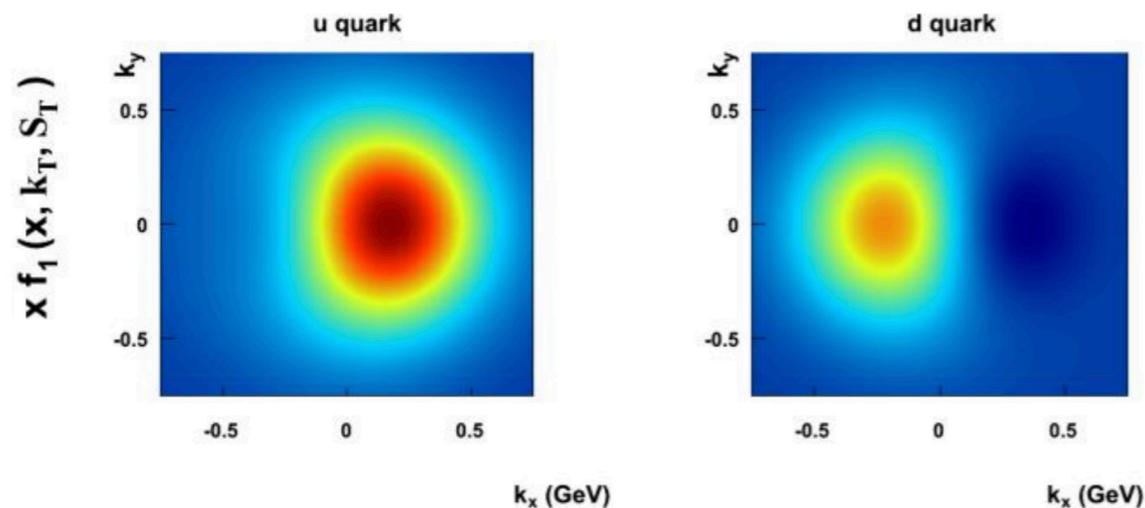
	U	L	T
U	$f_1$  Number Density		$f_{1T}^{q\perp}$  Sivers
L		$g_{1L}^q$  Helicity	$g_{1T}^q$  Worm-Gear T
T	$h_1^{q\perp}$  Boer-Mulders	$h_L^{q\perp}$  Worm-Gear L	$h_1^q$  Transversity $h_{1T}^{q\perp}$  Pretzelosity



