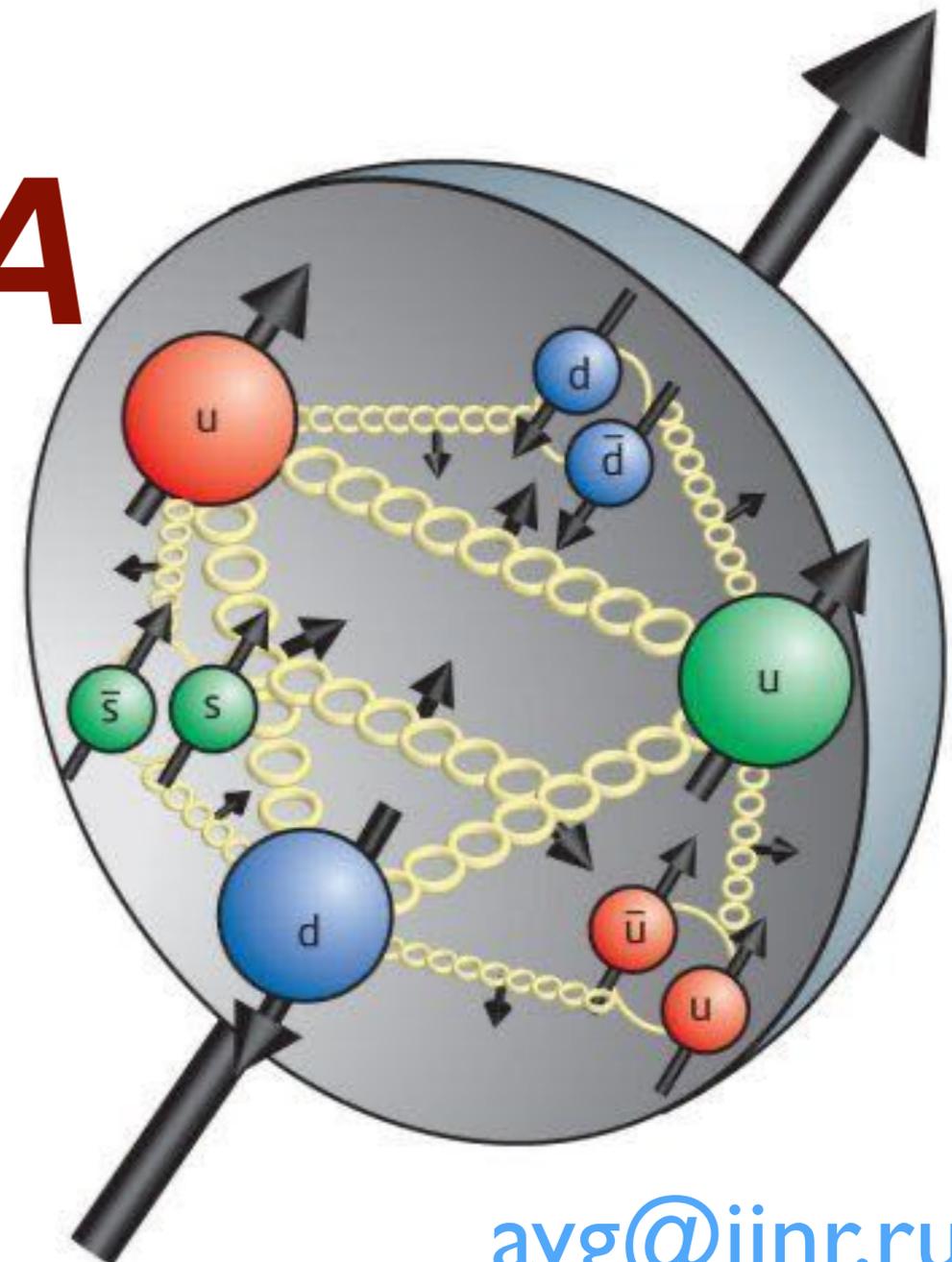


Структура нуклона и коллайдер NICA

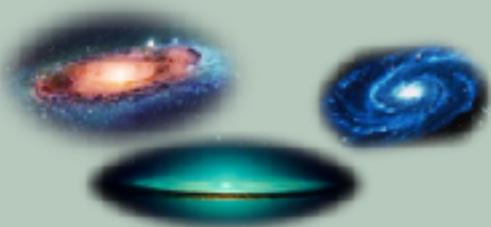
А. В. Гуськов
ЛЯП ОИЯИ



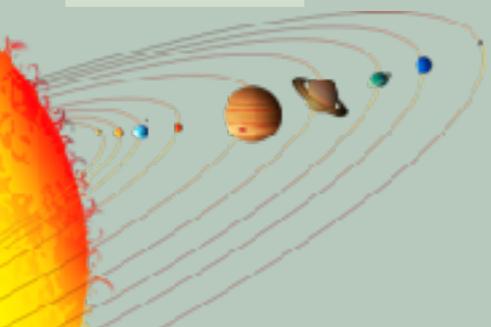
avg@jinr.ru

Адроны

Звёздные системы

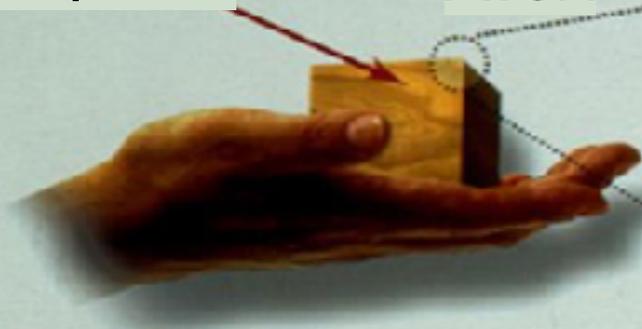


Планеты, планетные системы

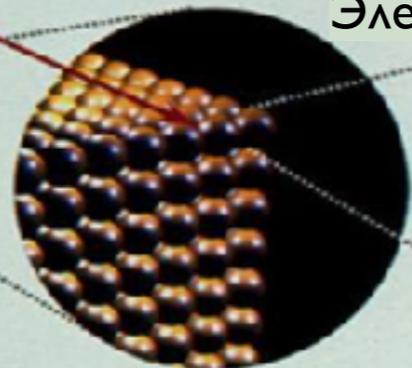


Тип взаимодействия	Источник	Переносчик	Константа взаимодействия	Радиус действия, м
Гравитационное	Масса	Гравитон(?)	10^{-38}	∞
Электромагнитное	Электрический заряд	Фотон	0.01	∞
Сильное	Цветовой заряд	Глюоны	1	10^{-15}
Слабое	Слабый изоспин, слабый гиперзаряд	W^{\pm}, Z^0 бозоны	10^{-5}	10^{-18}

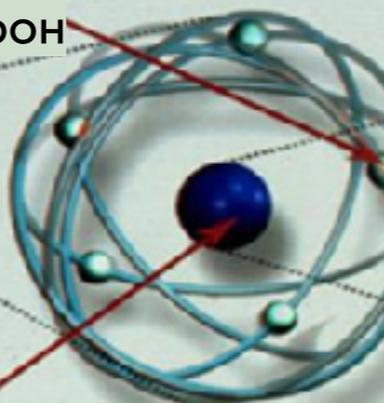
Вещество



Атом

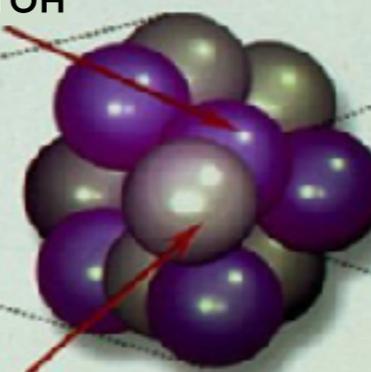


Электрон

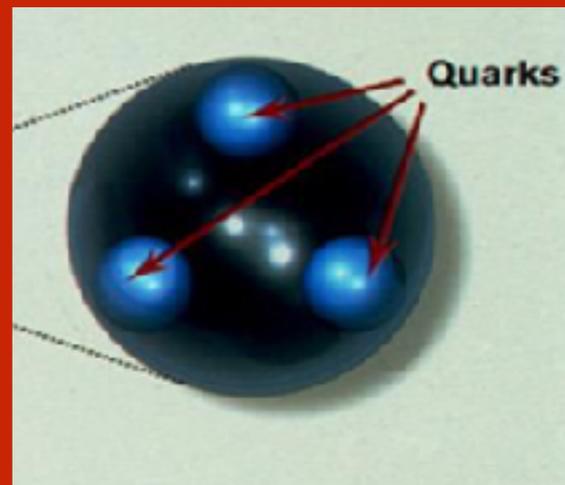


Ядро

Протон

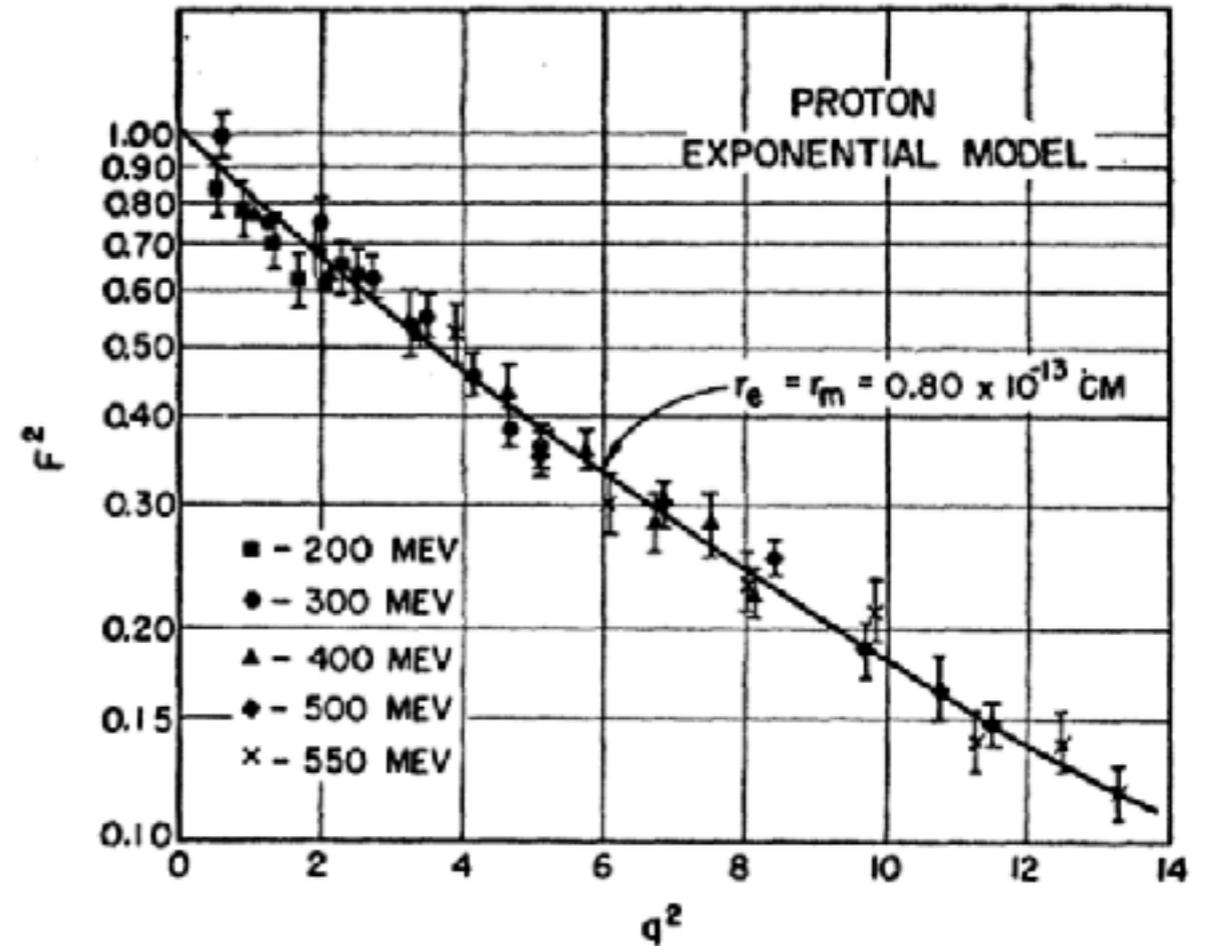
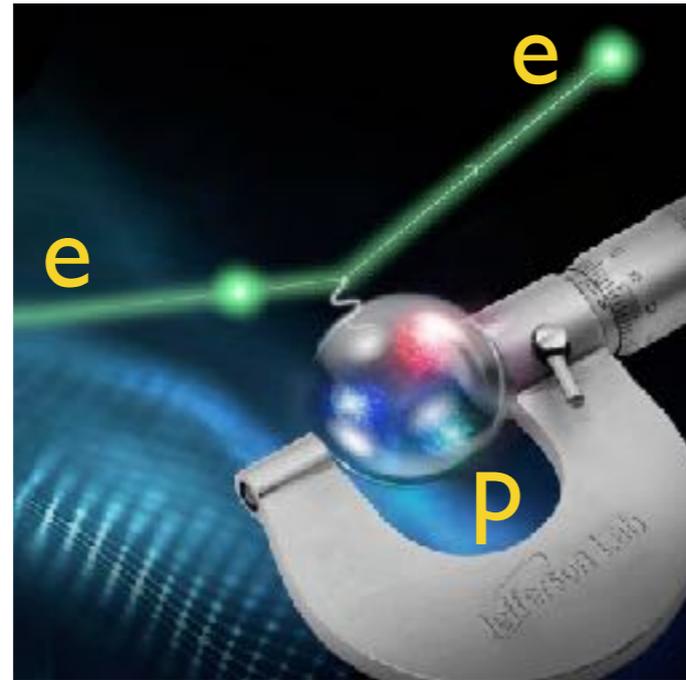


Нейтрон



Quarks

Размер протона

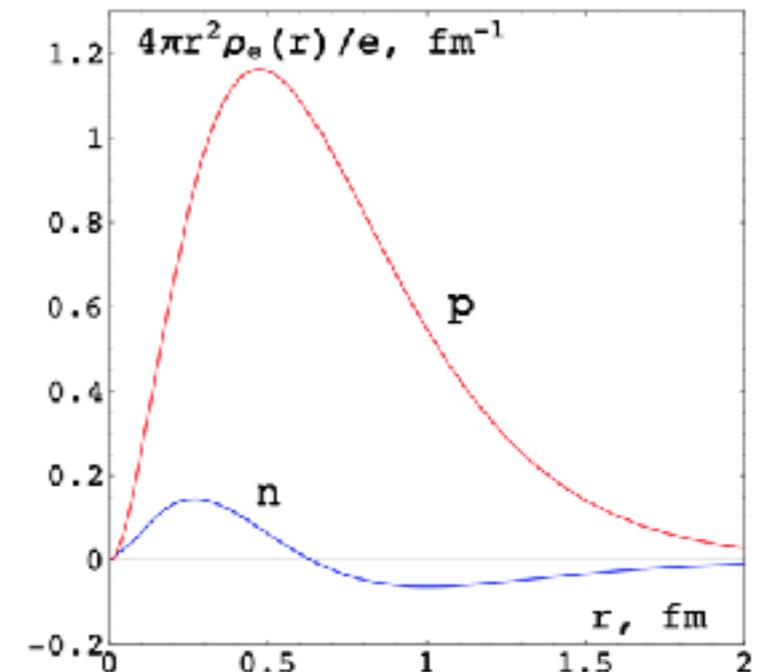


**Р. Хофштадтер -
нобелевская премия 1961 г.**

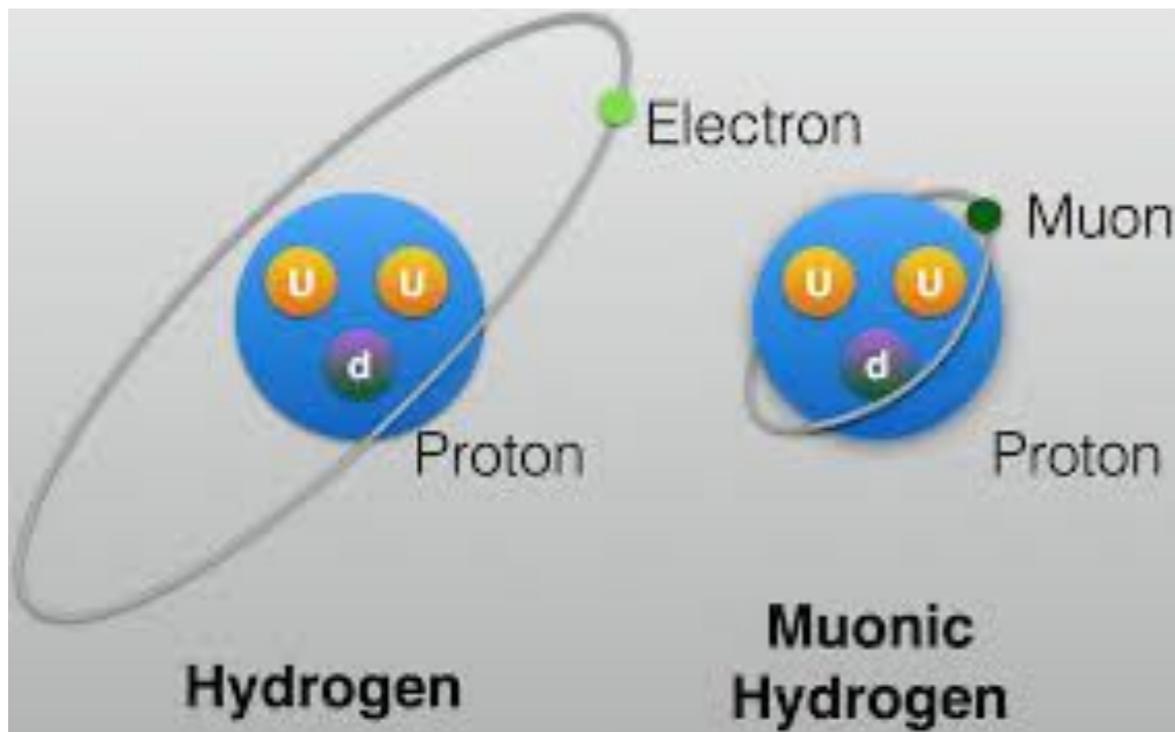
формфактор

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

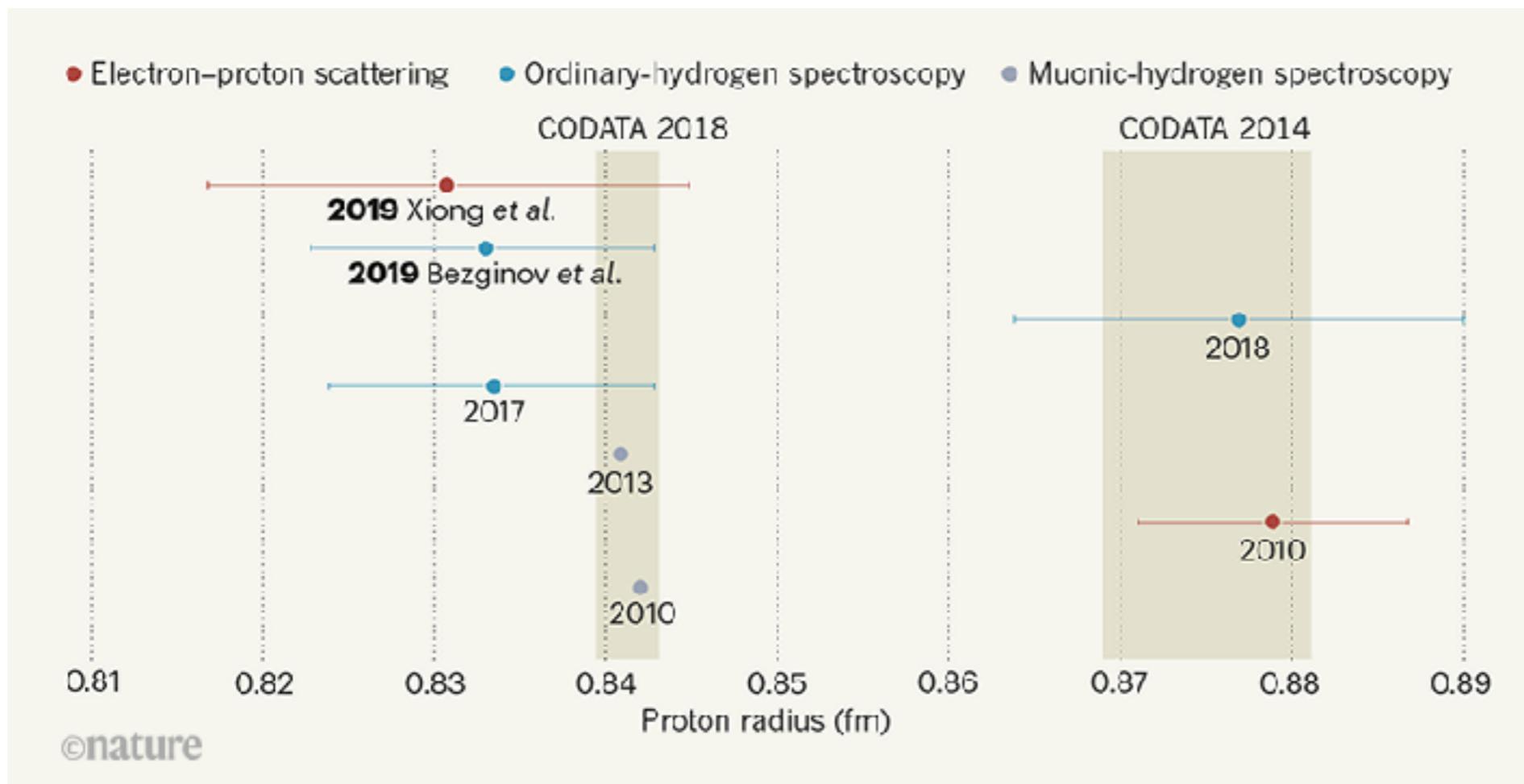
$$F(q^2) \approx 1 - \frac{q^2 \langle r^2 \rangle}{6\hbar^2} \quad \text{среднеквадратичный электрический радиус}$$



Радиус протона



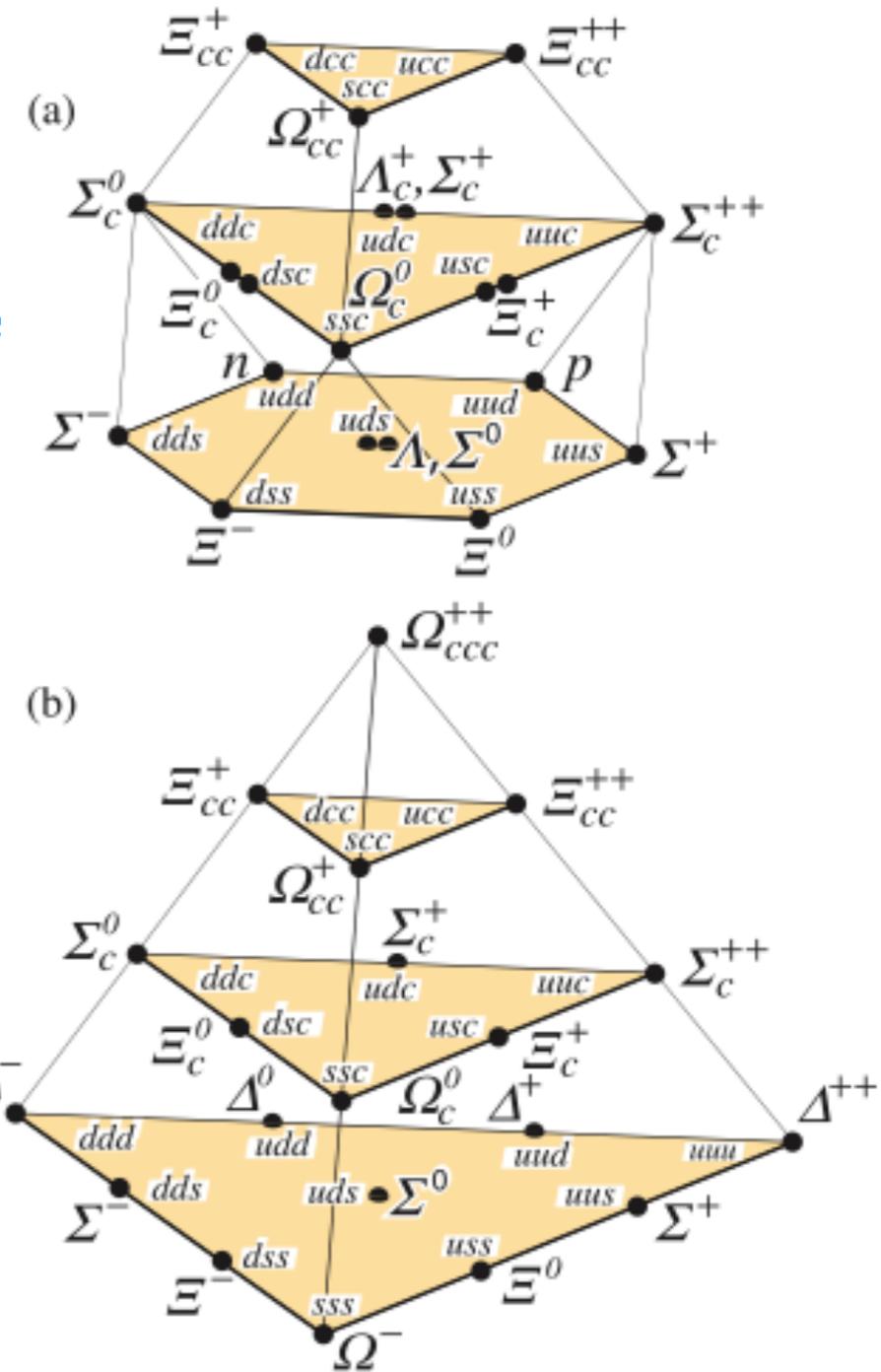
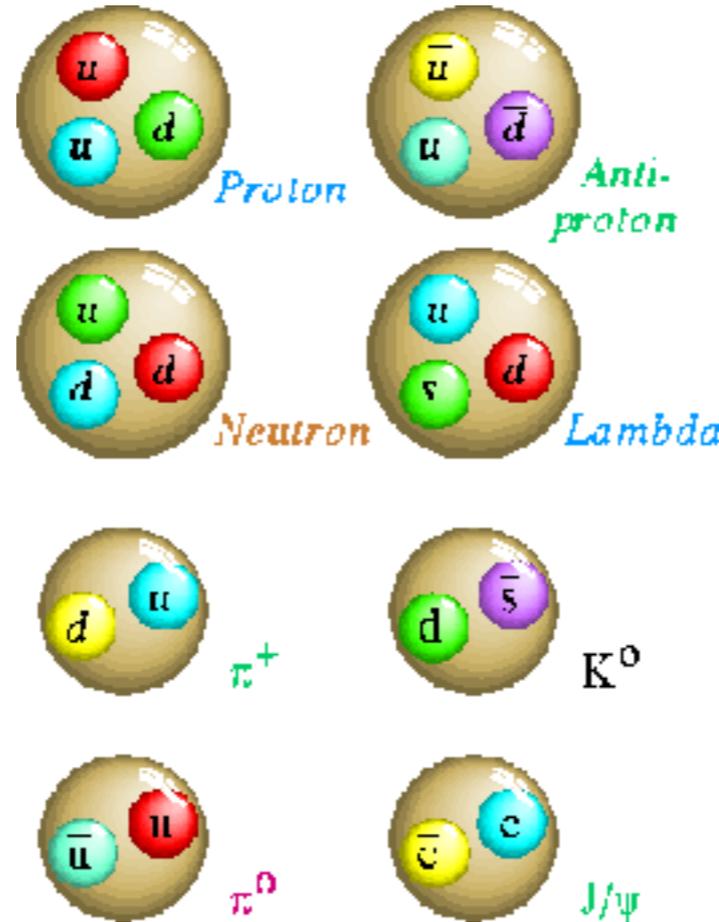
Загадка радиуса протона: разные методы дают разные результаты



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



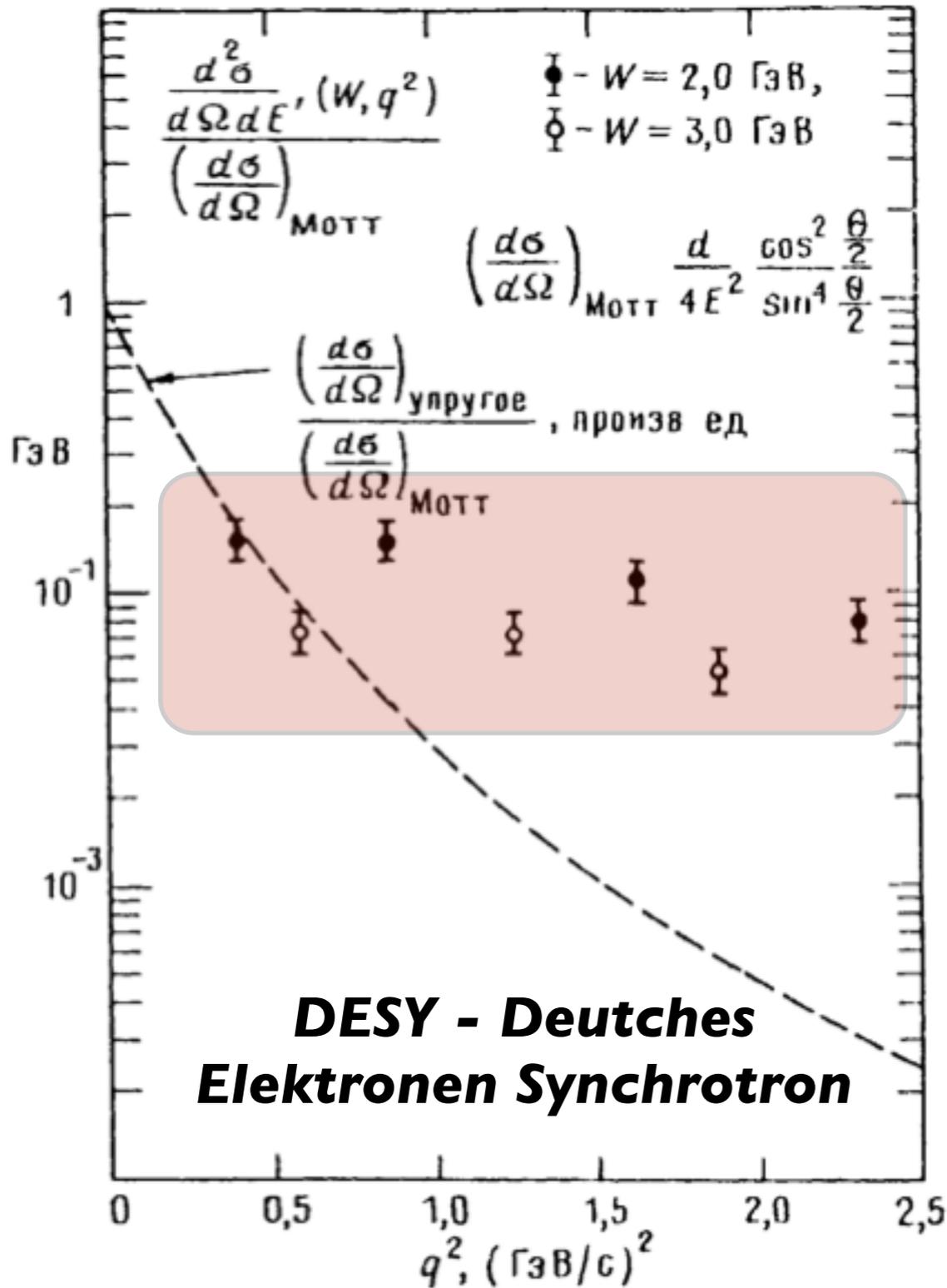
1964 год

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

Партоны

Внутри нуклона есть
точечные объекты -
партоны

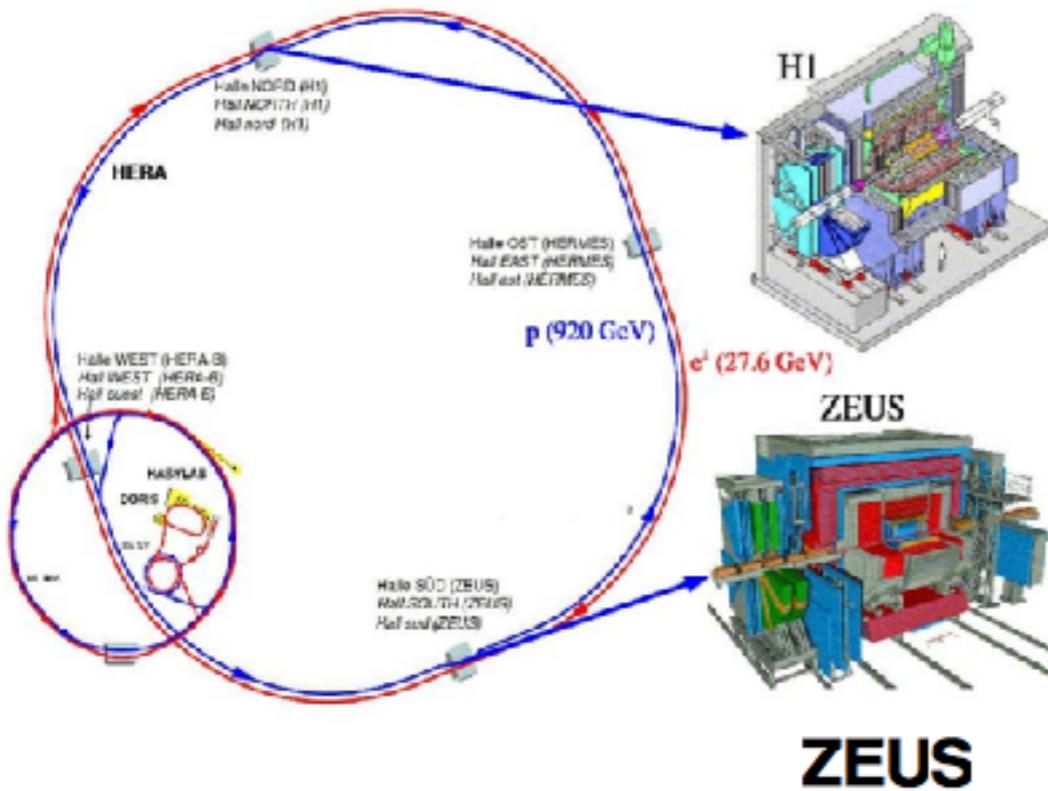
Партонная модель - 1969 г



Р. Фейнман

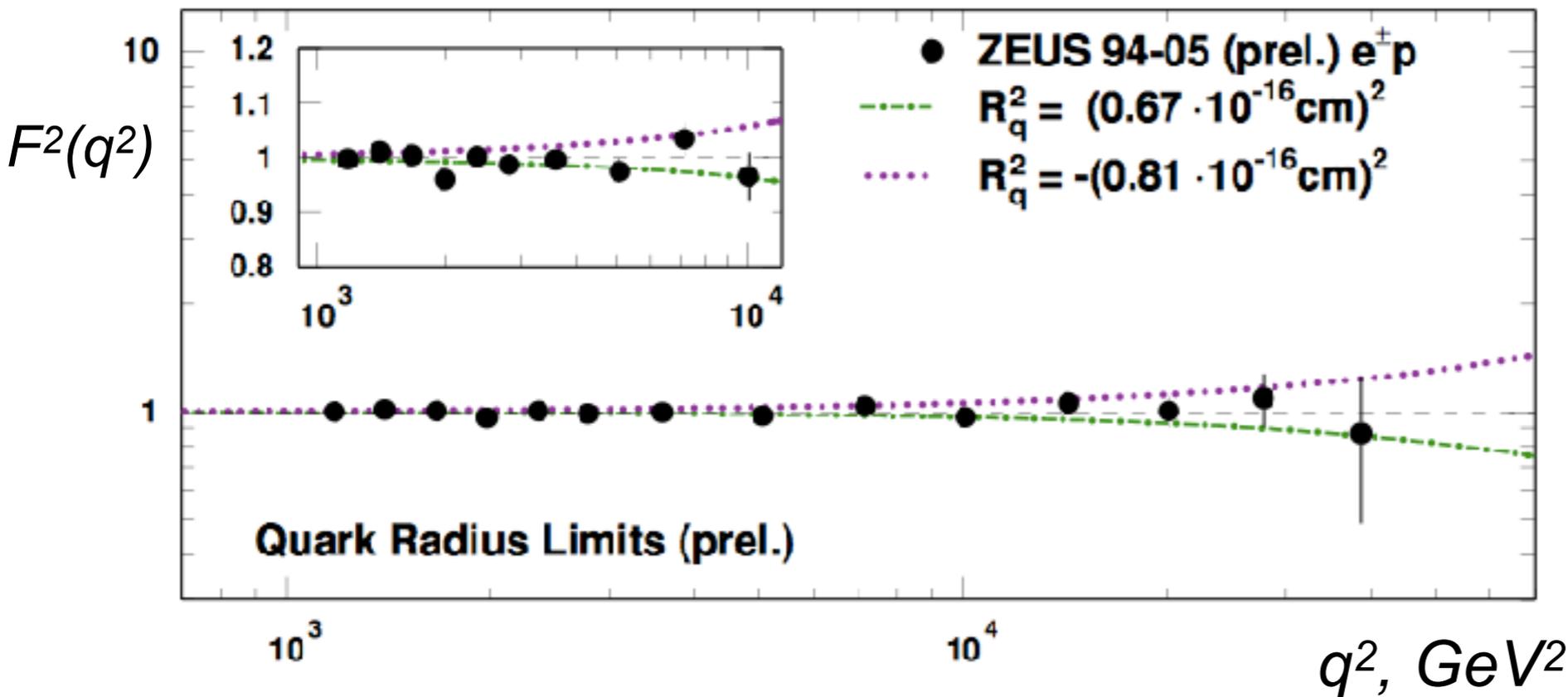
В начале 70х партоны были
отождествлены с кварками

Размер кварков



HERA - электрон-протонный коллайдер в DESY

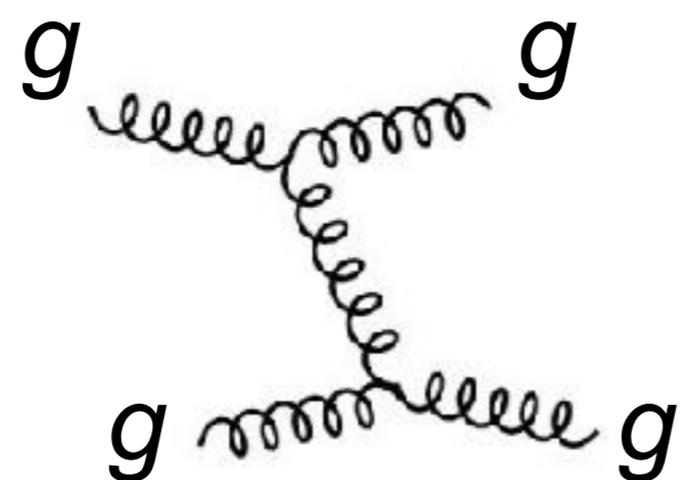
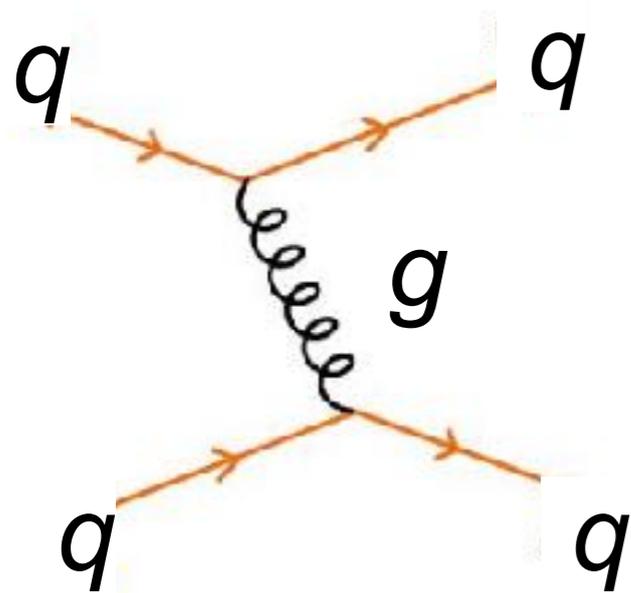
Пока нет никаких указаний на то, что кварки имеют внутреннюю структуру



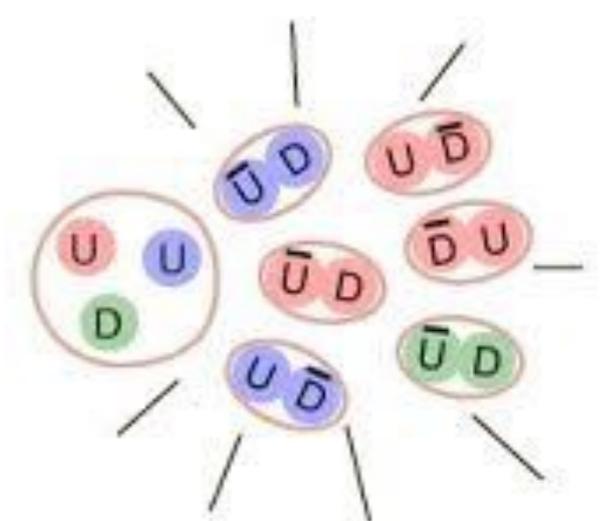
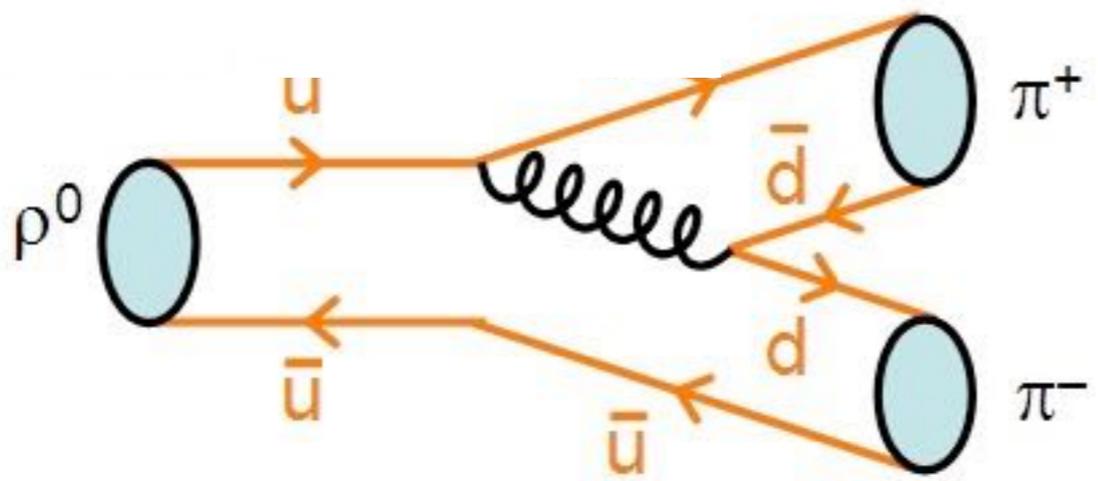
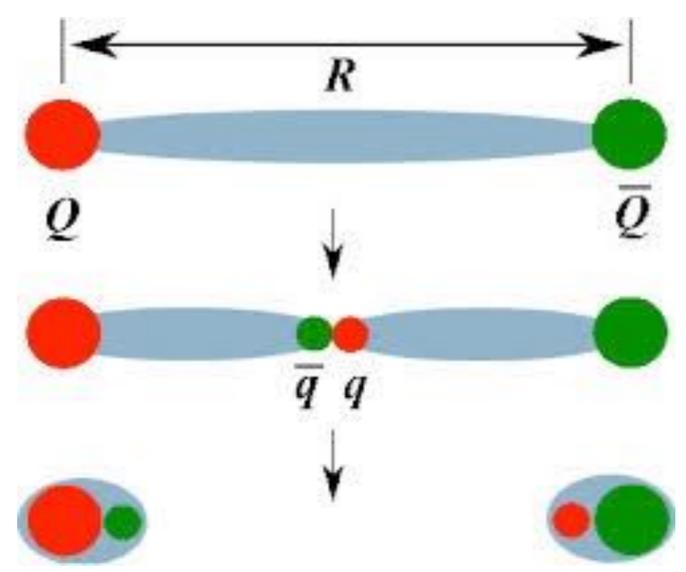
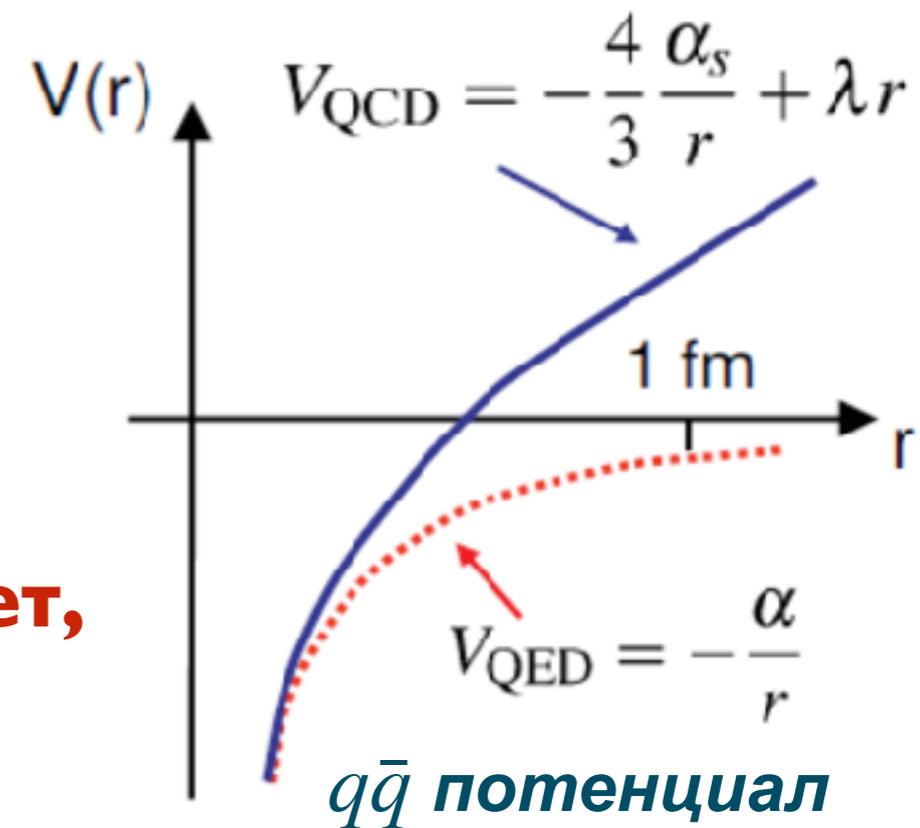
$$F(q^2) \approx 1 - \frac{q^2 \langle r_q^2 \rangle}{6\hbar^2}$$