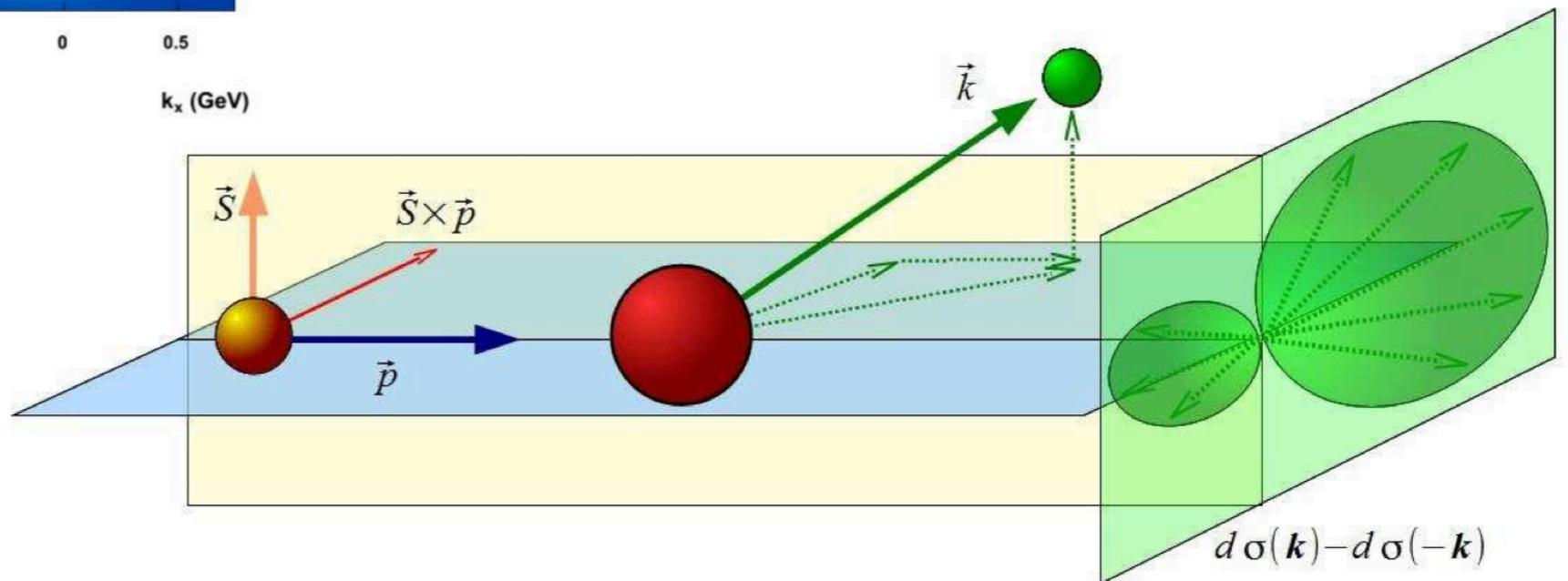
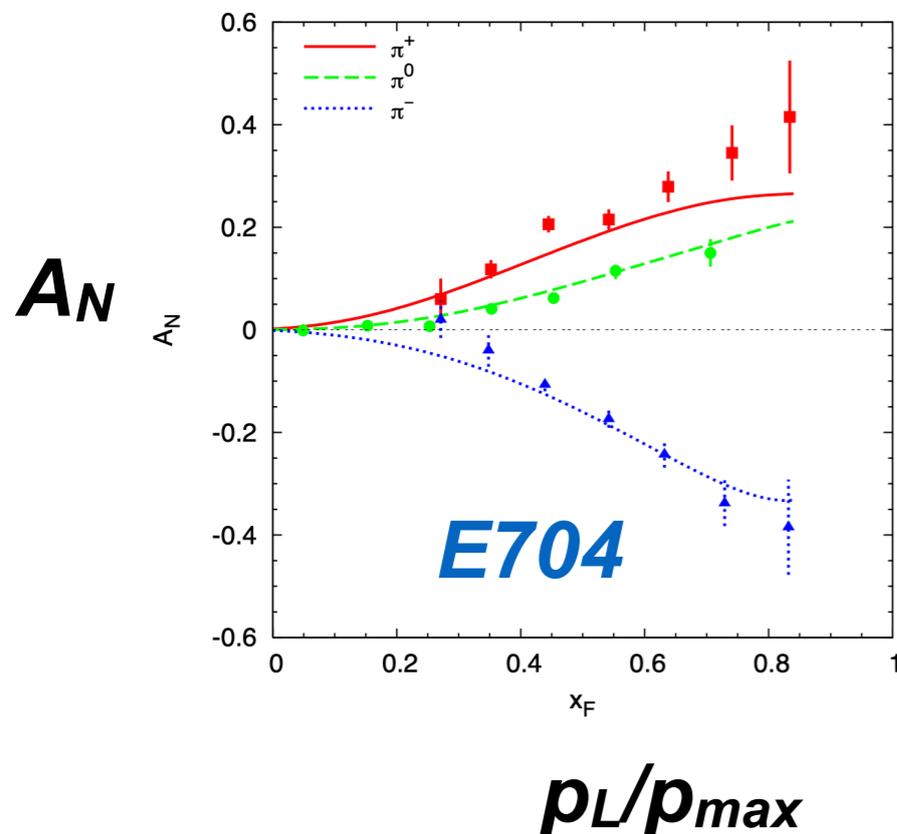
**5 новых (TMD) функций, описывающих корреляцию между спином нуклона, спином партона и поперечным импульсом партона.**

# Эффект Сиверса

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

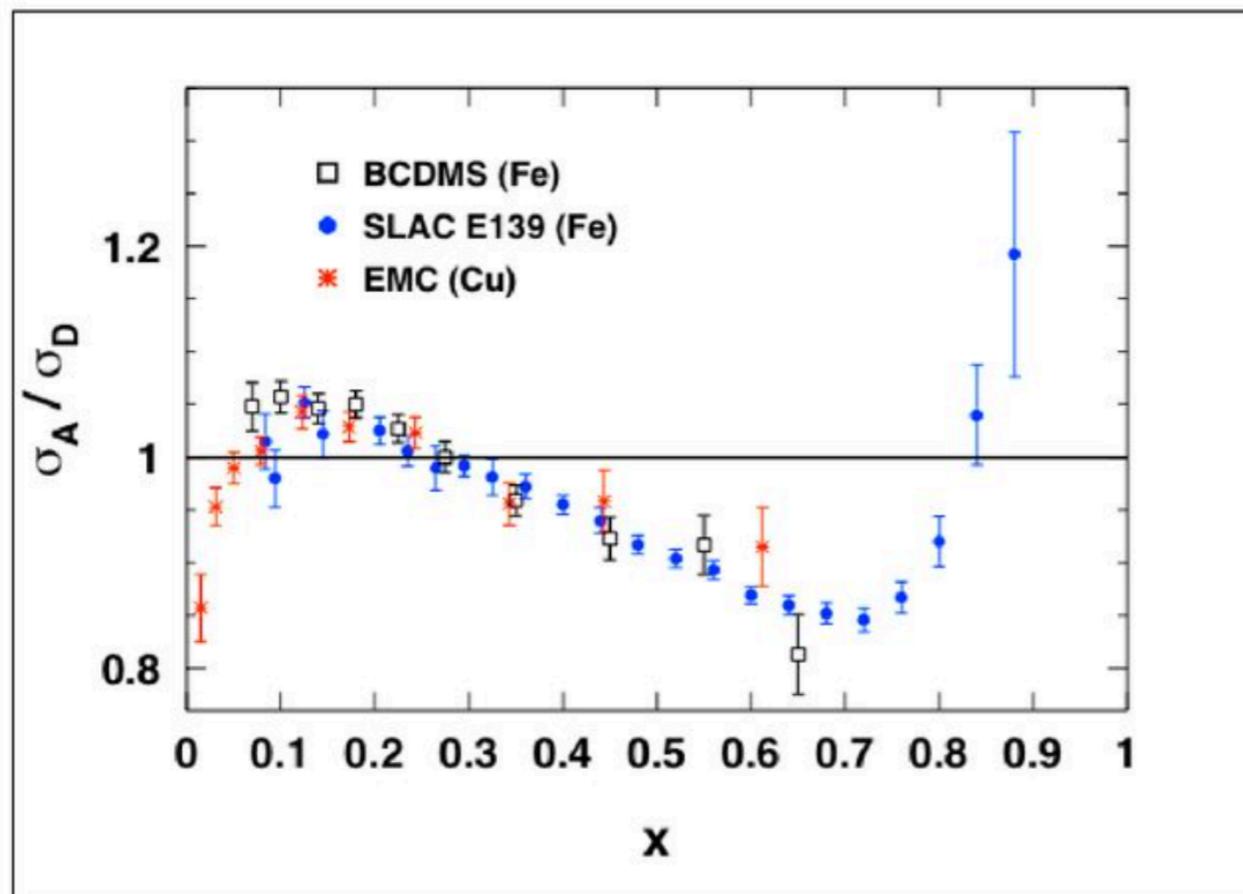


$$A_N = \frac{\sigma^\uparrow - \sigma^\downarrow}{\sigma^\uparrow + \sigma^\downarrow} \sim f_{Sivers}$$



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”