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

Квантовая хромодинамика



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



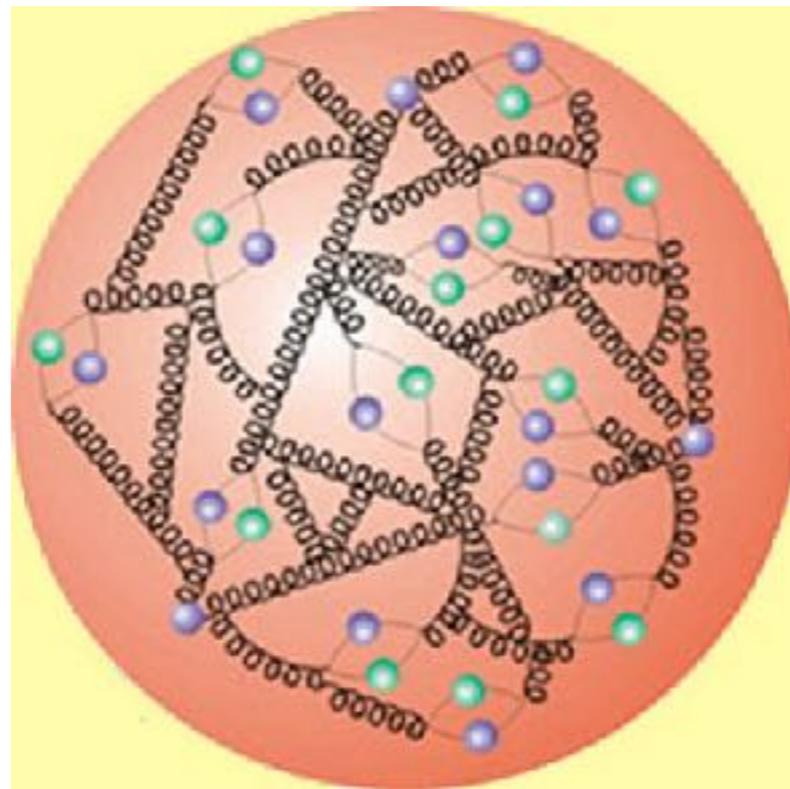
Конфайнмент при больших но асимптотическая свобода на масштабе ~1 фм

КХД - основные направления

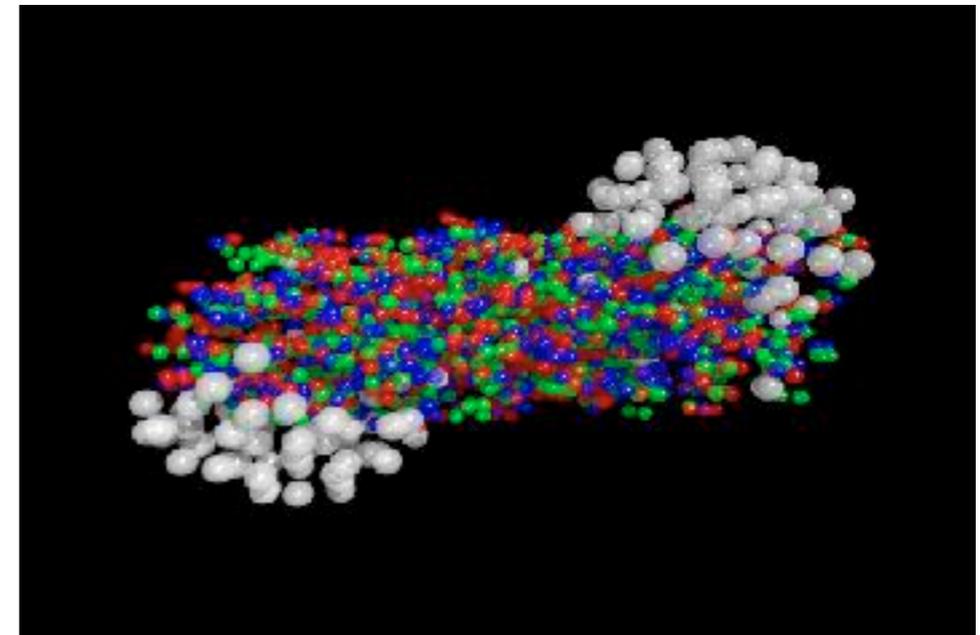
Спектроскопия
адронов



Структура
адронов



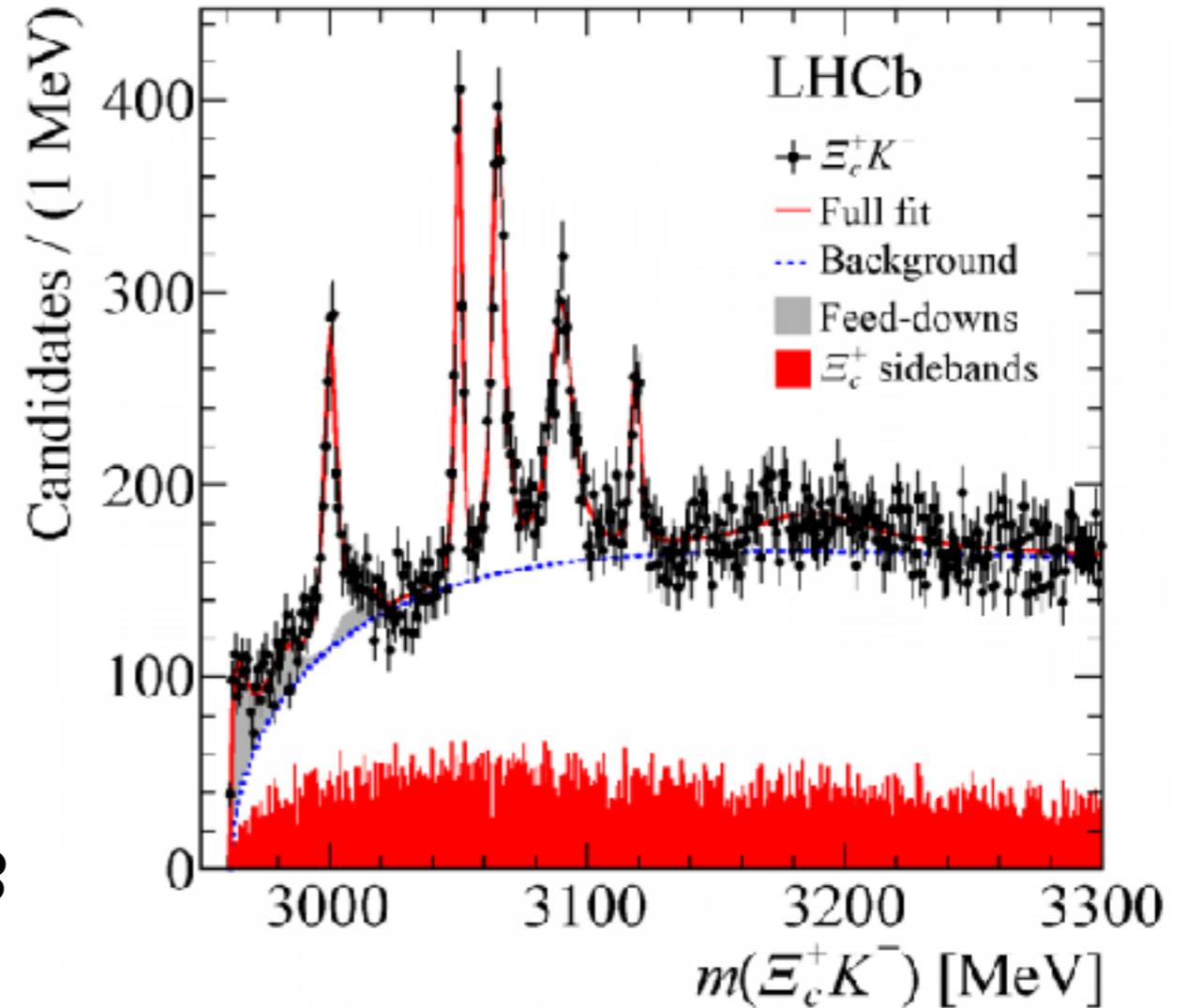
Адронная
материя в
экстремальных
условиях



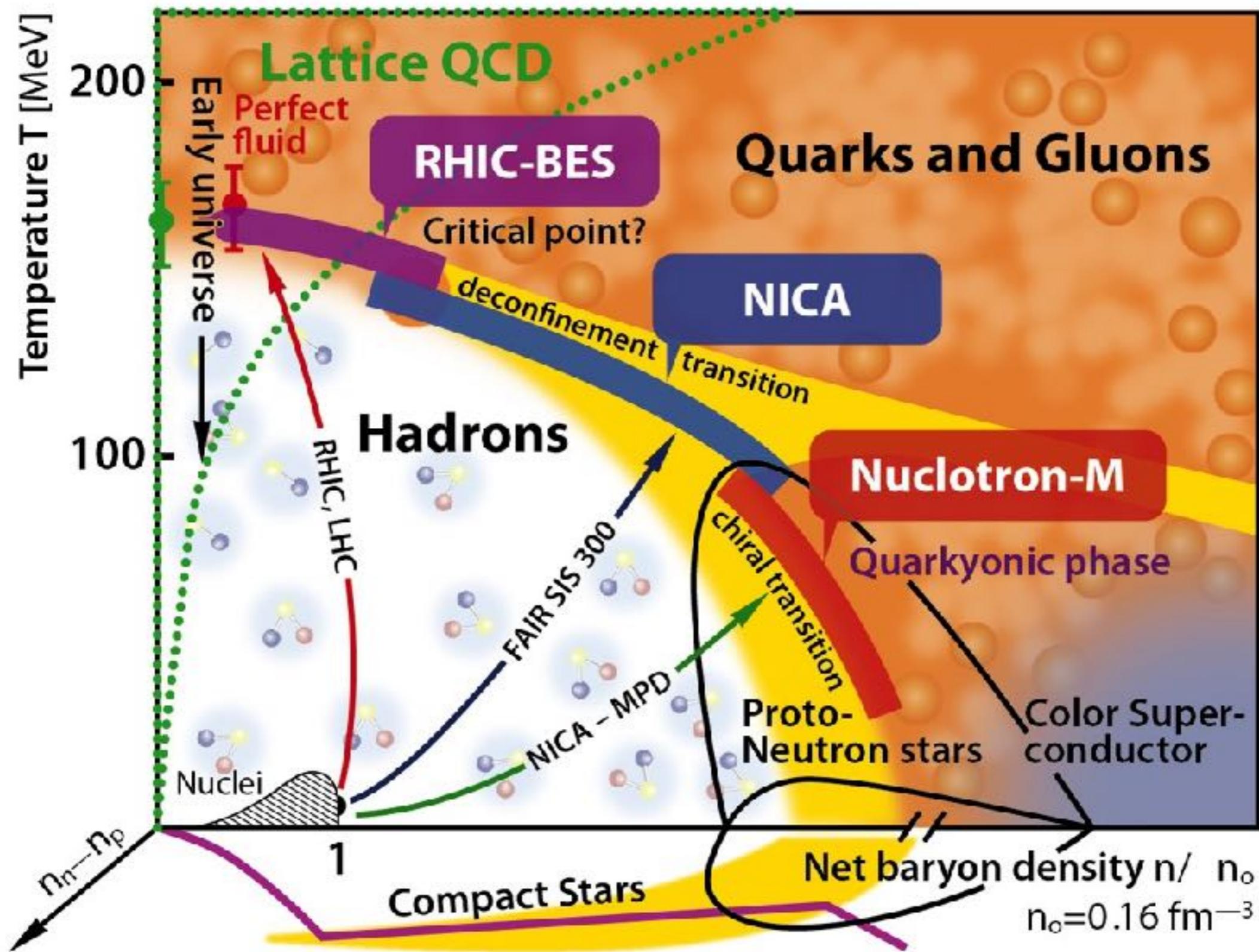
Спектроскопия адронов



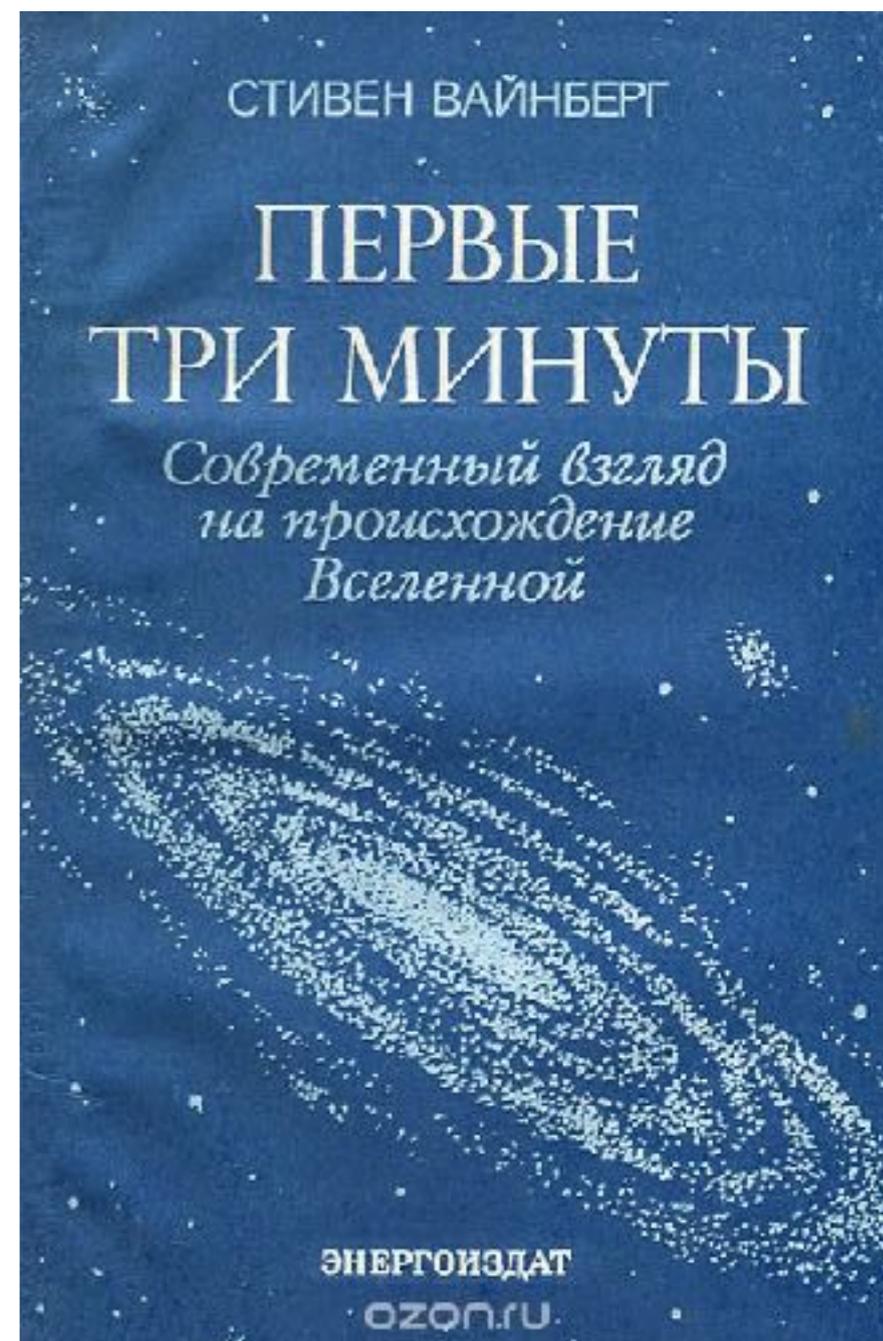
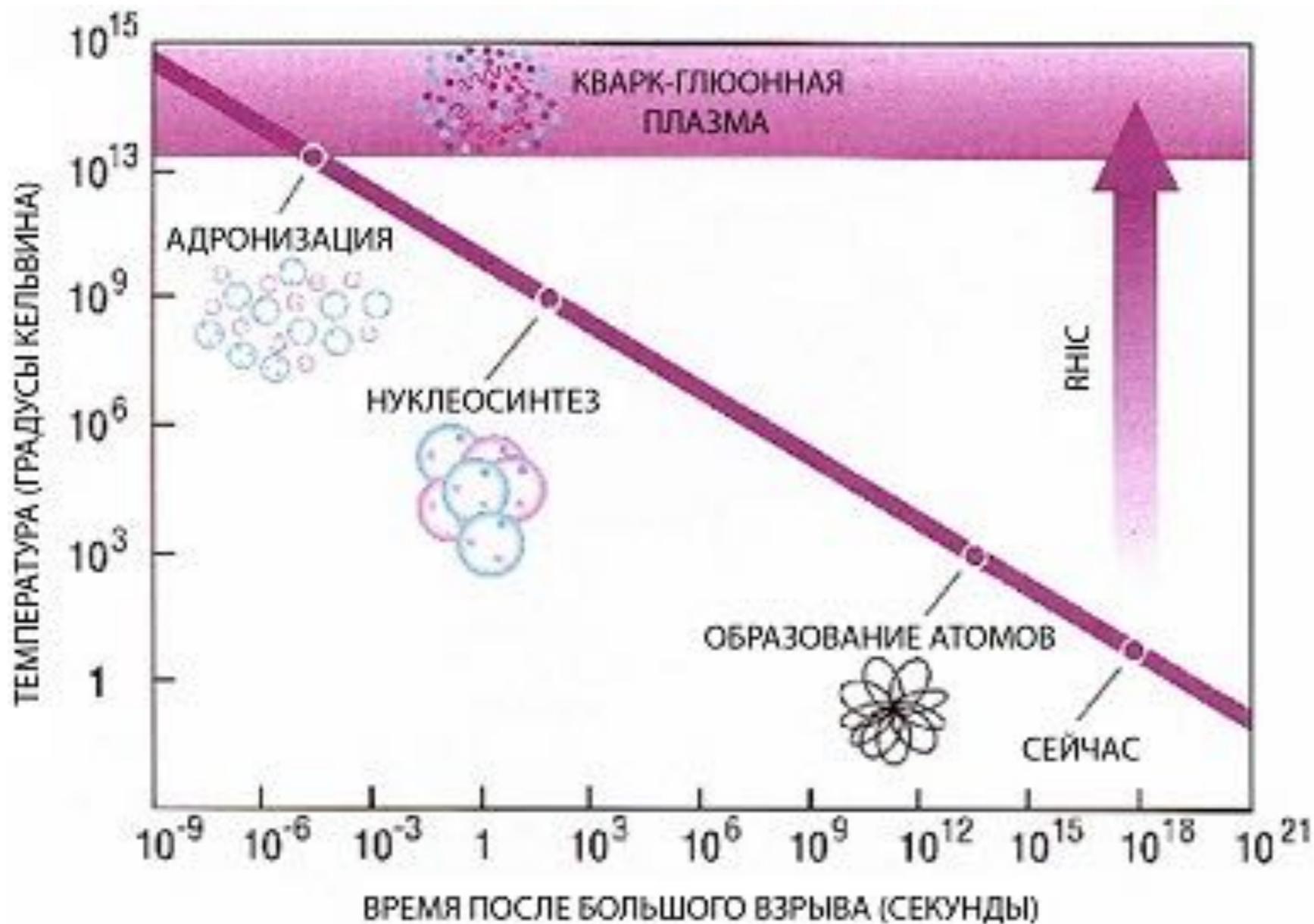
Какие связанные системы можно построить из кварков и глюонов и каковы будут свойства этих систем?



Адронная материя



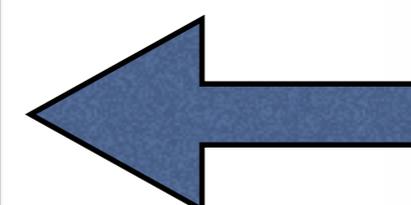
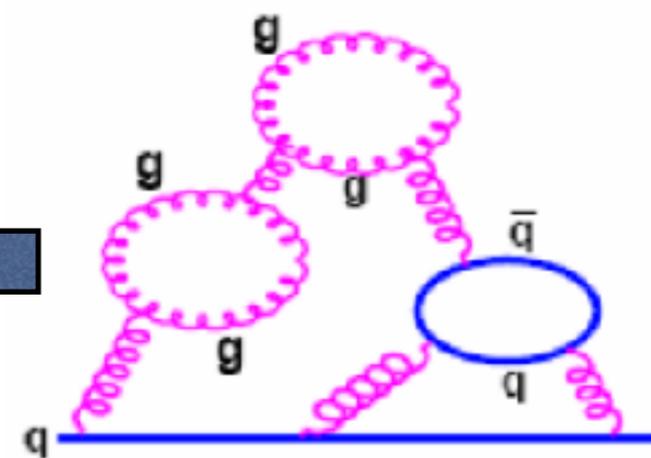
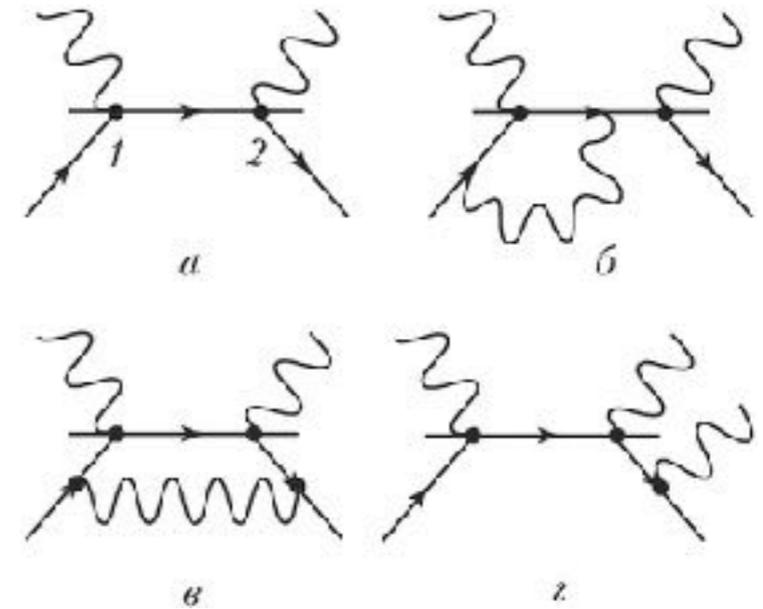
КГП и космология