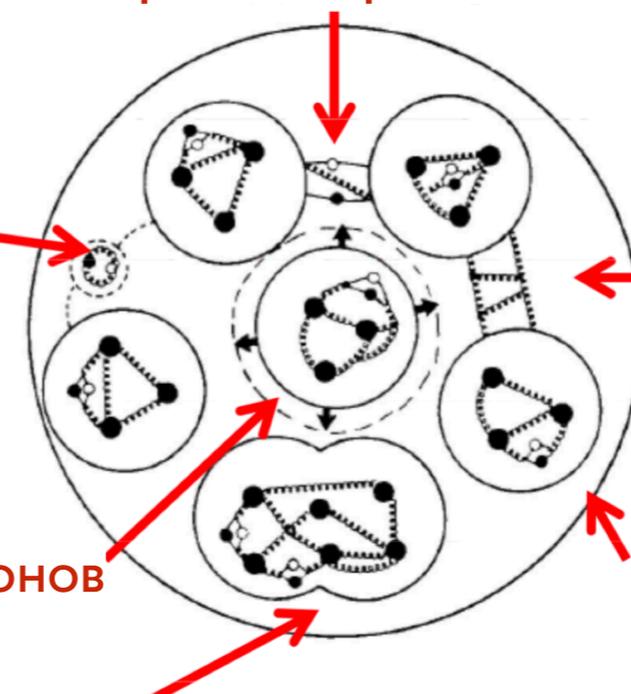
Пионный обмен

Глюонный обмен

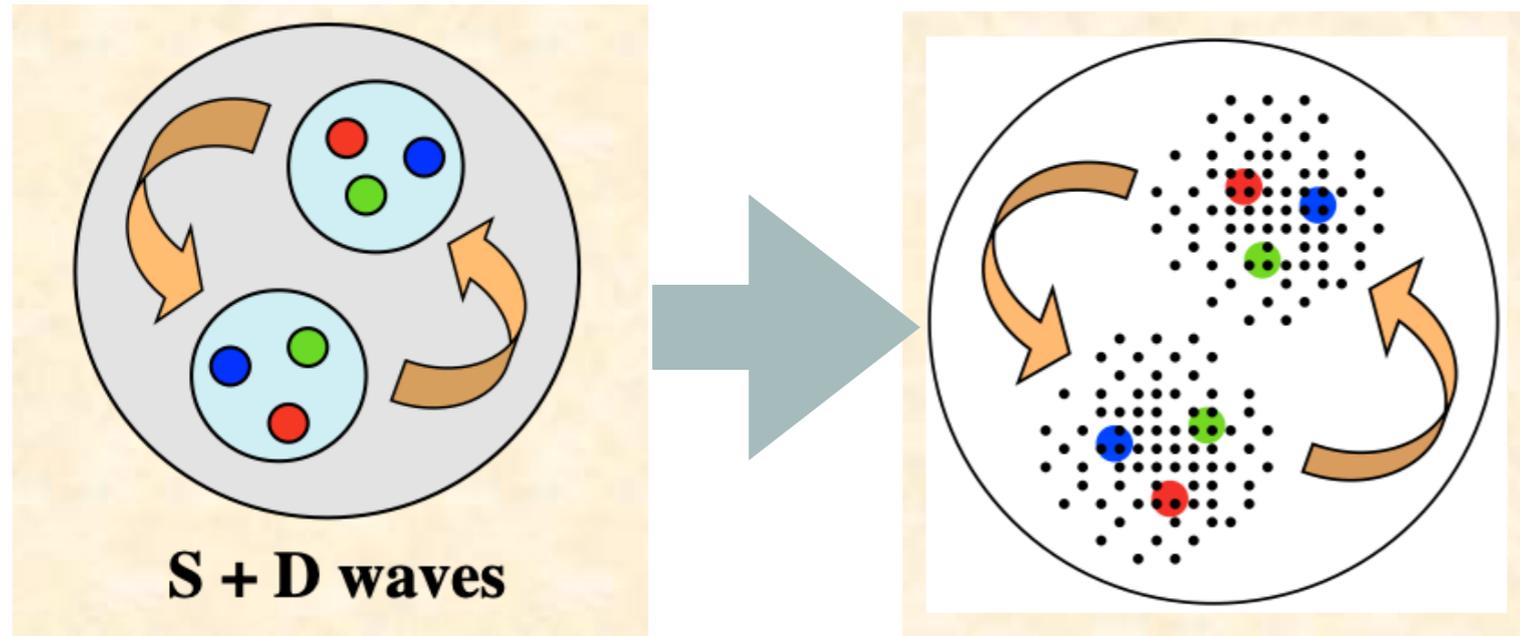
Раздувание нуклонов

Уменьшение массы  
нуклона

Мультикварковые  
мешки



# Дейтрон



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

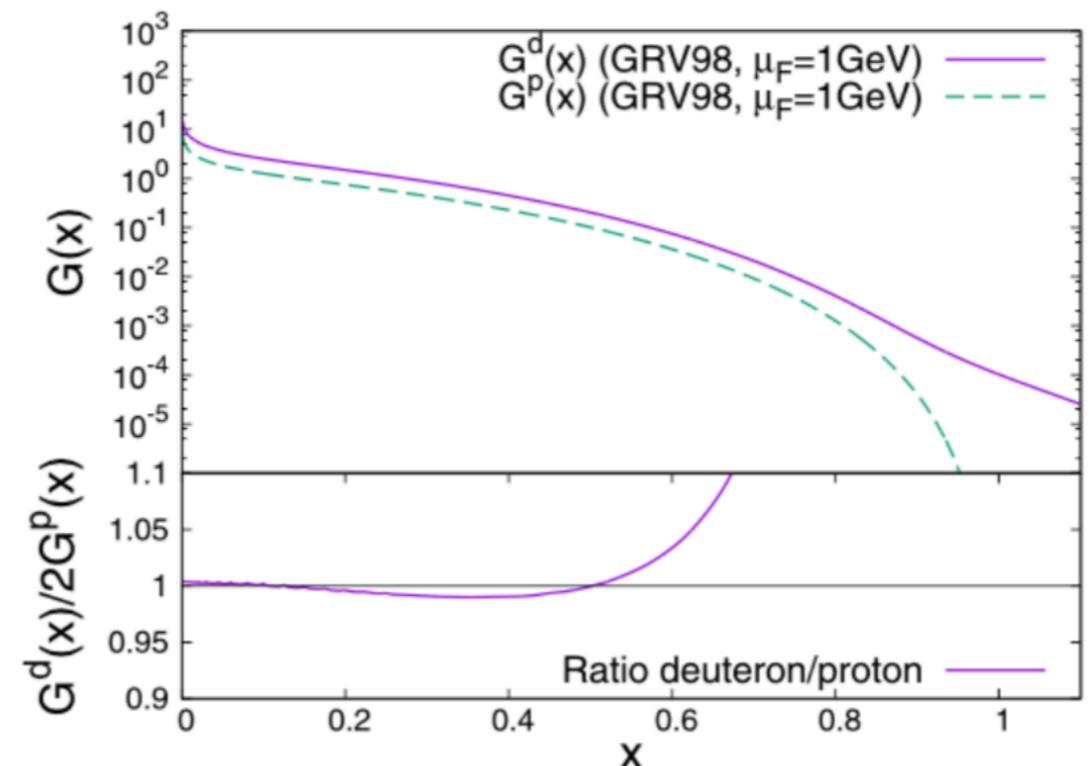
**Дейтрон - это не есть просто связанное состояние протона и нейтрона!**

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

скрытый цвет

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

Больше глюонов с большим значением  $x$



# SPD на NICA

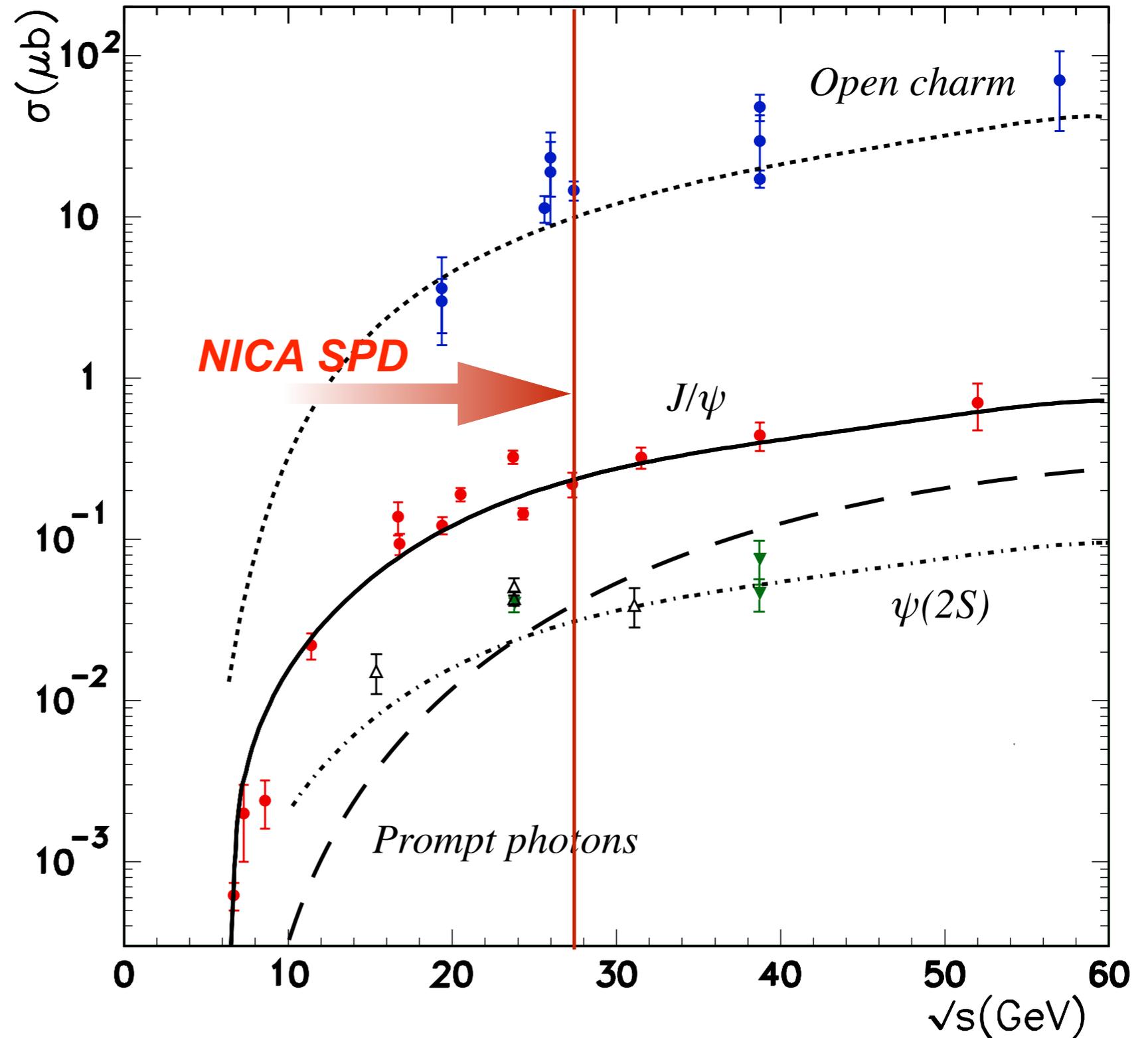
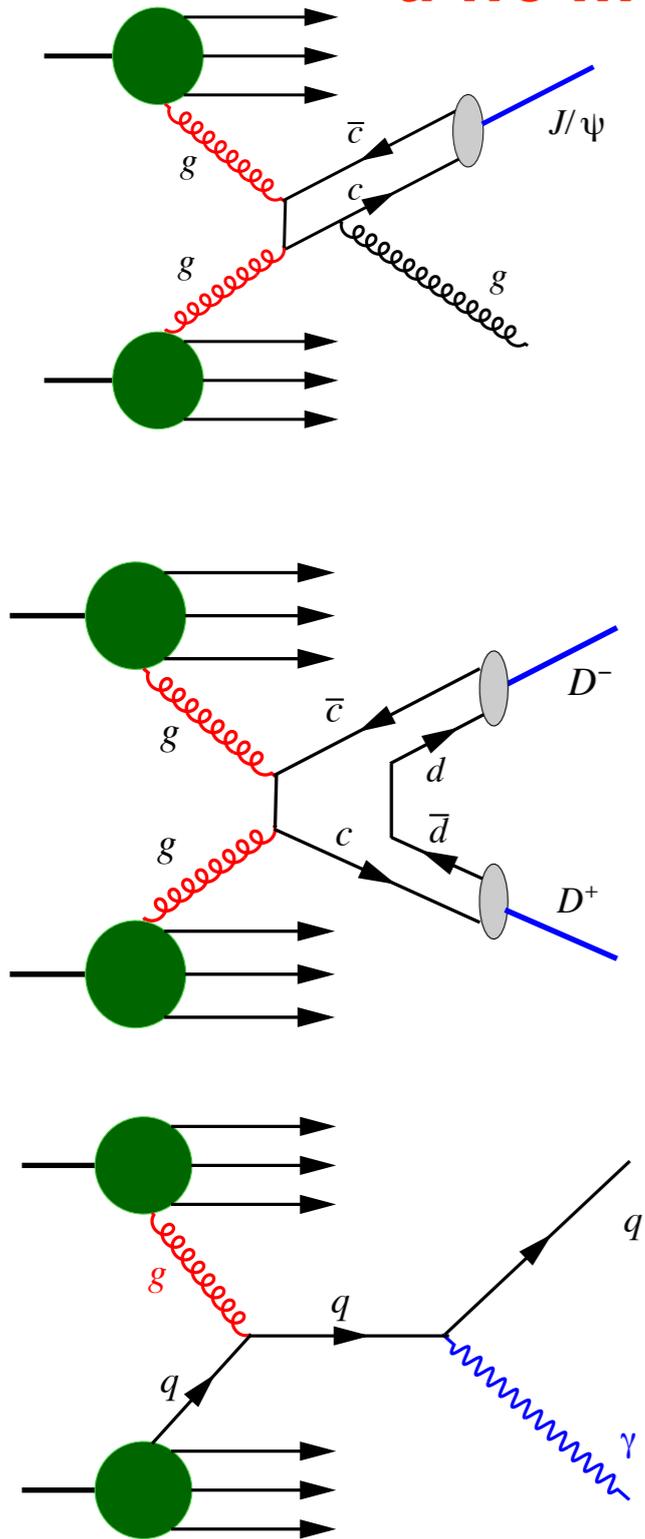