Проблема описания свойств адронов из первых принципов

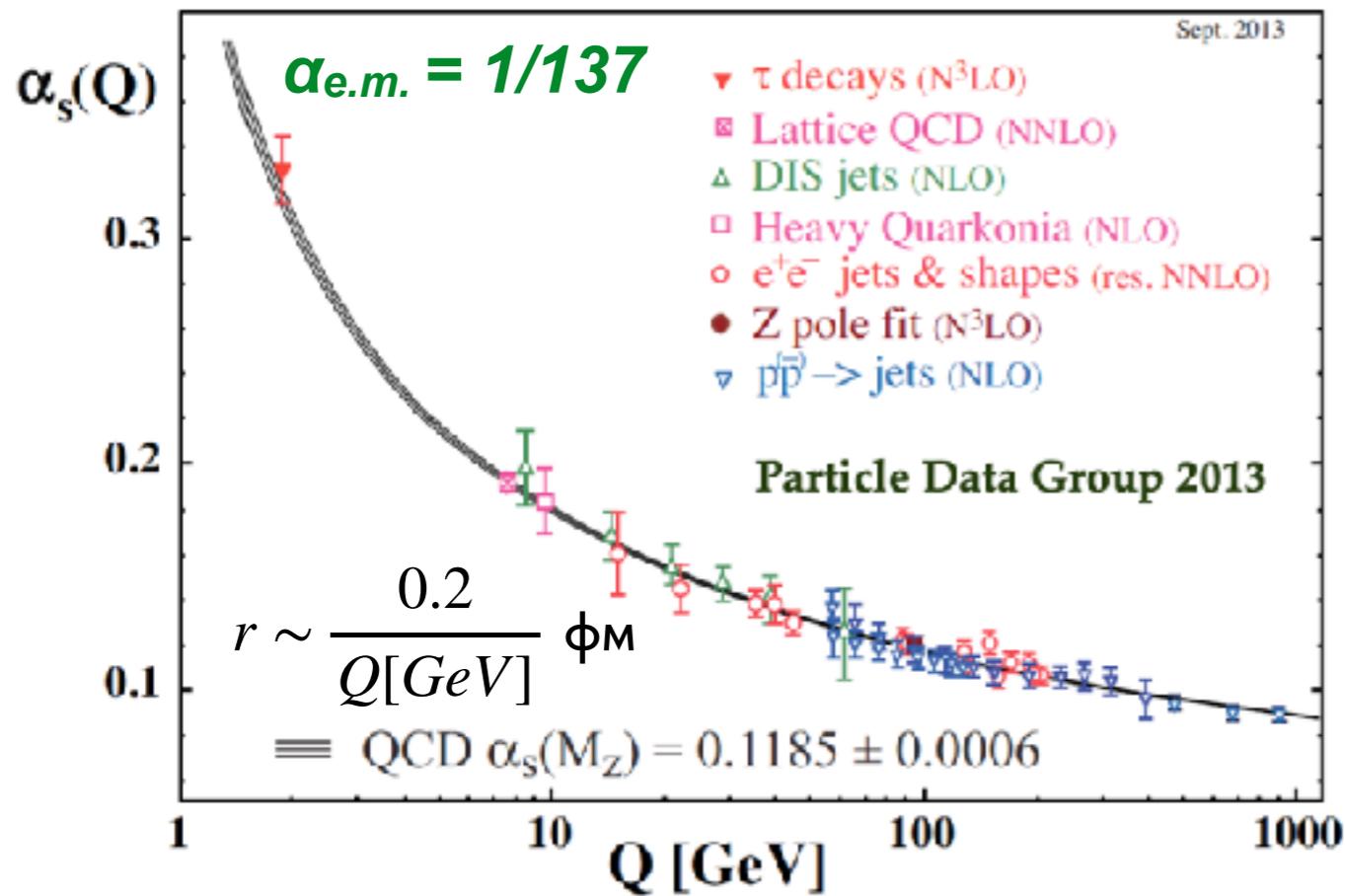
Техника фейнмановских диаграмм

$$\sigma \sim \sum_n c_n \alpha^n \quad \alpha - \text{константа взаимодействия.}$$



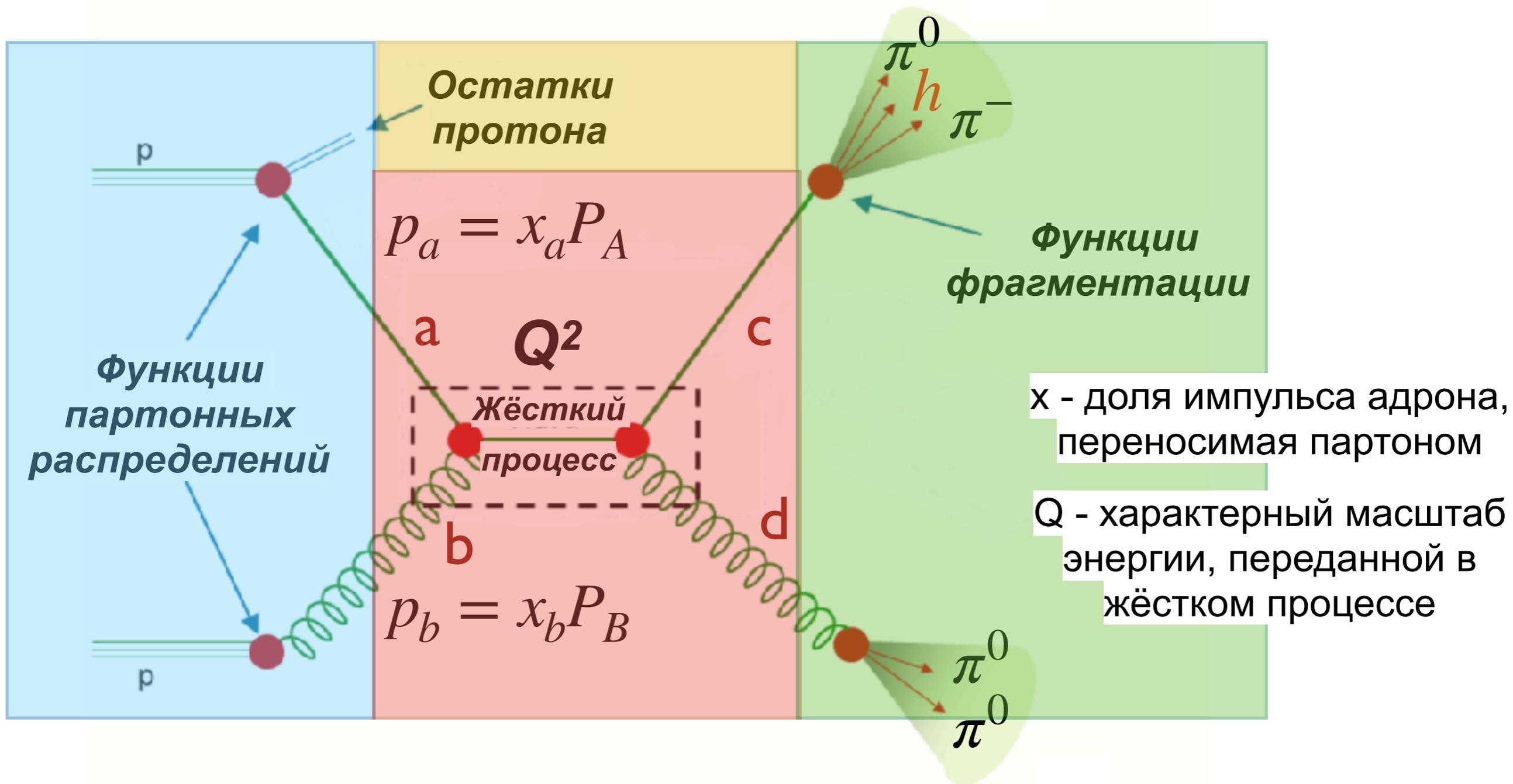
В отличие от атома водорода, мы (пока?) не можем описать из первых принципов структуру адронов и их взаимодействия при низких энергиях

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



Конфайнмент строго не доказан!

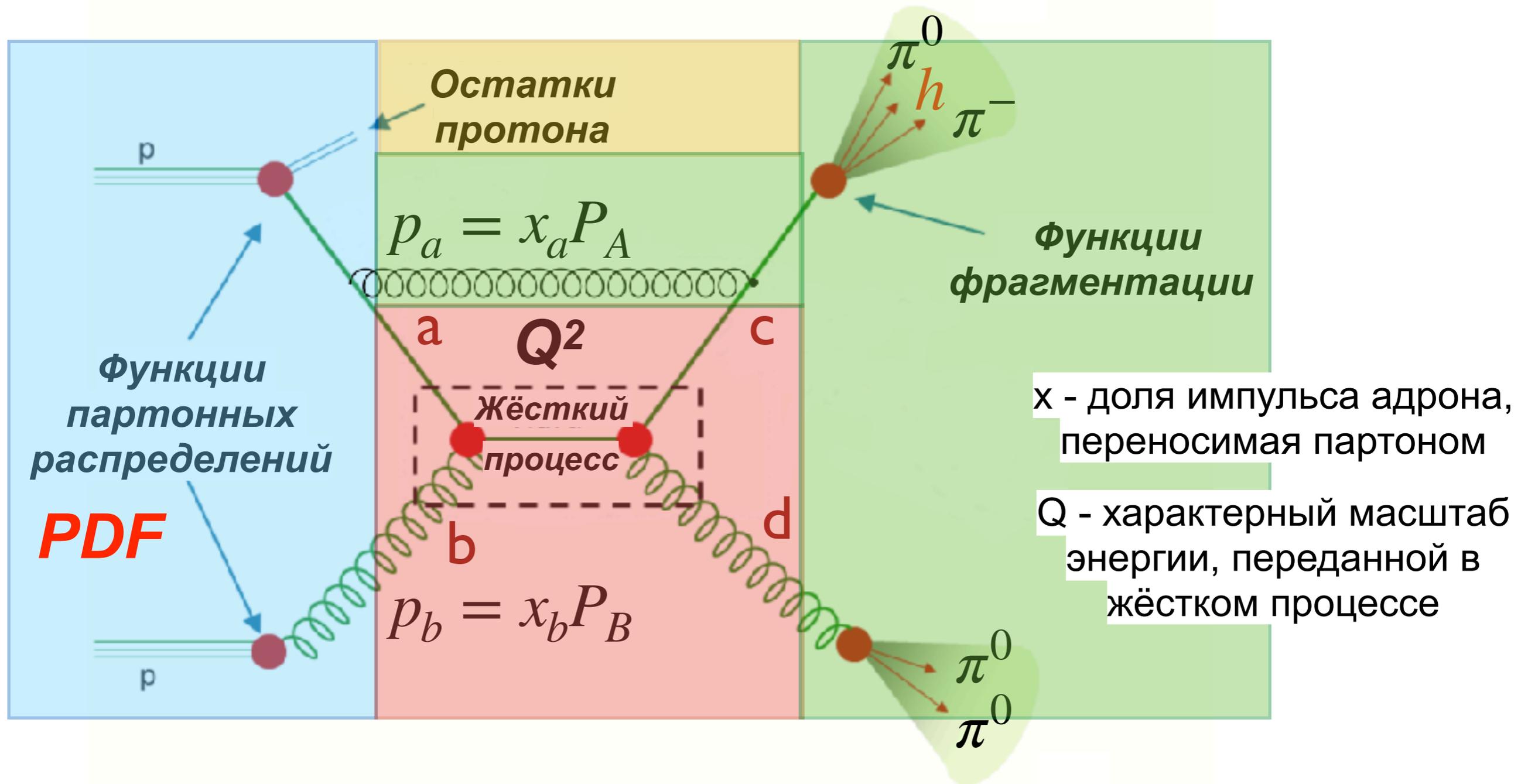
Теорема о факторизации



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

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

Нарушение факторизации

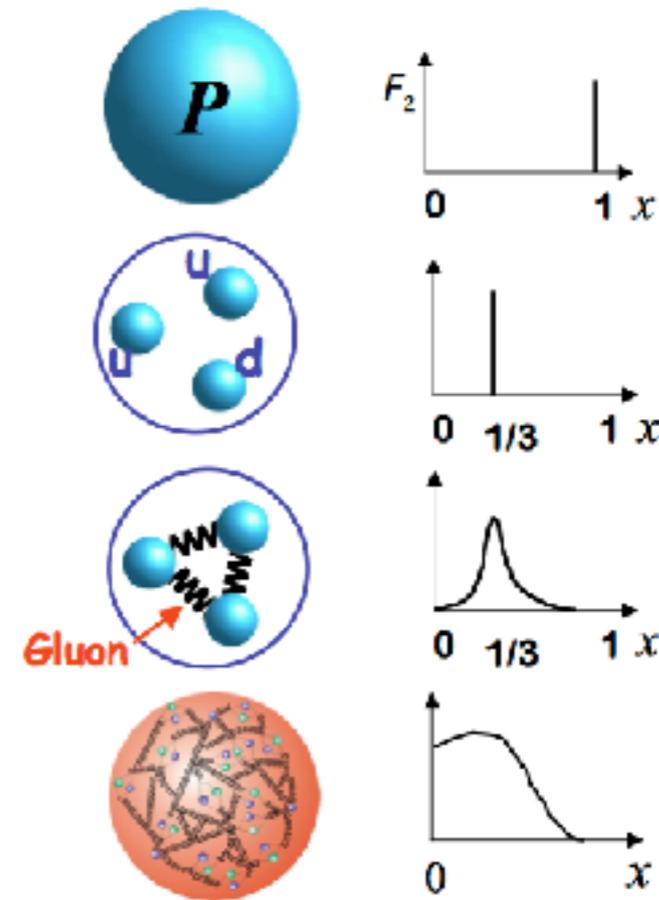
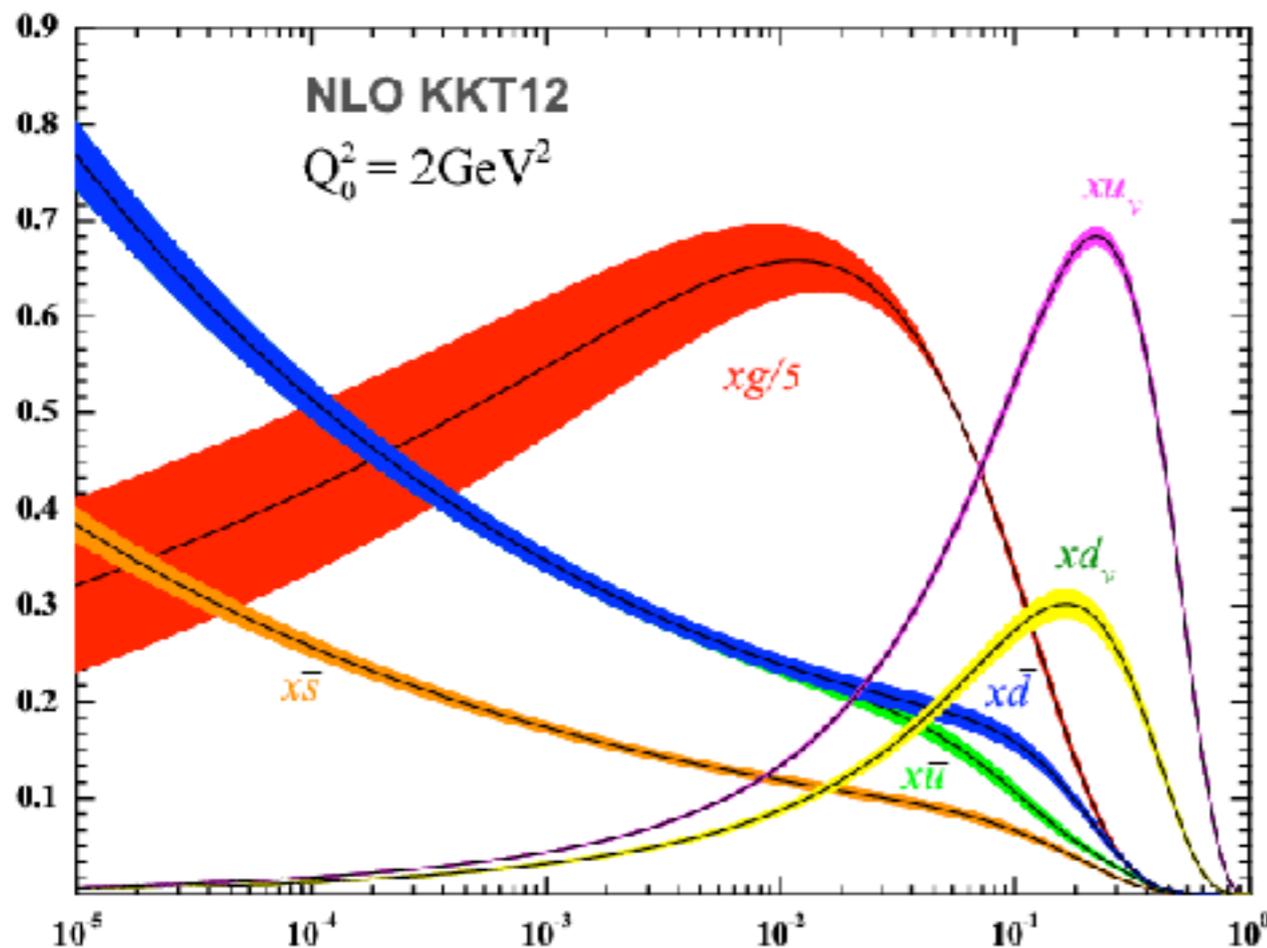


$$\sigma_{AB \rightarrow hX} = \sum_{a,b=q,\bar{q},g} \int dx_a dx_b f(x_a, Q^2) f(x_b, Q^2) \times \hat{\sigma}_{ab \rightarrow cd}(x_a, x_b, Q^2) \times D_{cd \rightarrow h}$$

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

Партонные распределения

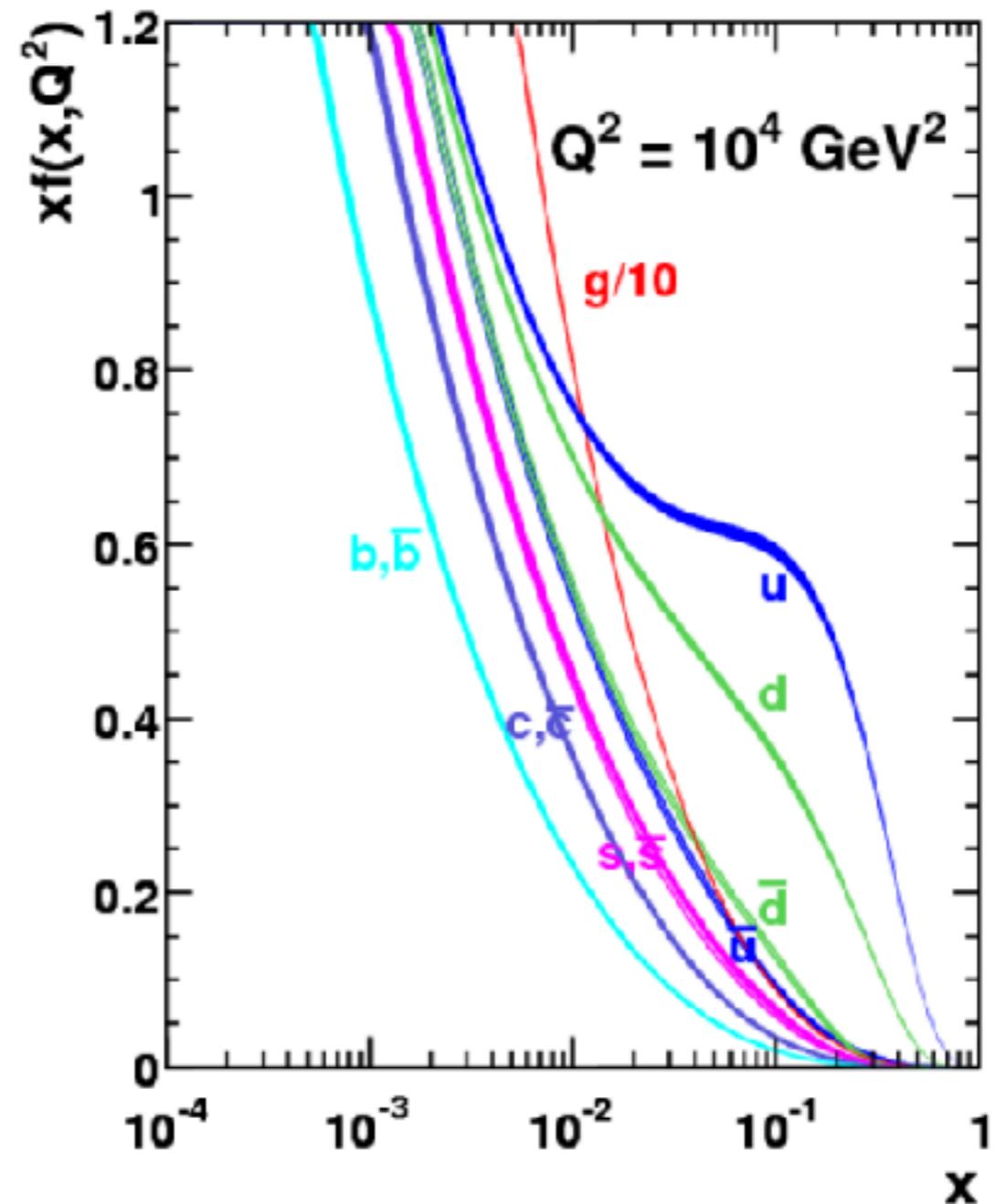
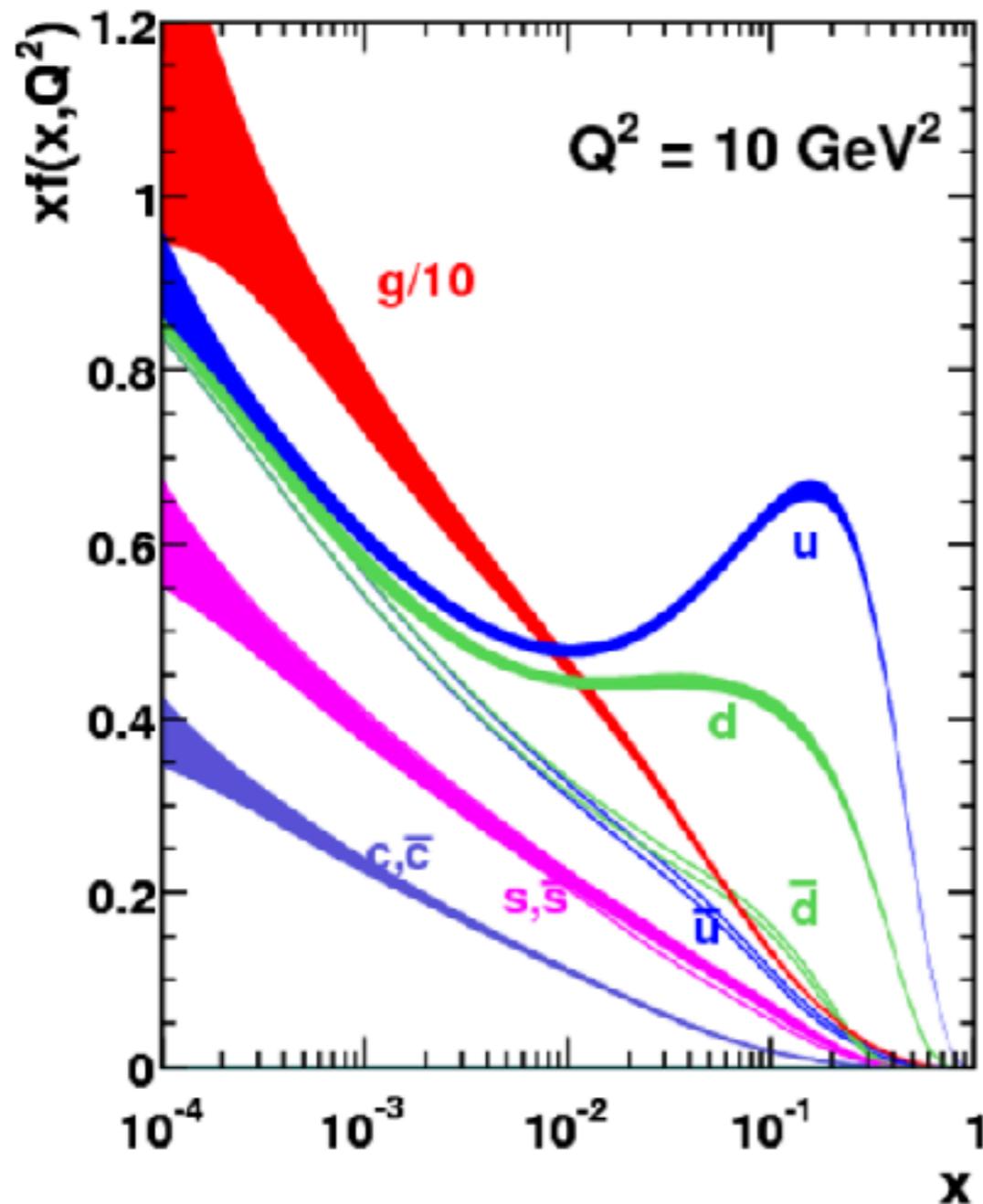
Функции партонных распределений (PDF) $f(x, Q^2)$ определяют **вероятность** найти в нуклоне партон, несущий долю импульса x .