# *SPD at NICA*



# SPD - установка для комплексного изучения глюонной структуры нуклона

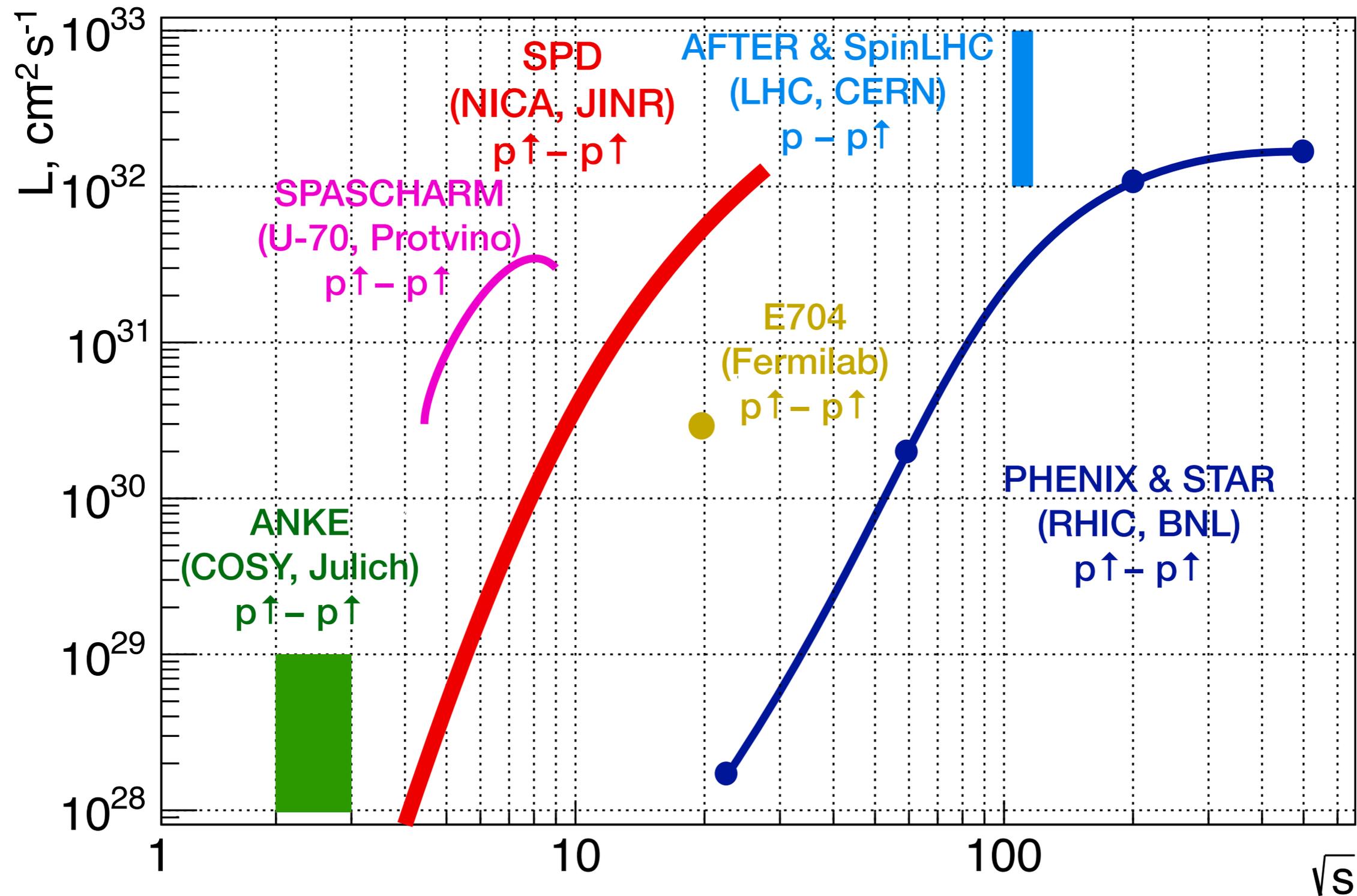
и не только  $J/\psi$ !