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 !

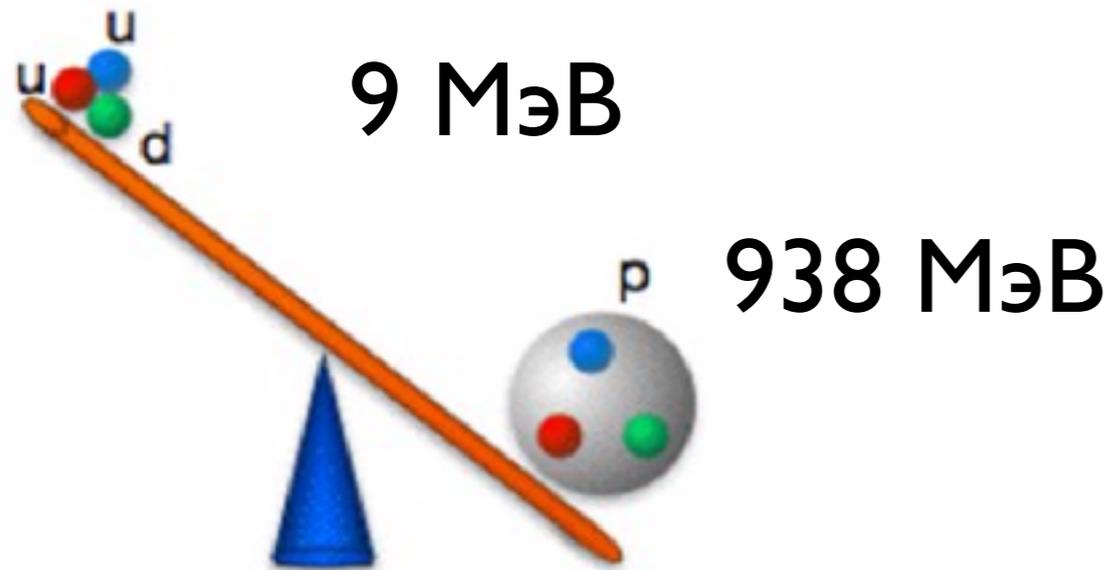
Партонные распределения



С ростом Q^2 растёт роль морских кварков!

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

Масса протона

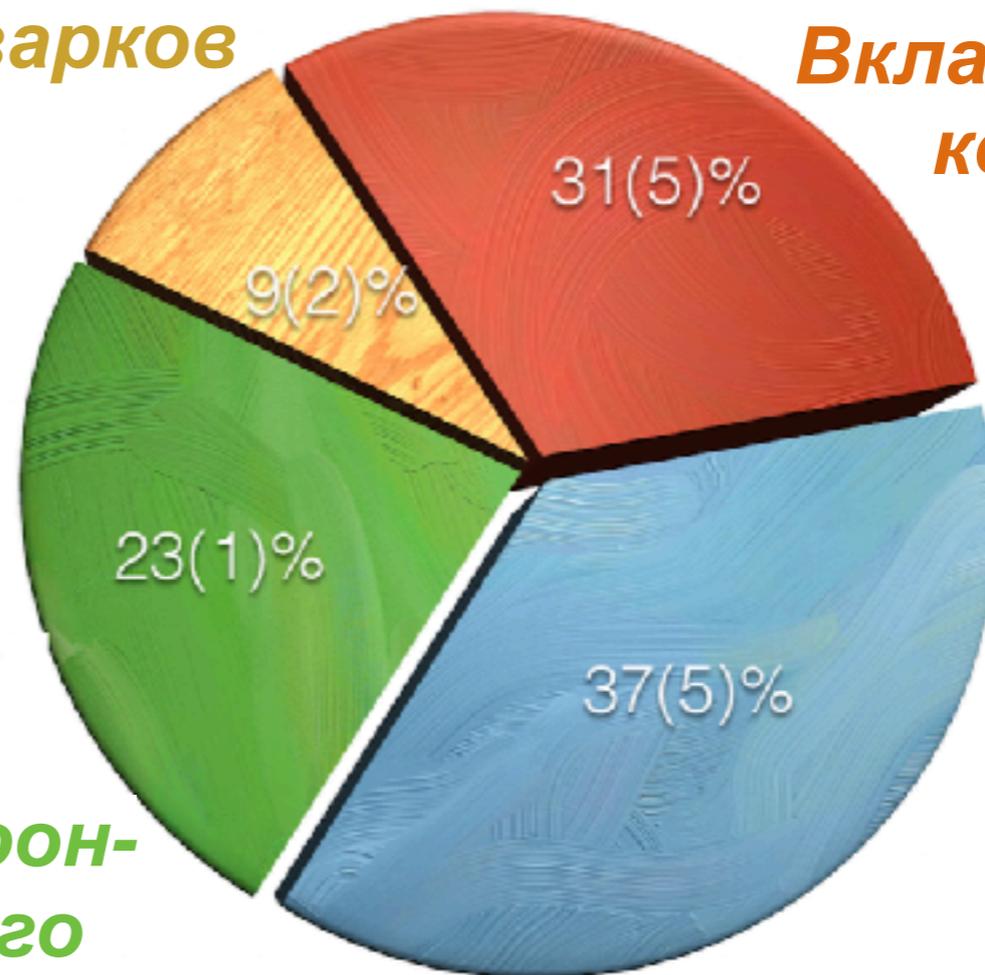


**Механизм Хиггса
практически не причастен
к формированию массы
протона!**

Вклад массы кварков

*Вклад энергии
кварков*

Модельно-зависимая
декомпозиция массы протона



*Вклад глюон-
глюонного
взаимодействия*

Вклад энергии глюонов

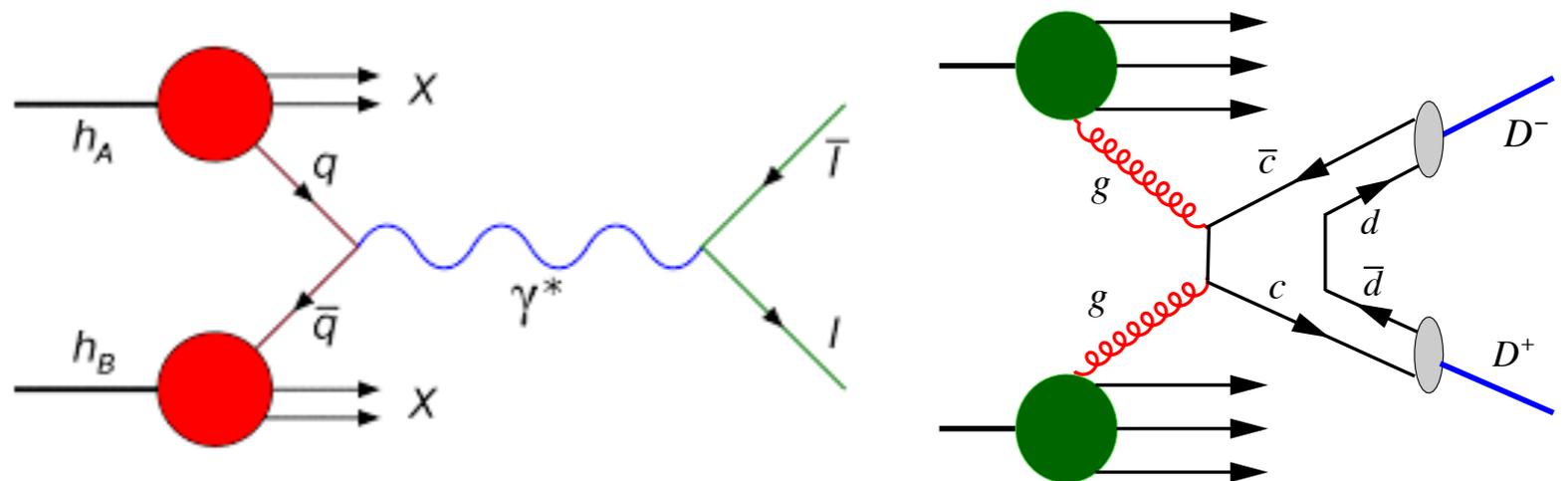
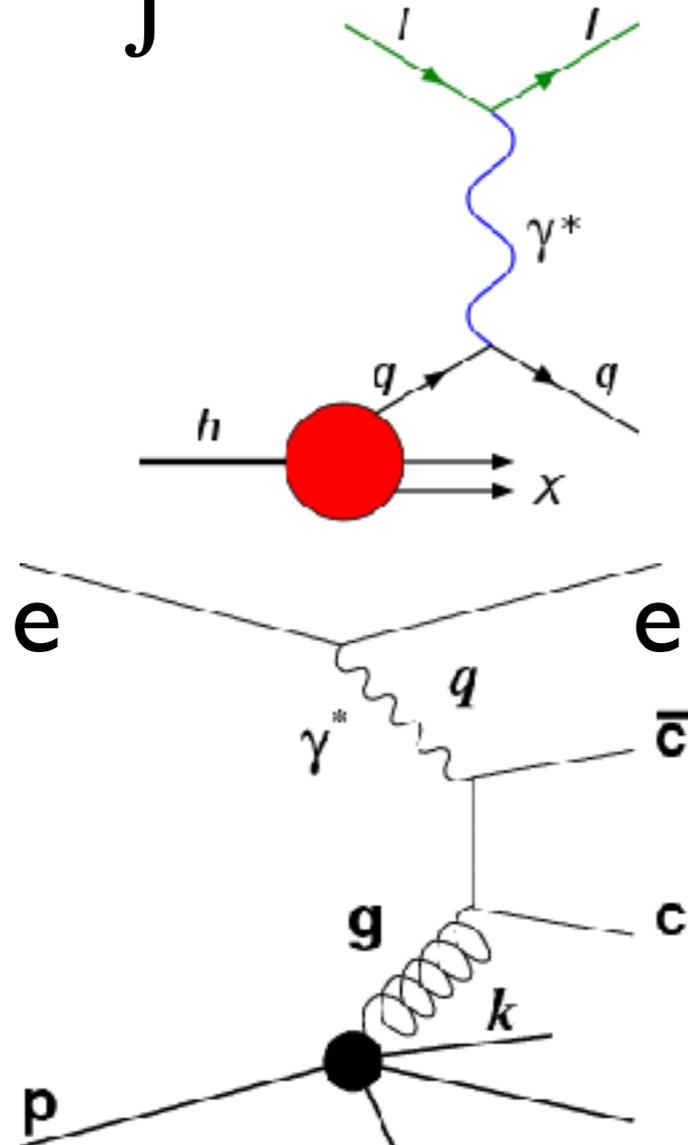
Как измерить PDF ?

Глубоконеупругое
рассеяние

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

Адронные взаимодействия

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

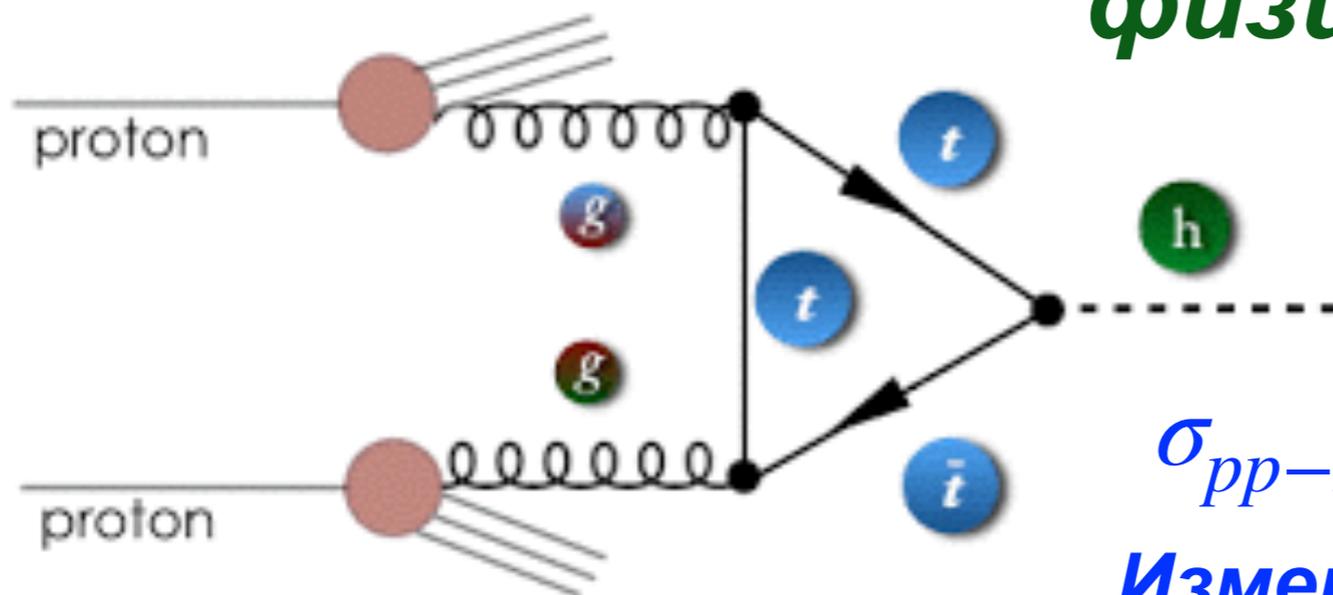


ГНР крайне удобна для изучения PDF кварков.
Для глюонов адронные взаимодействия предпочтительнее.

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.

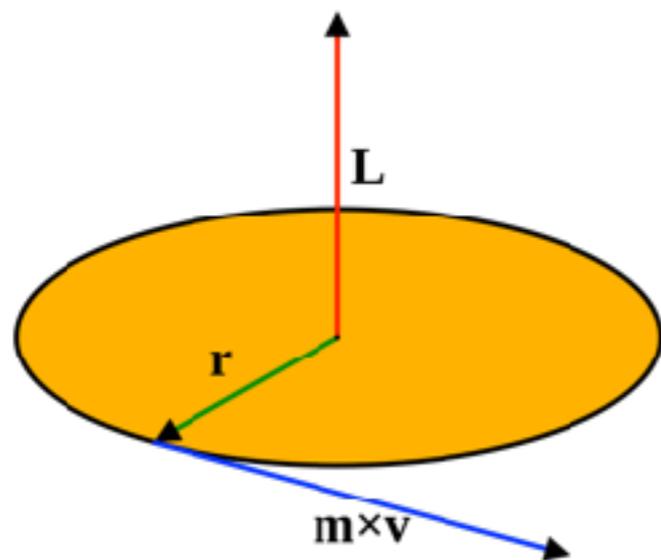


$$\sigma_{pp \rightarrow H} = f(x_1) \otimes f(x_2) \otimes \hat{\sigma}_{gg \rightarrow H}$$

Измерение

Теория

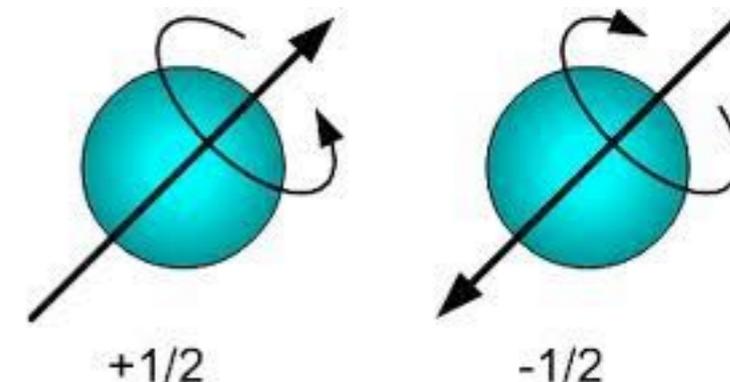
Спин частицы



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

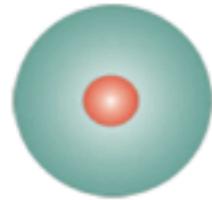
Измеряется в единицах \hbar

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

Спин протона - 1/2
дейтрона - 1

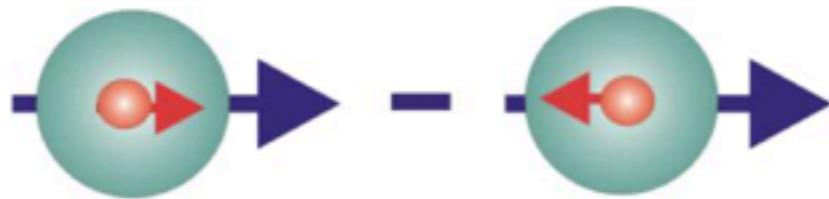
Поляризованный протон

$q(x)$



**Неполяризованное
распределение**

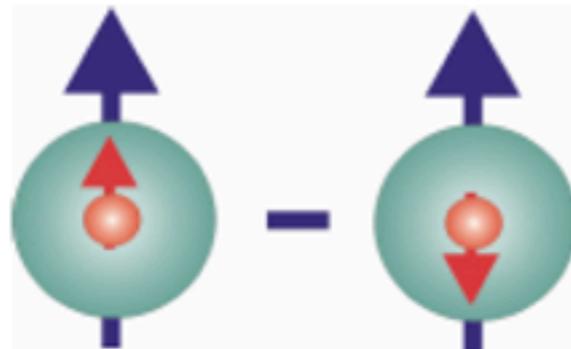
$\Delta q(x)$



Helicity

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

$\Delta_T q(x)$



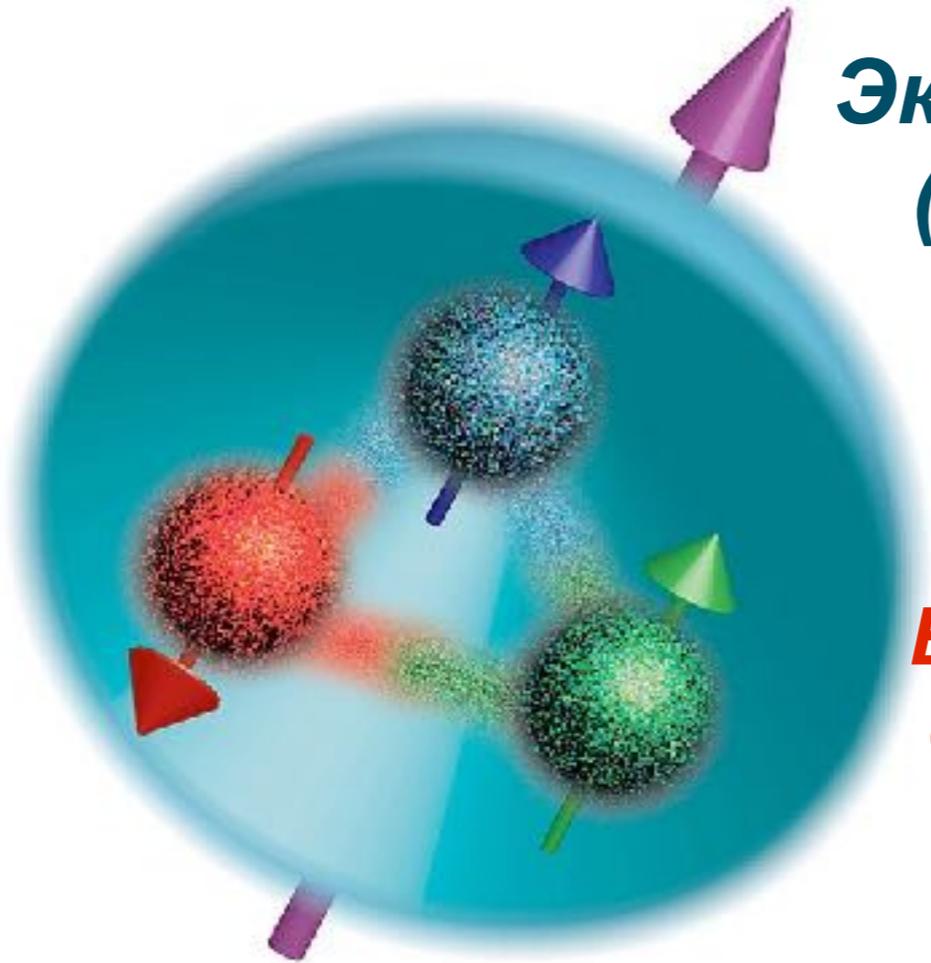
Transversity

A_{TT}

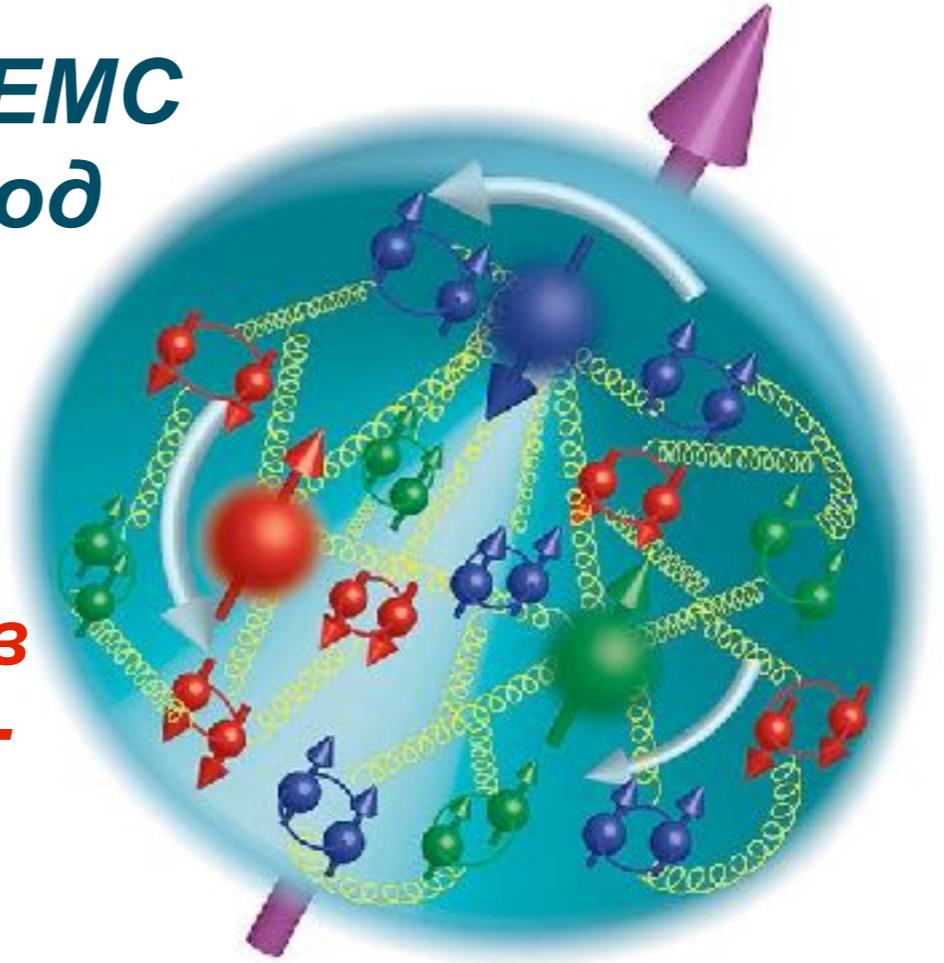


Спиновый кризис

Эксперимент EMC
(ЦЕРН) 1988 год



Вклад кварков в
спин протона -
не более 30% !



Наивная кварковая
модель

Реальная
ситуация

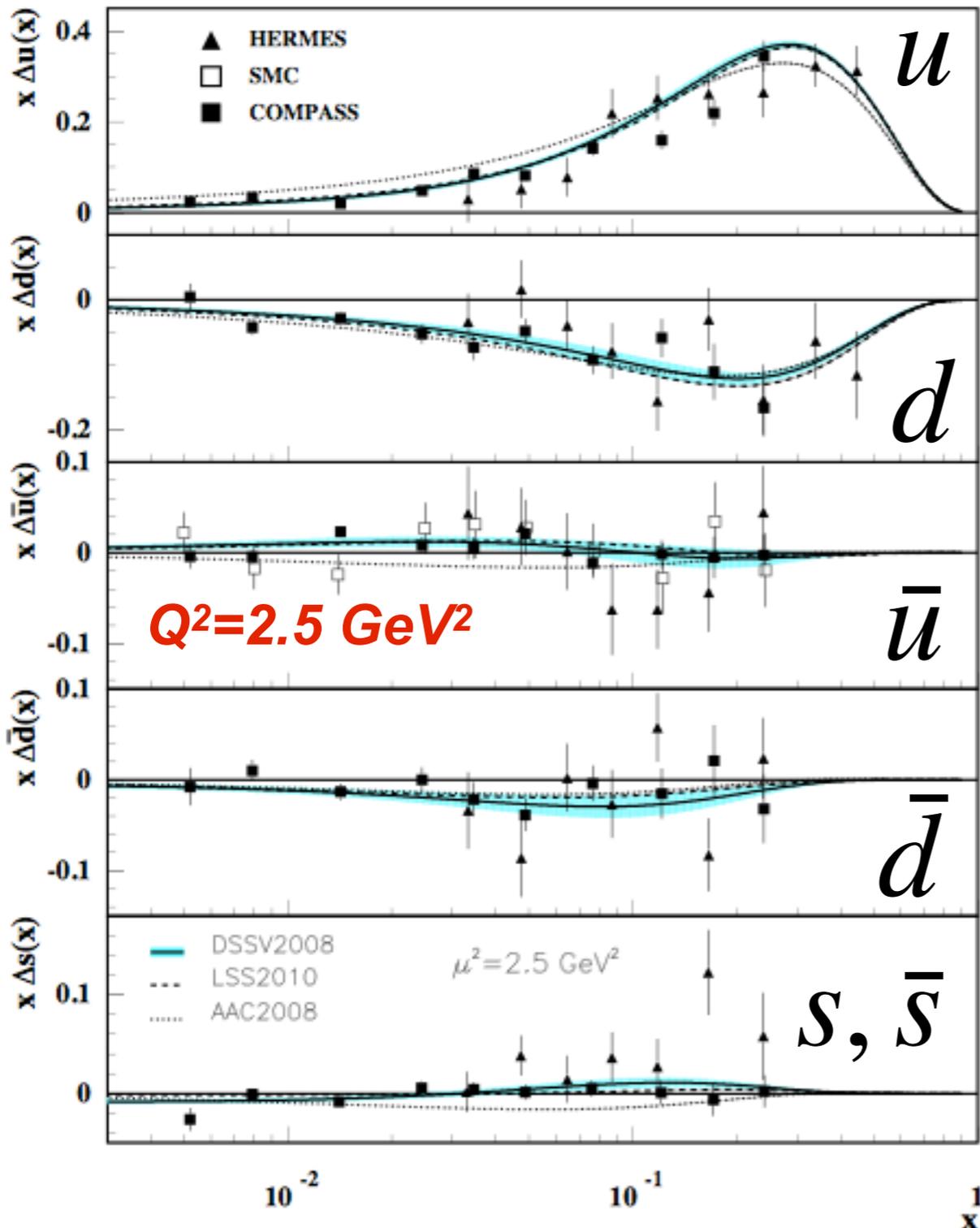
$$\frac{1}{2} = \sum_{q=u, \bar{u}, d} \left(\frac{1}{2} \right)$$

L - орбитальные моменты
кварков и глюонов

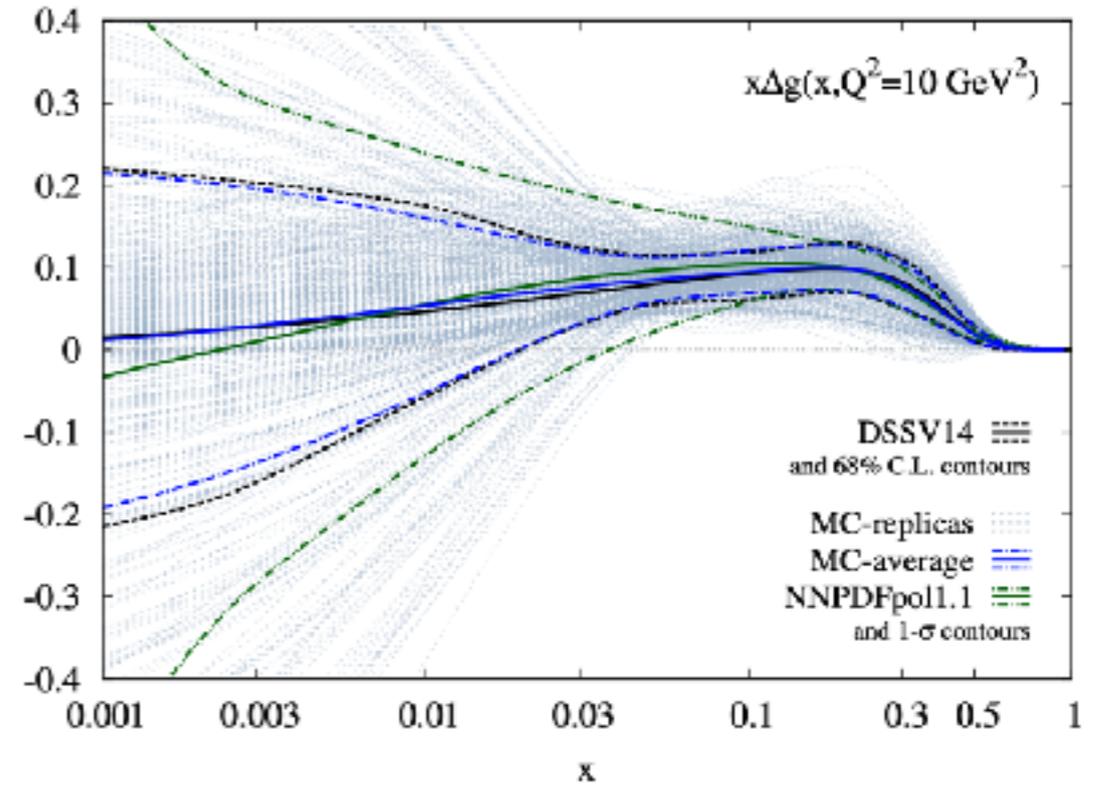
$$S_N = 1/2 = 1/2 \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

Спиновый кризис

Продольная поляризация каждого из типов кварков:



... и глюонов:

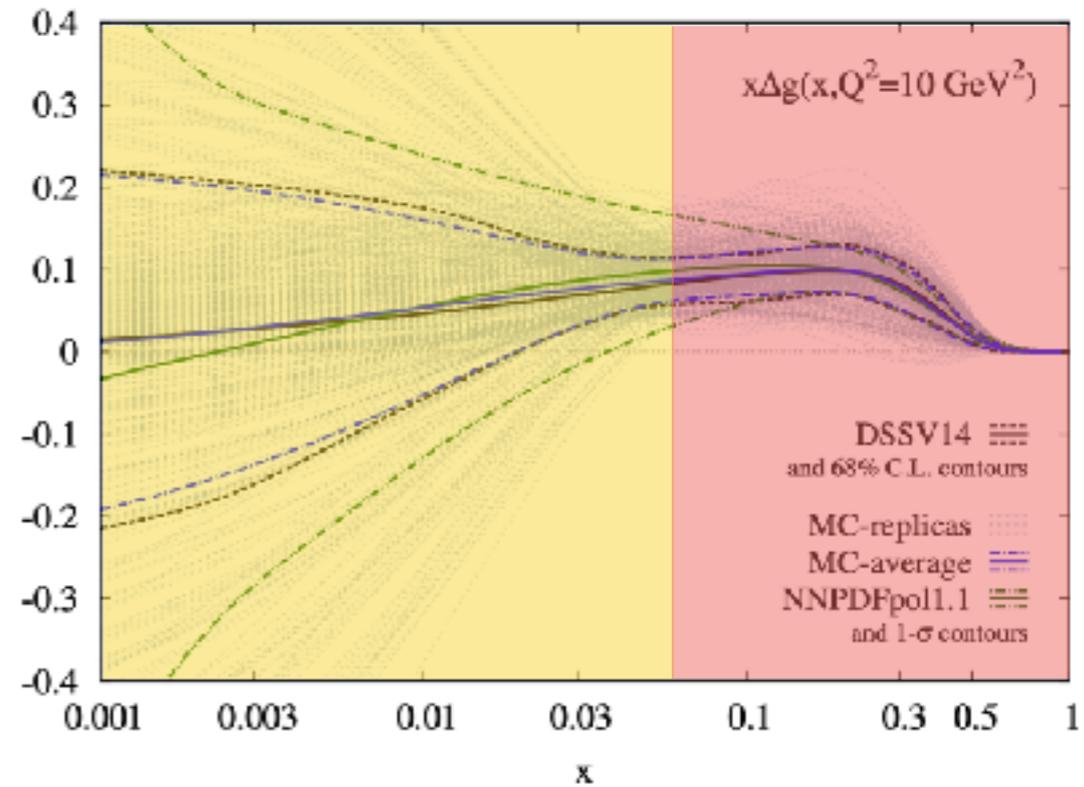
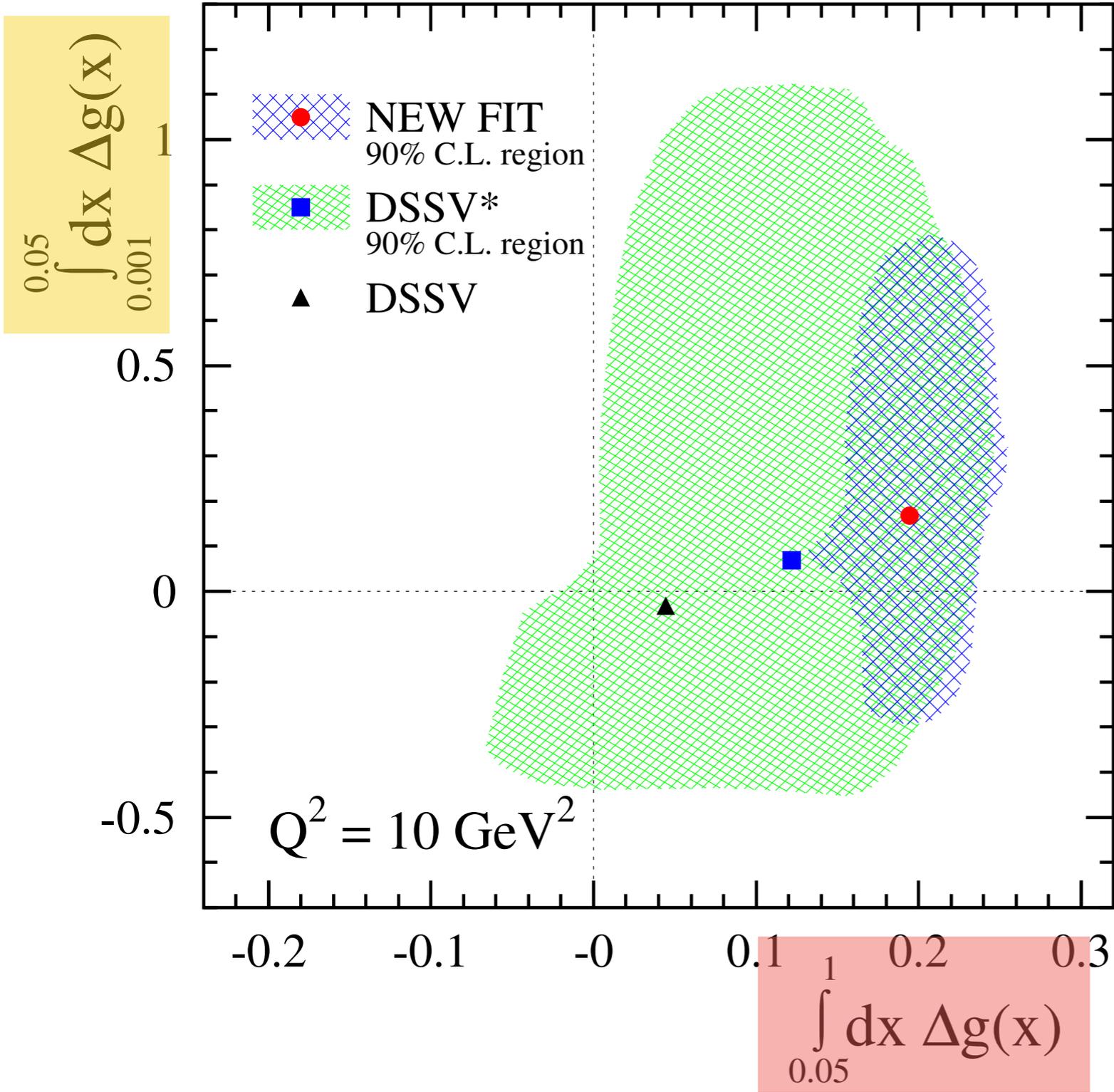


$$S_N = 1/2 = 1/2 \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

~30%

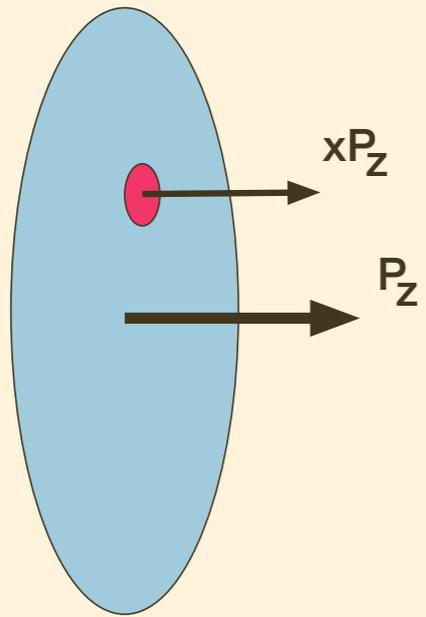
~ ?

Поляризация глюонов

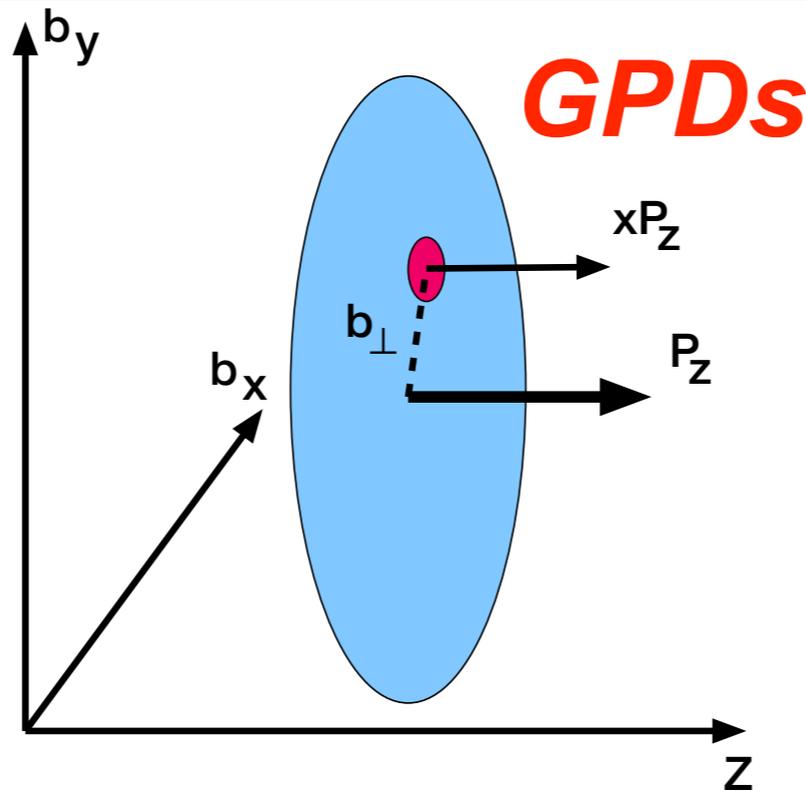


Ждём новых данных как в области больших, так и малых x

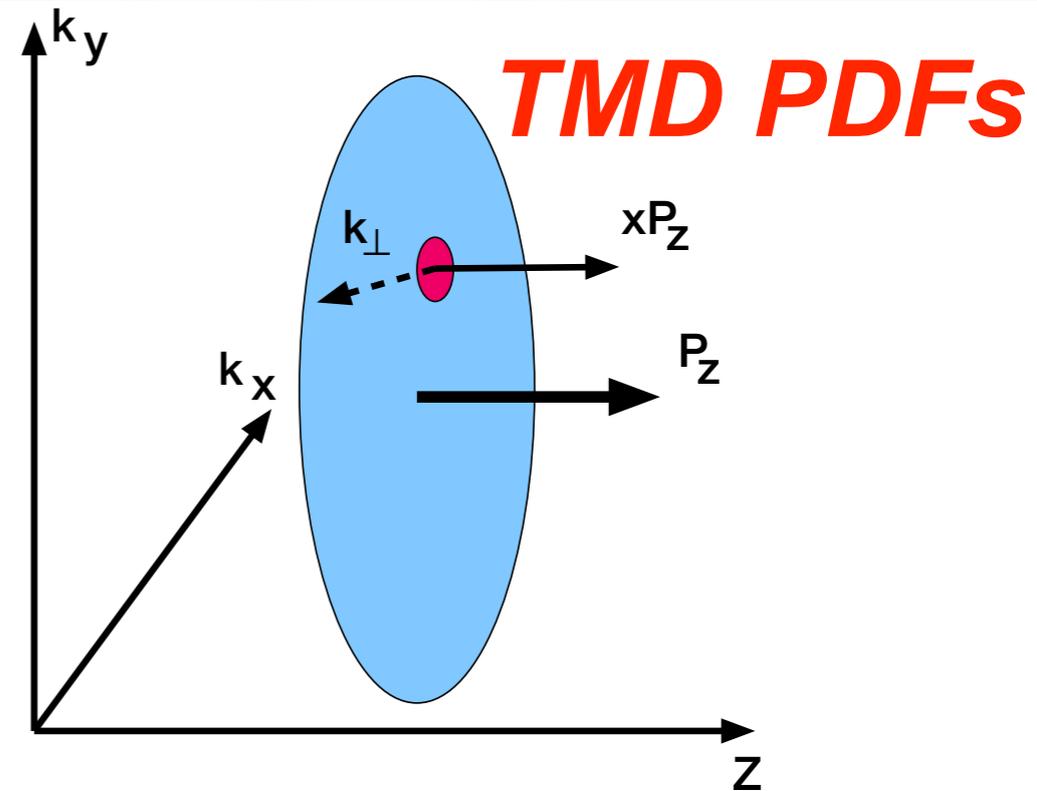
Протон в 3D



Коллинеарное приближение
(обычные PDF)