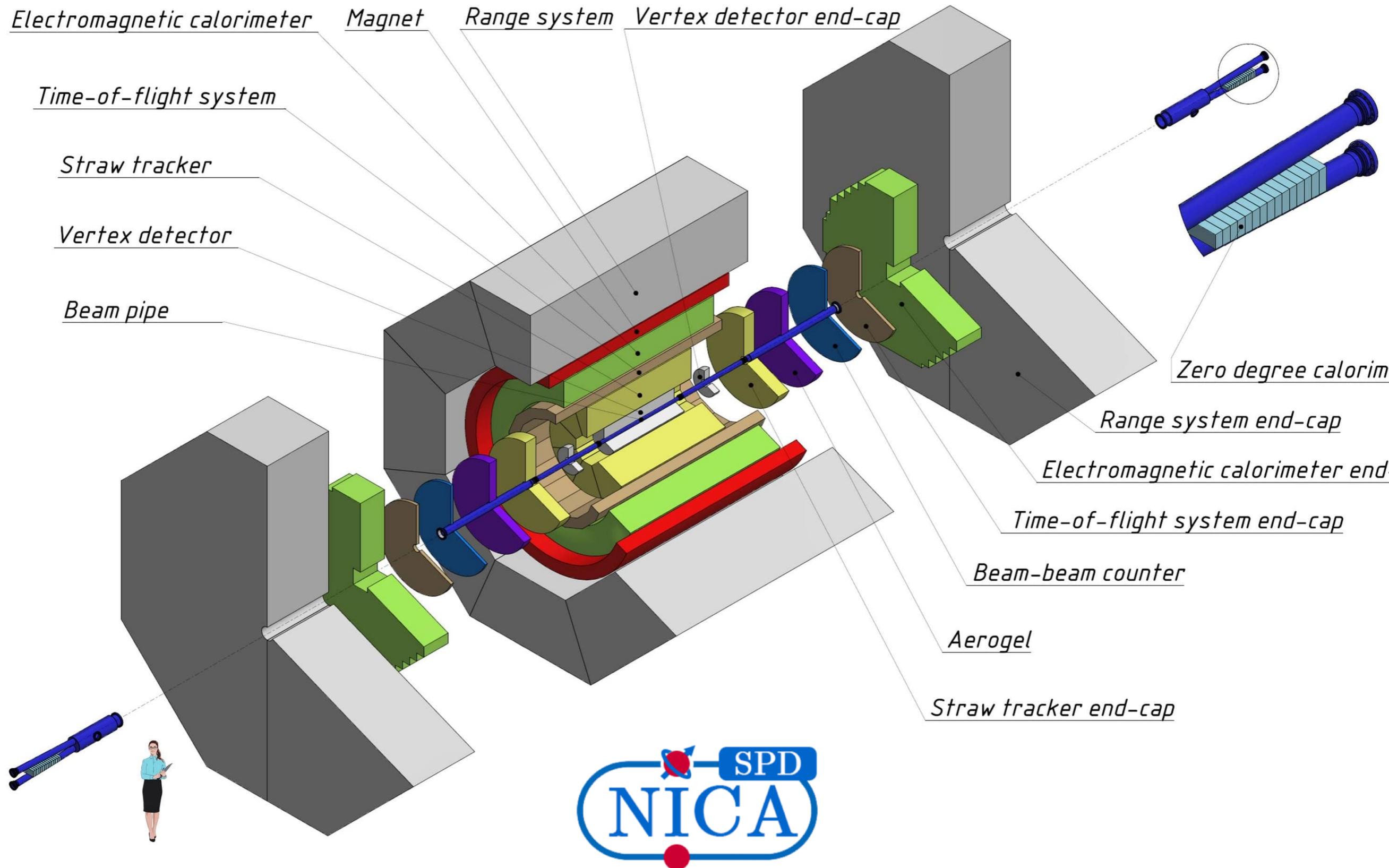
# А что в мире?

Experimental facility	SPD @NICA	RHIC	EIC	AFTER @LHC	SpinLHC
Scientific center	JINR	BNL	BNL	CERN	CERN
Operation mode	collider	collider	collider	fixed target	fixed target
Colliding particles & polarization	$p^\uparrow-p^\uparrow$ $d^\uparrow-d^\uparrow$ $p^\uparrow-d, p-d^\uparrow$	$p^\uparrow-p^\uparrow$	$e^\uparrow-p^\uparrow, d^\uparrow, {}^3\text{He}^\uparrow$	$p-p^\uparrow, d^\uparrow$	$p-p^\uparrow$
Center-of-mass energy $\sqrt{s_{NN}}$ , GeV	$\leq 27$ ( $p-p$ ) $\leq 13.5$ ( $d-d$ ) $\leq 19$ ( $p-d$ )	63, 200, 500	20-140 ( $ep$ )	115	115
Max. luminosity, $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\sim 1$ ( $p-p$ ) $\sim 0.1$ ( $d-d$ )	2	1000	up to $\sim 10$ ( $p-p$ )	4.7
Physics run	>2025	running	>2030	>2025	>2025