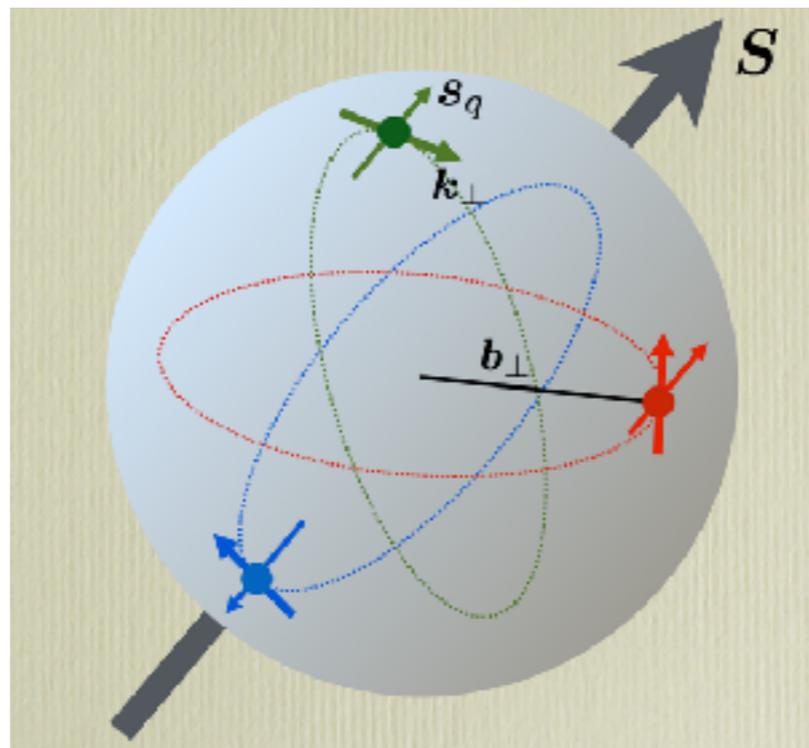


Generalized Parton Distributions



Transverse Momentum Dependent PDFs

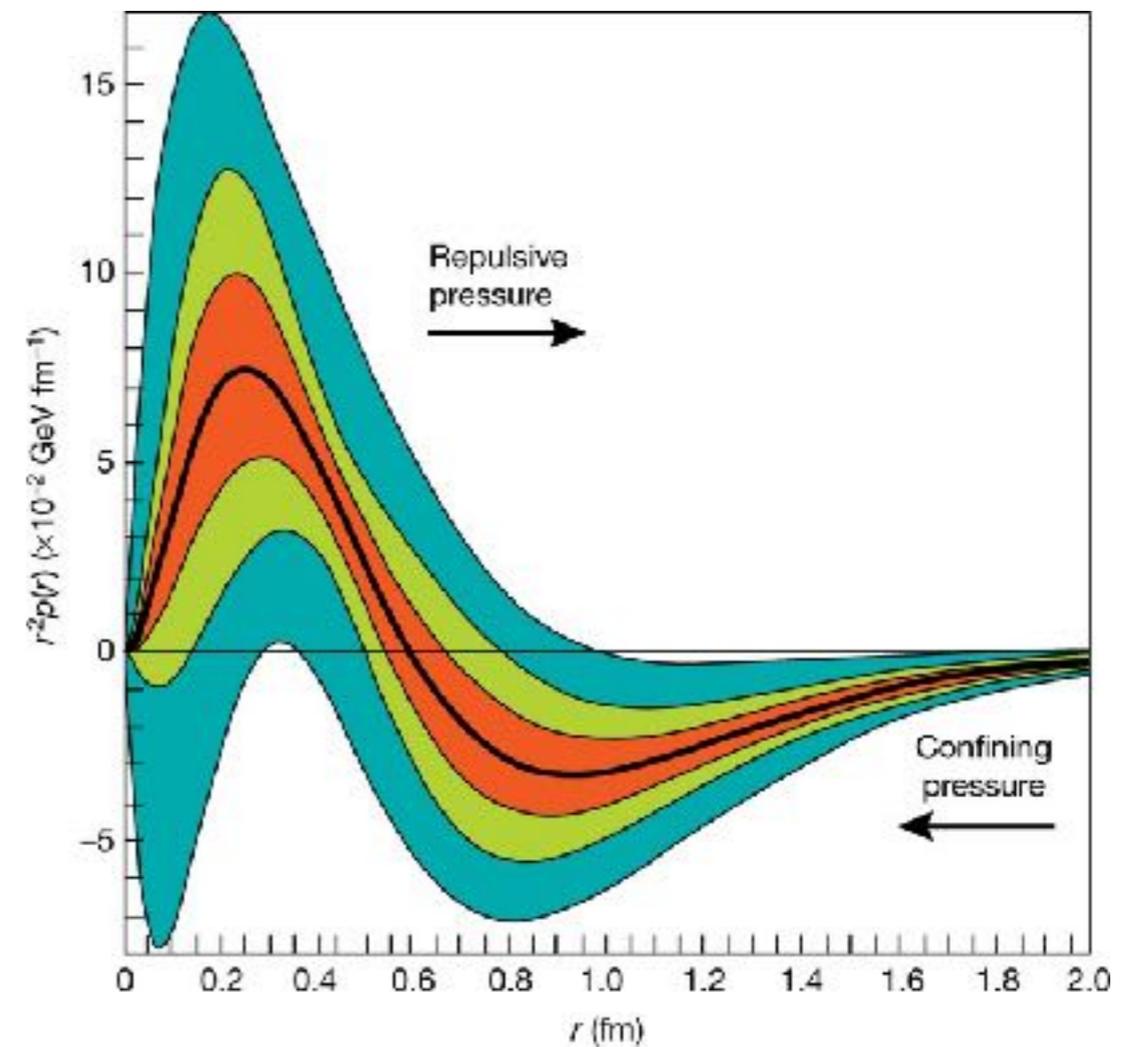
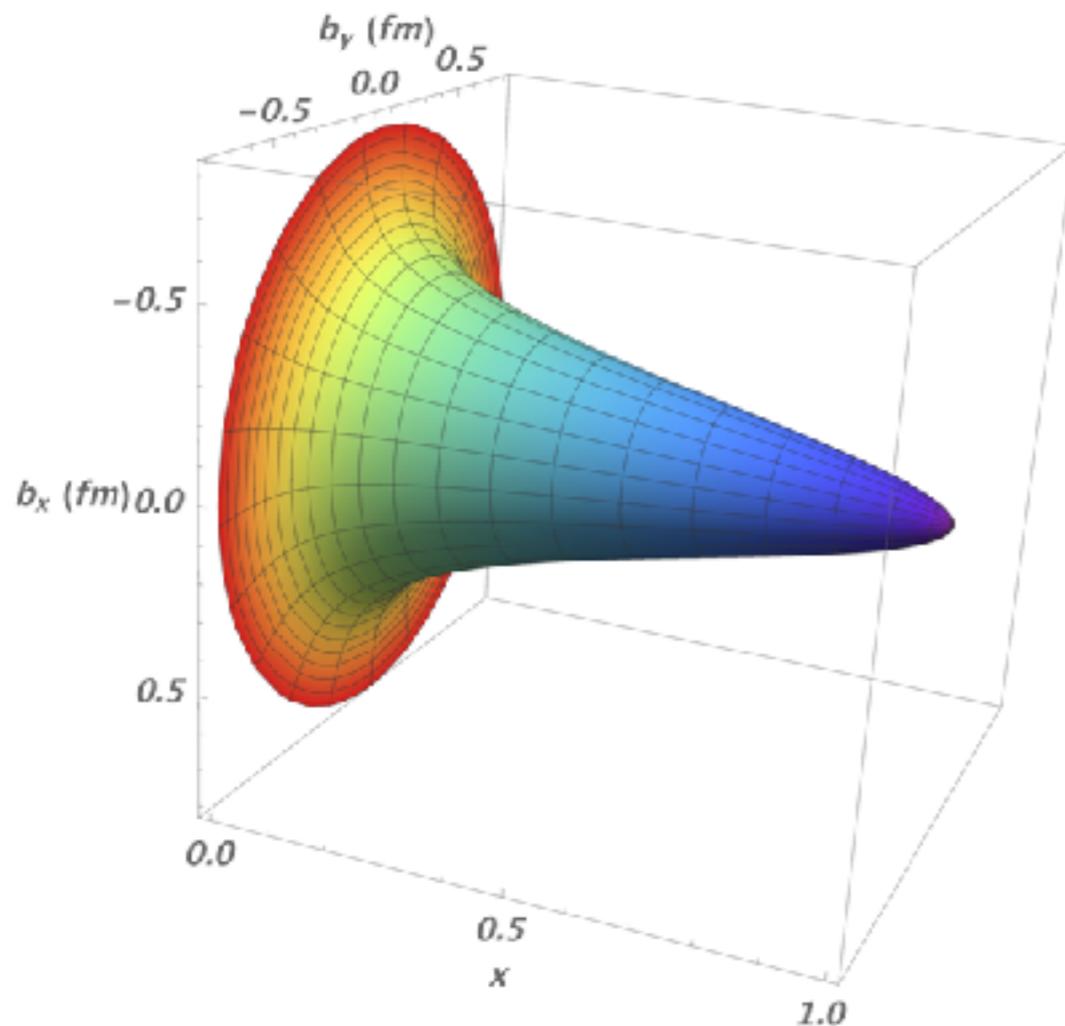
**“Трёхмерная”
структура
нуклона**



**Связь с
орбитальным
моментом**

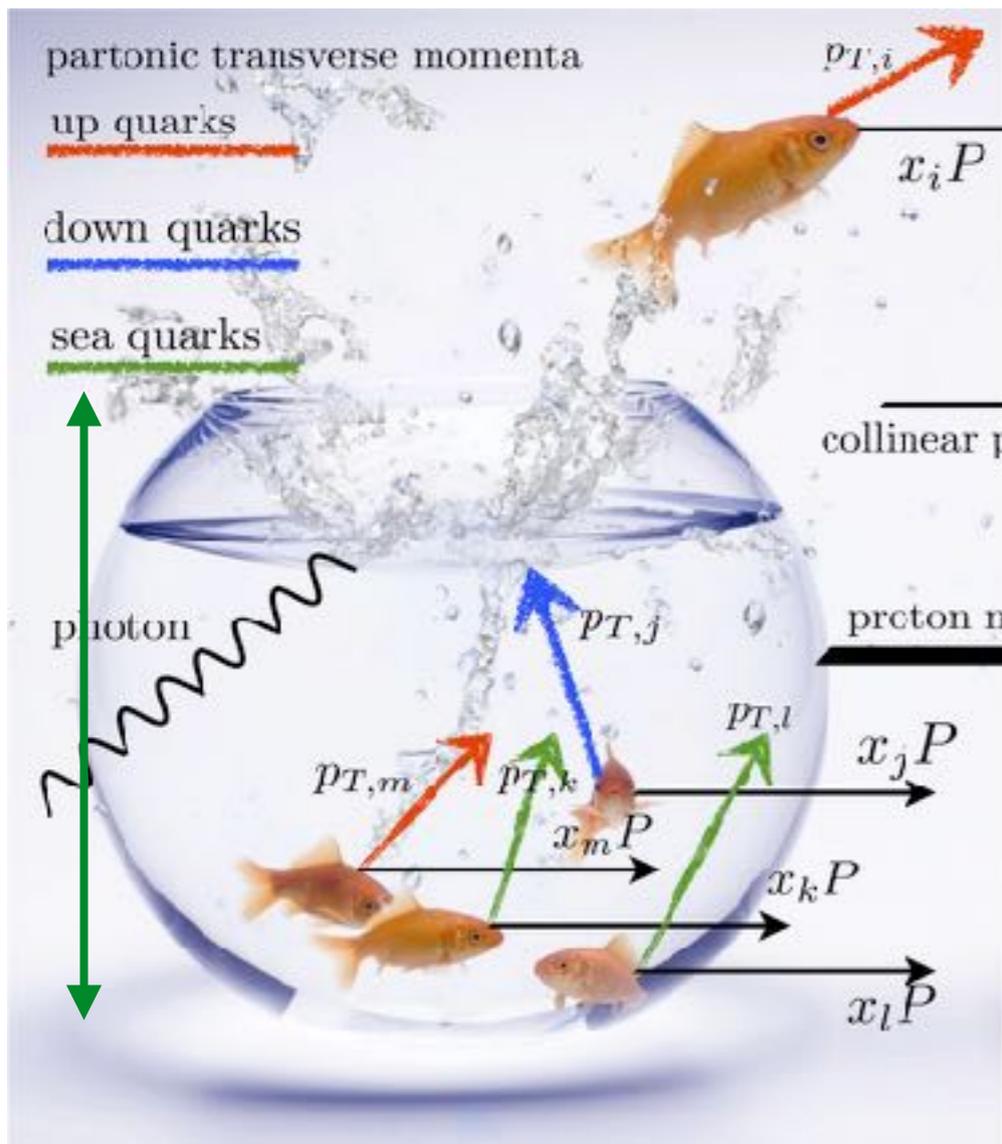
Протон в 3D & GPD

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



Давление в протоне достигает 10^{34} Па!

А откуда поперечный импульс?



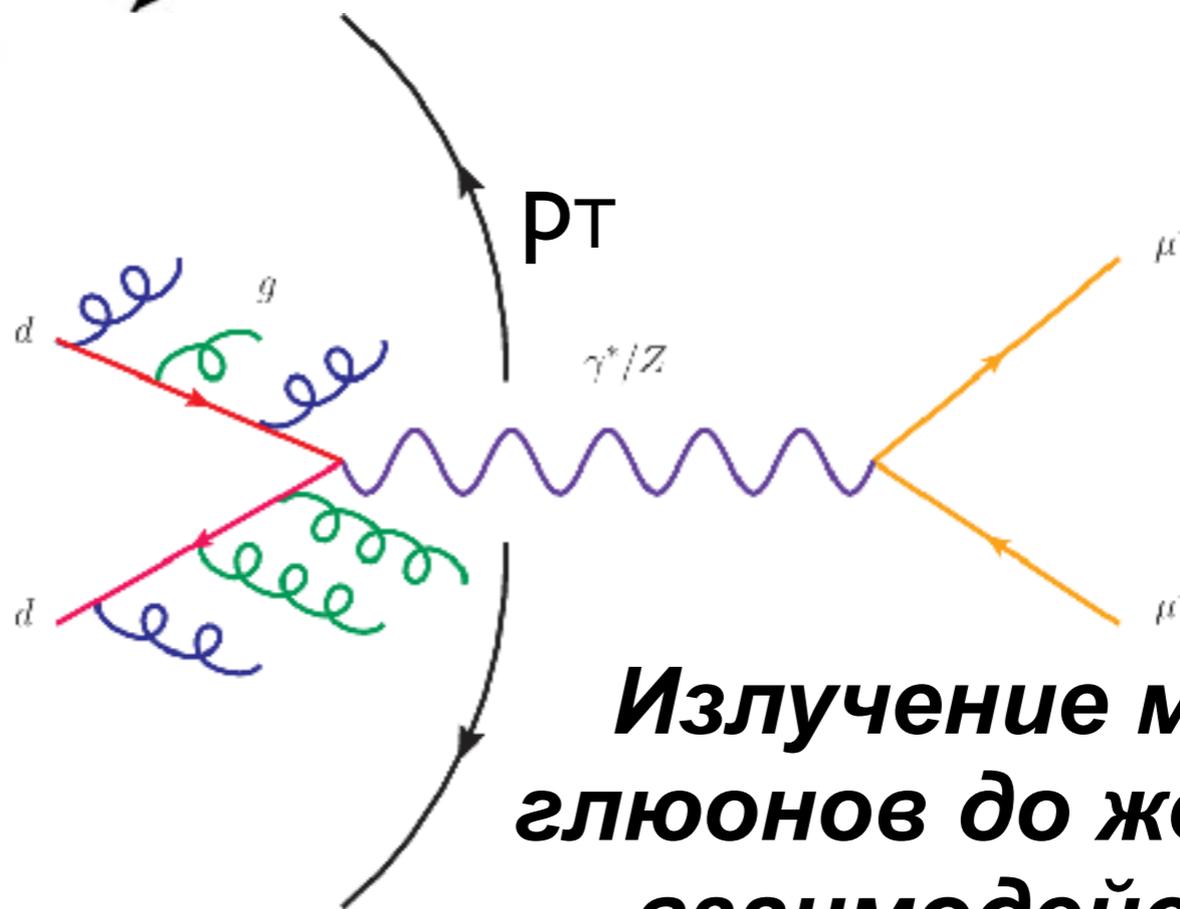
Соотношение неопределённостей:

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

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

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

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

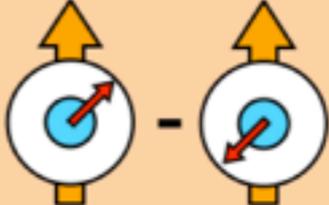
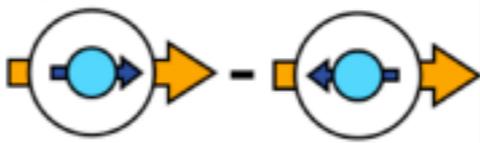
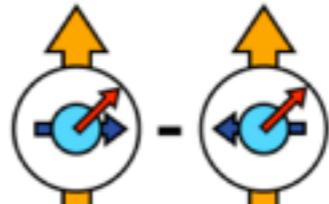
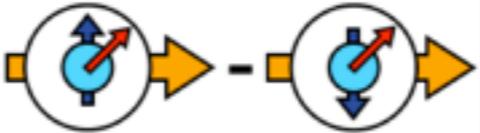
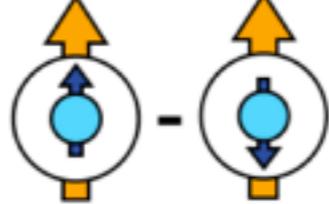
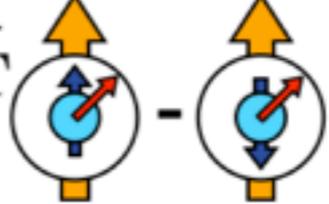


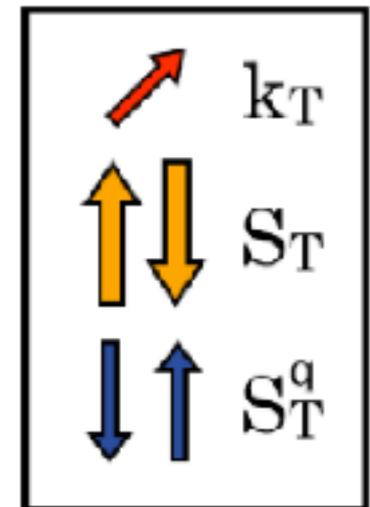
Излучение мягких глюонов до жёсткого взаимодействия

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

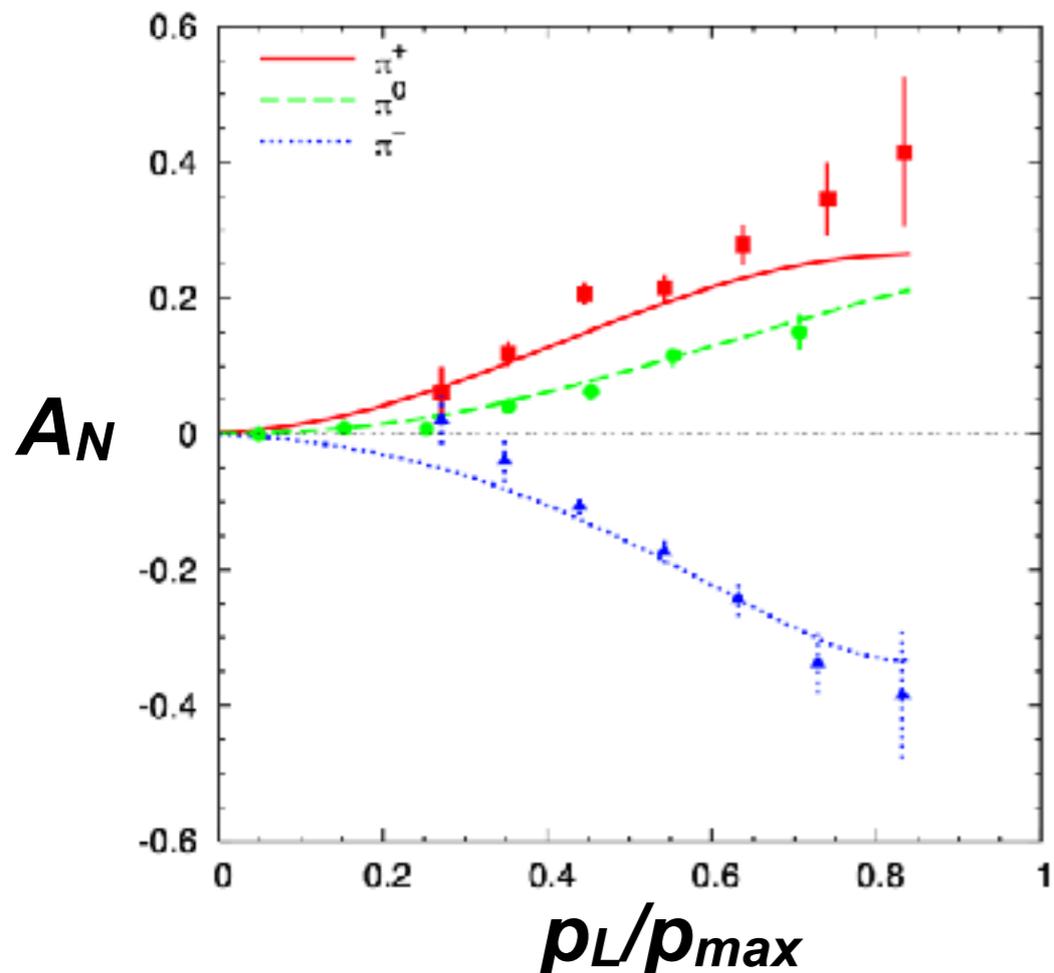
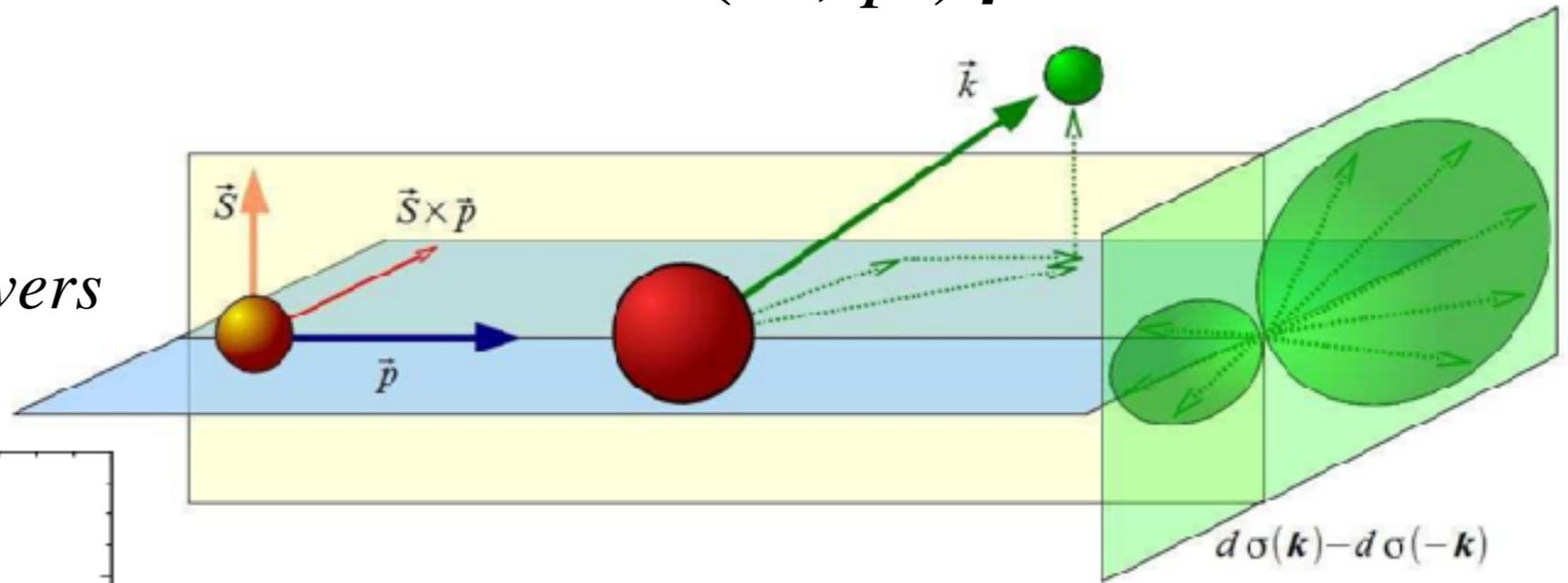


5 новых (TMD) функций, описывающих корреляцию между спином нуклона, спином партона и поперечным импульсом партона.