# А что в мире?



# Концепция детектора SPD



# Международная коллаборация SPD

32 институтов из 14 стран, ~300 участников

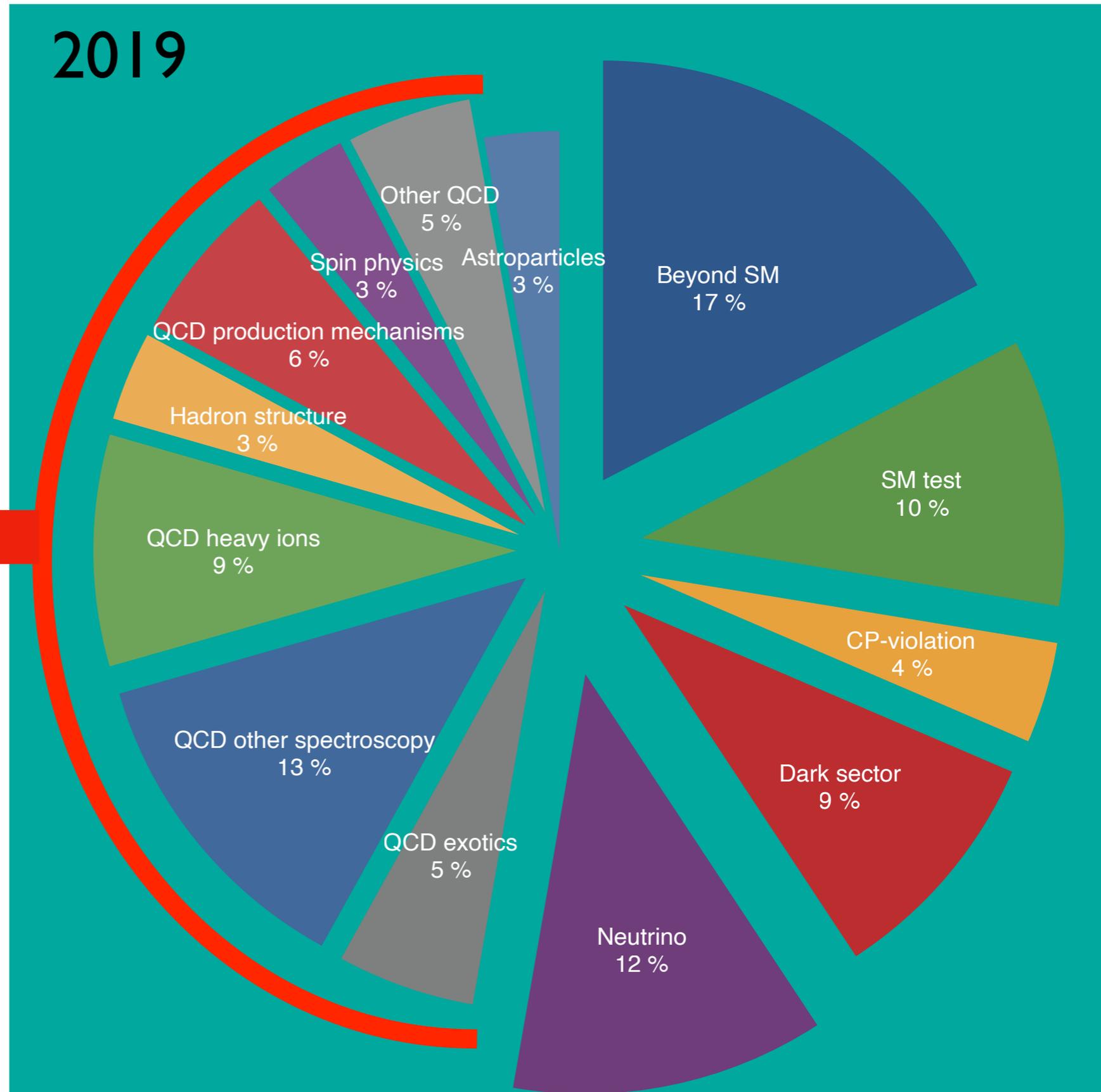
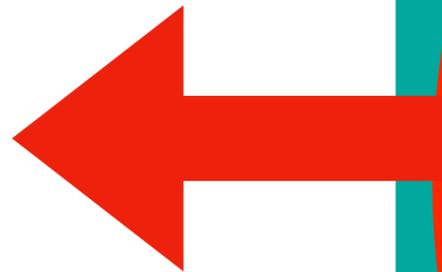


[spd.jinr.ru](http://spd.jinr.ru)

# Физика частиц по разделам

2019

**QCD**  
**44%**



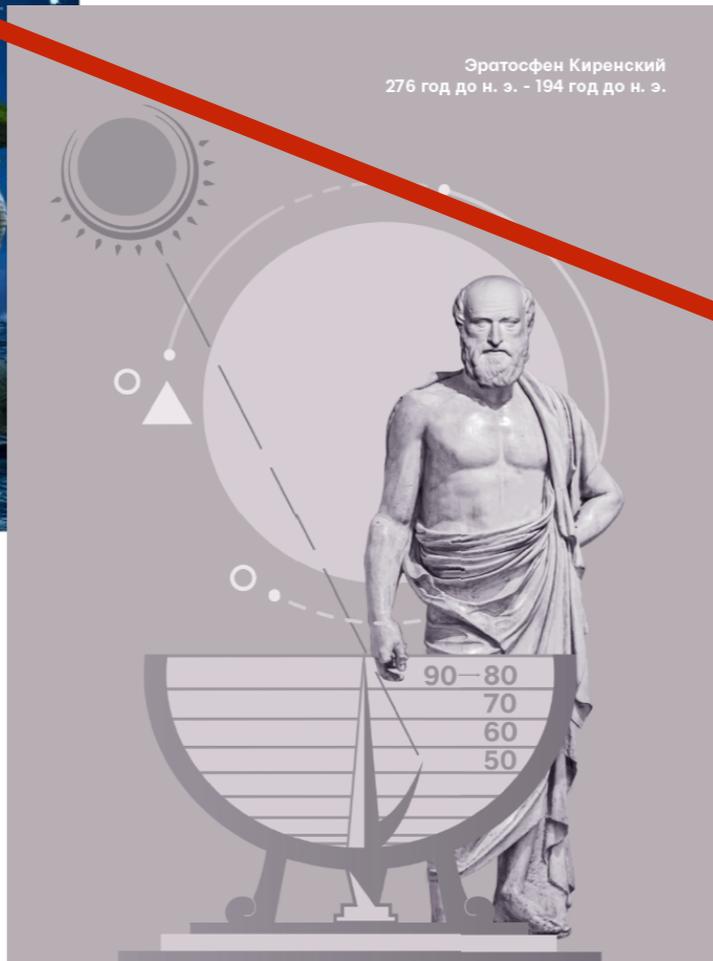
На основе  
публикаций в [arXive](#)

# 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**