Эффект Сиверса

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

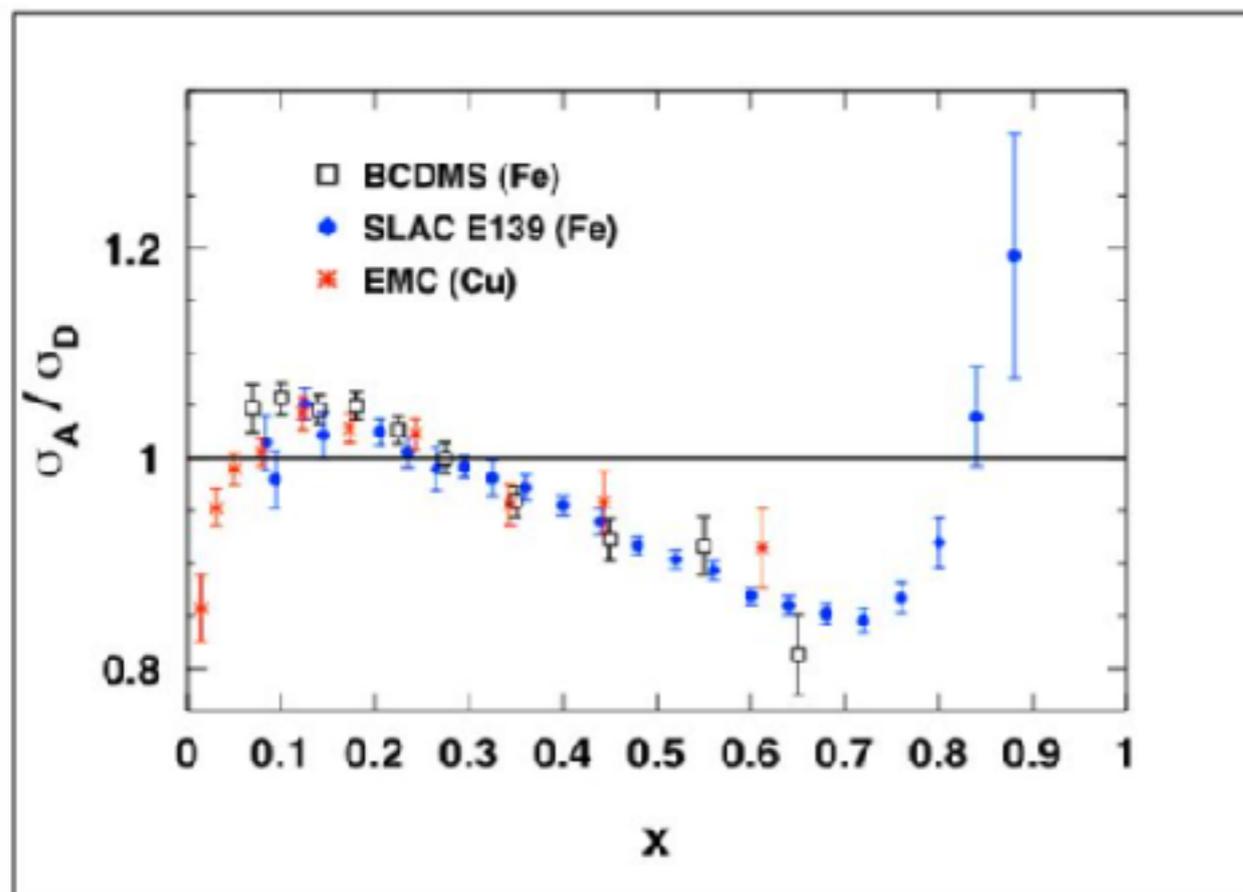
$$A_N = \frac{\sigma^\uparrow - \sigma^\downarrow}{\sigma^\uparrow + \sigma^\downarrow} \sim f_{Sivers}$$



E704

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”

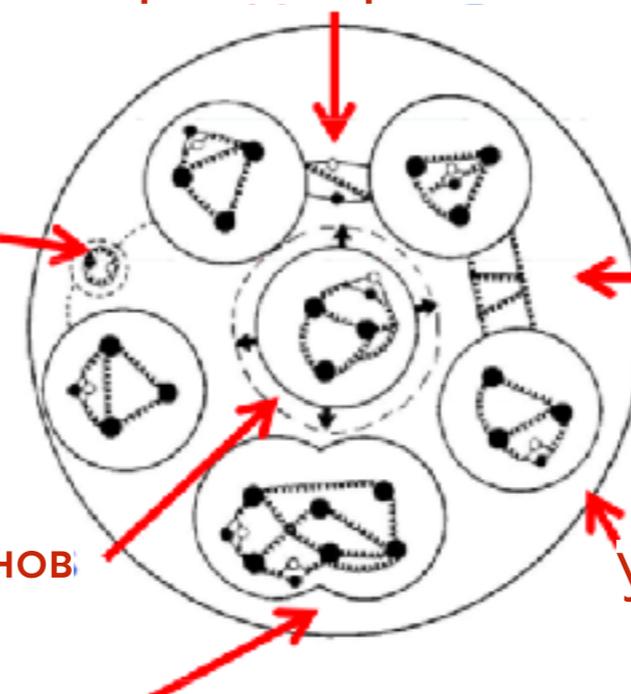
Пионный обмен

Глюонный обмен

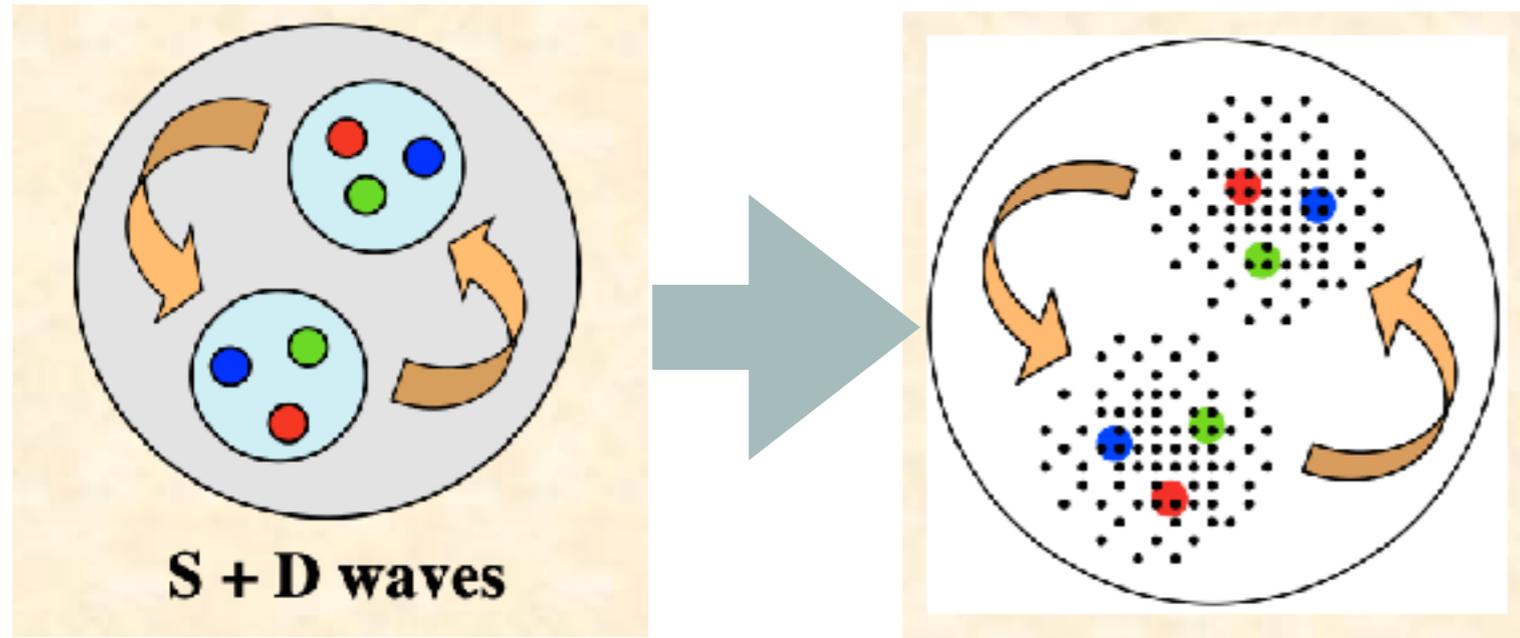
Раздувание нуклонов

Уменьшение массы
нуклона

Мультикварковые
мешки



Дейтрон



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

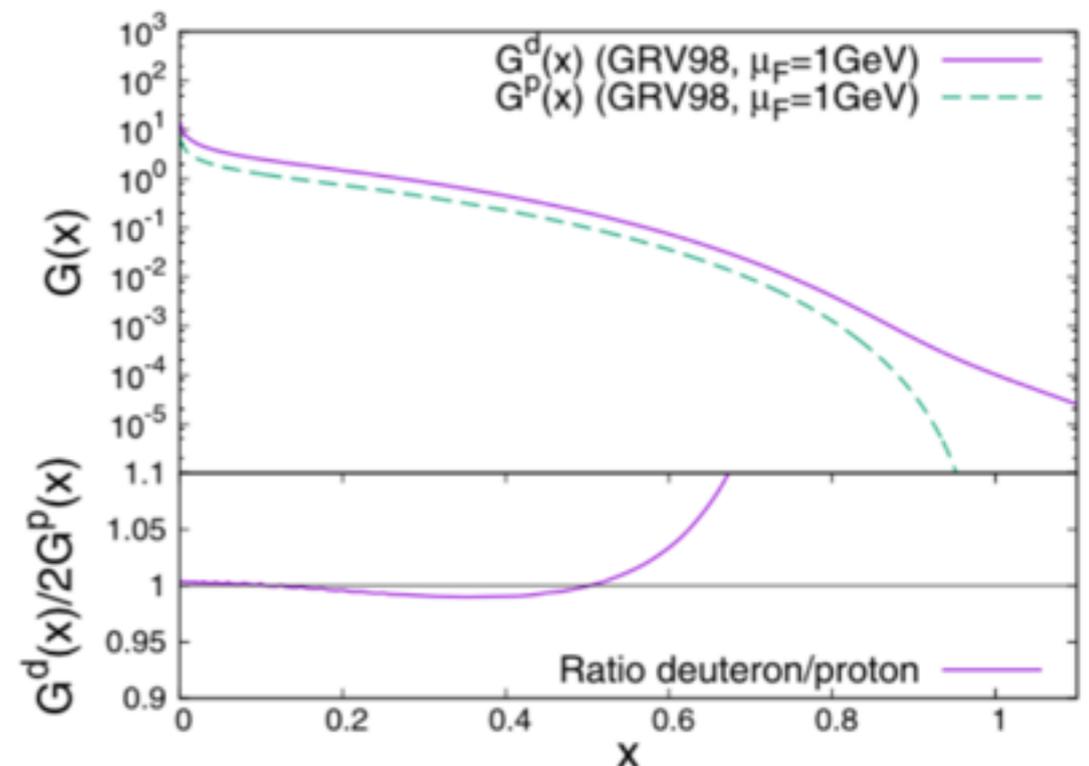
Дейтрон - это не есть просто связанное состояние протона и нейтрона!

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

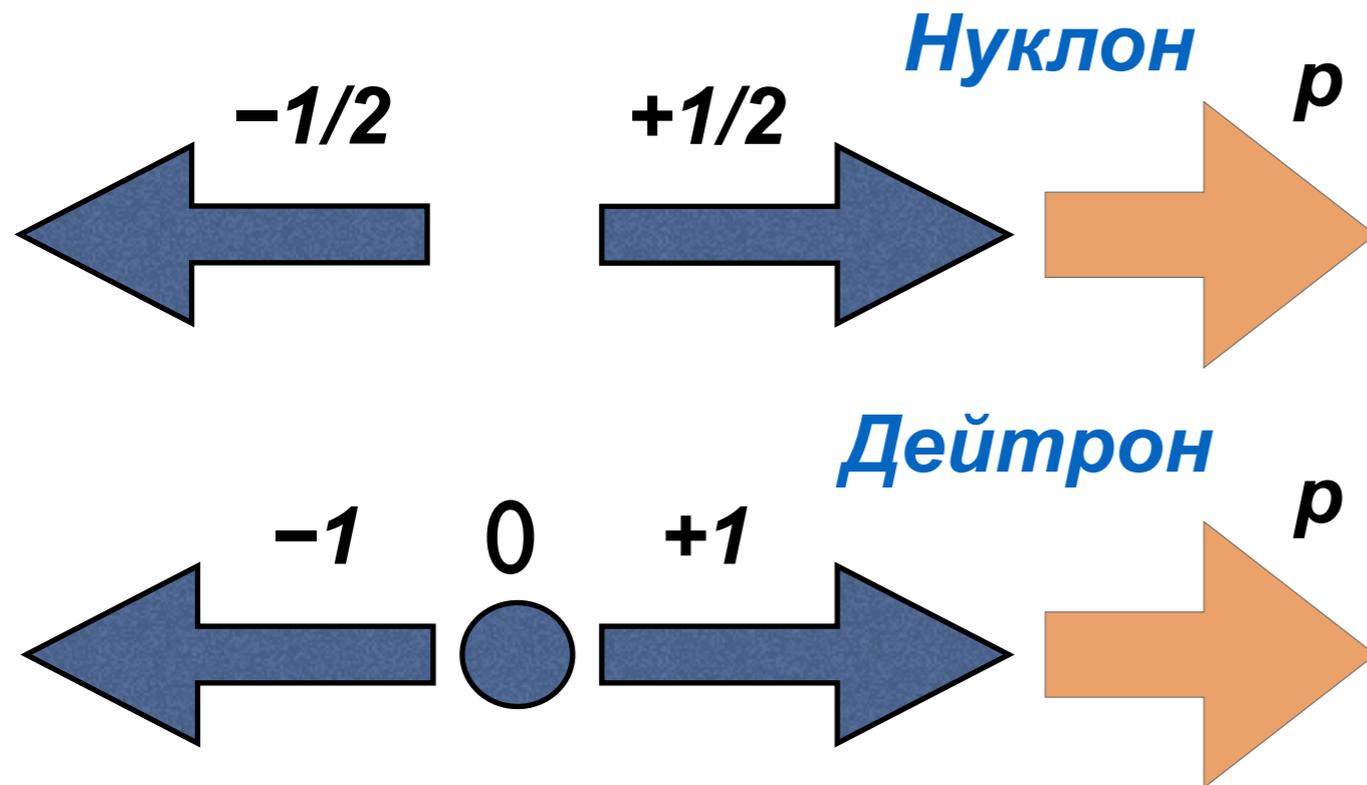
скрытый цвет

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

Больше глюонов с большим значением x



Дейтрон и спин



Векторная поляризация

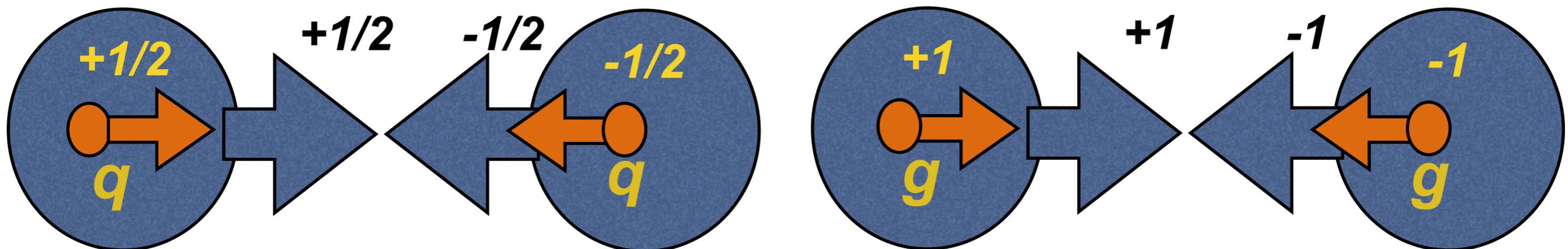
$$\frac{N_{1/2} - N_{-1/2}}{N_{1/2} + N_{-1/2}}$$

Тензорная поляризация

$$\frac{2N_0 - (N_{-1} + N_1)}{2N_0 + N_{1/2} + N_{-1/2}}$$

Новые "тензорные" PDF

Качественно новые возможности для глюонов:



**Но жёсткий процесс с
переворотом спина глюона в
нуклоне невозможен!**

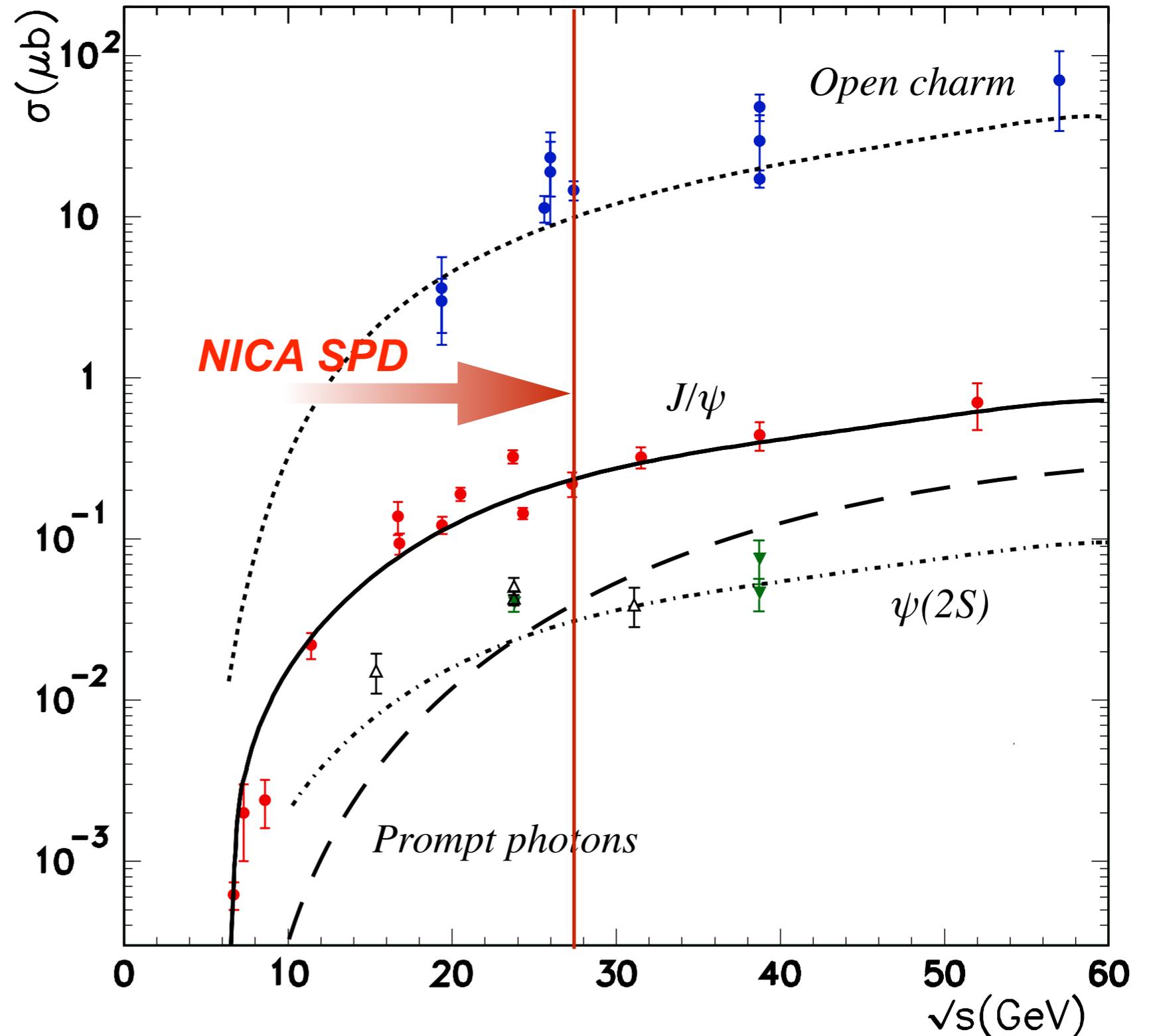
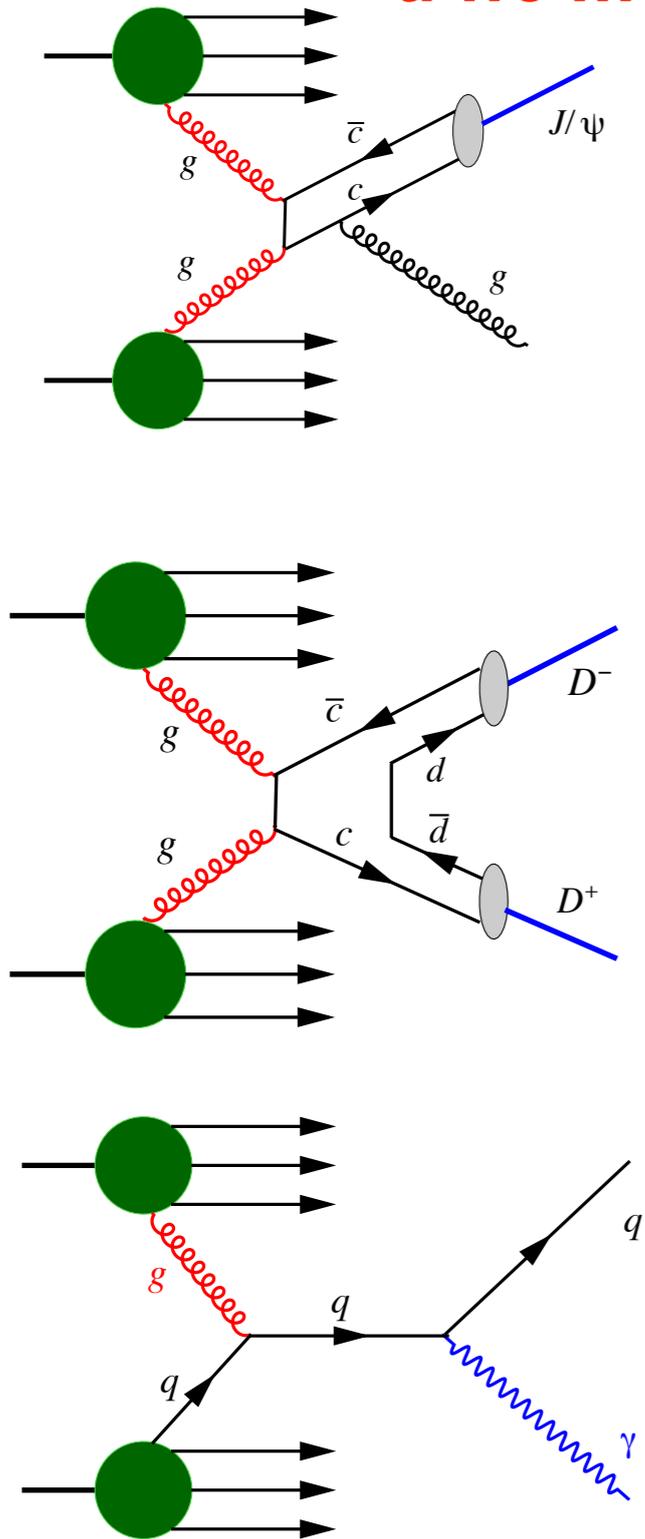
А в дейтроне возможен!

SPD на NICA



SPD - установка для комплексного изучения глюонной структуры нуклона

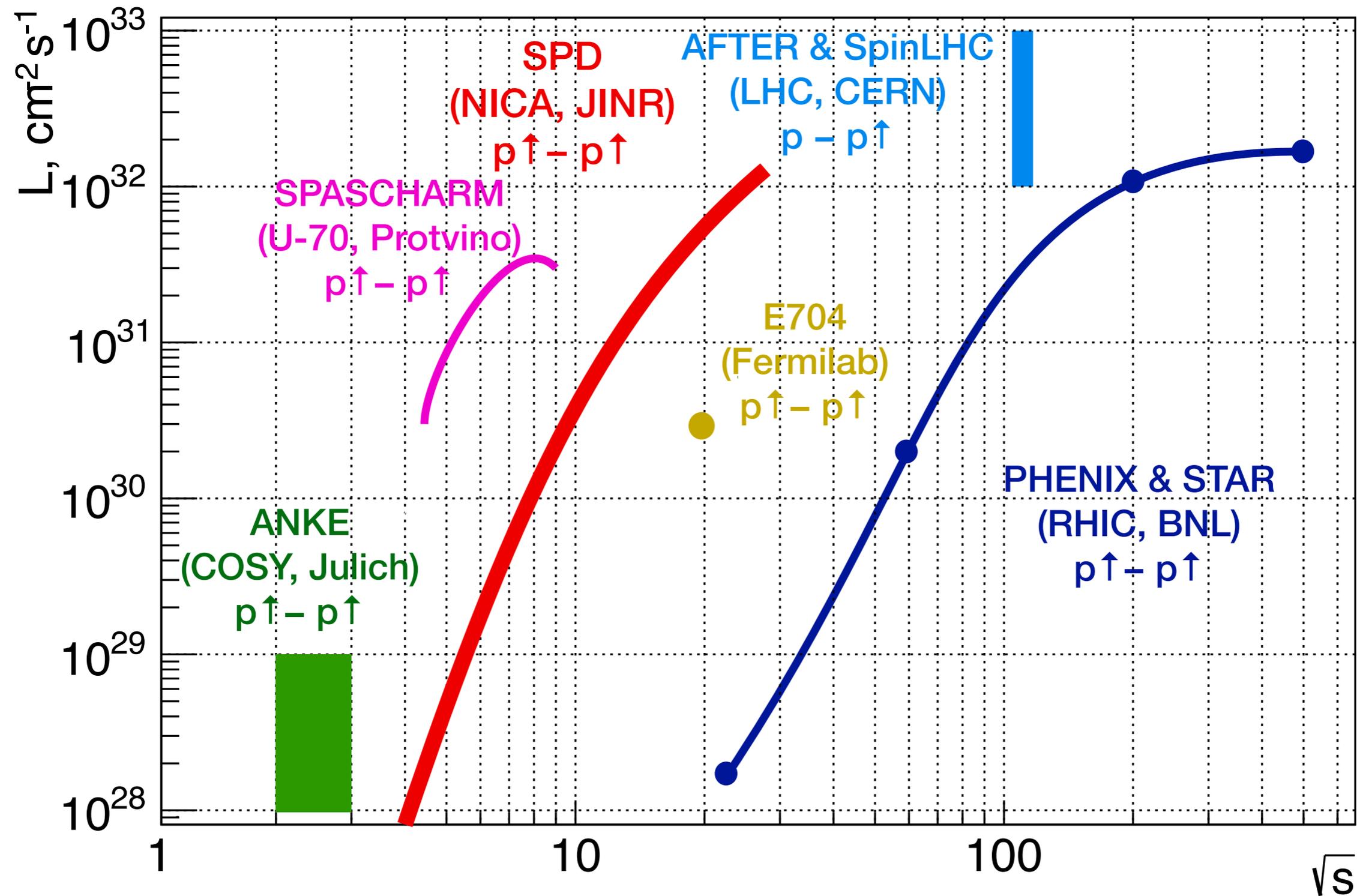
и не только J/ψ !



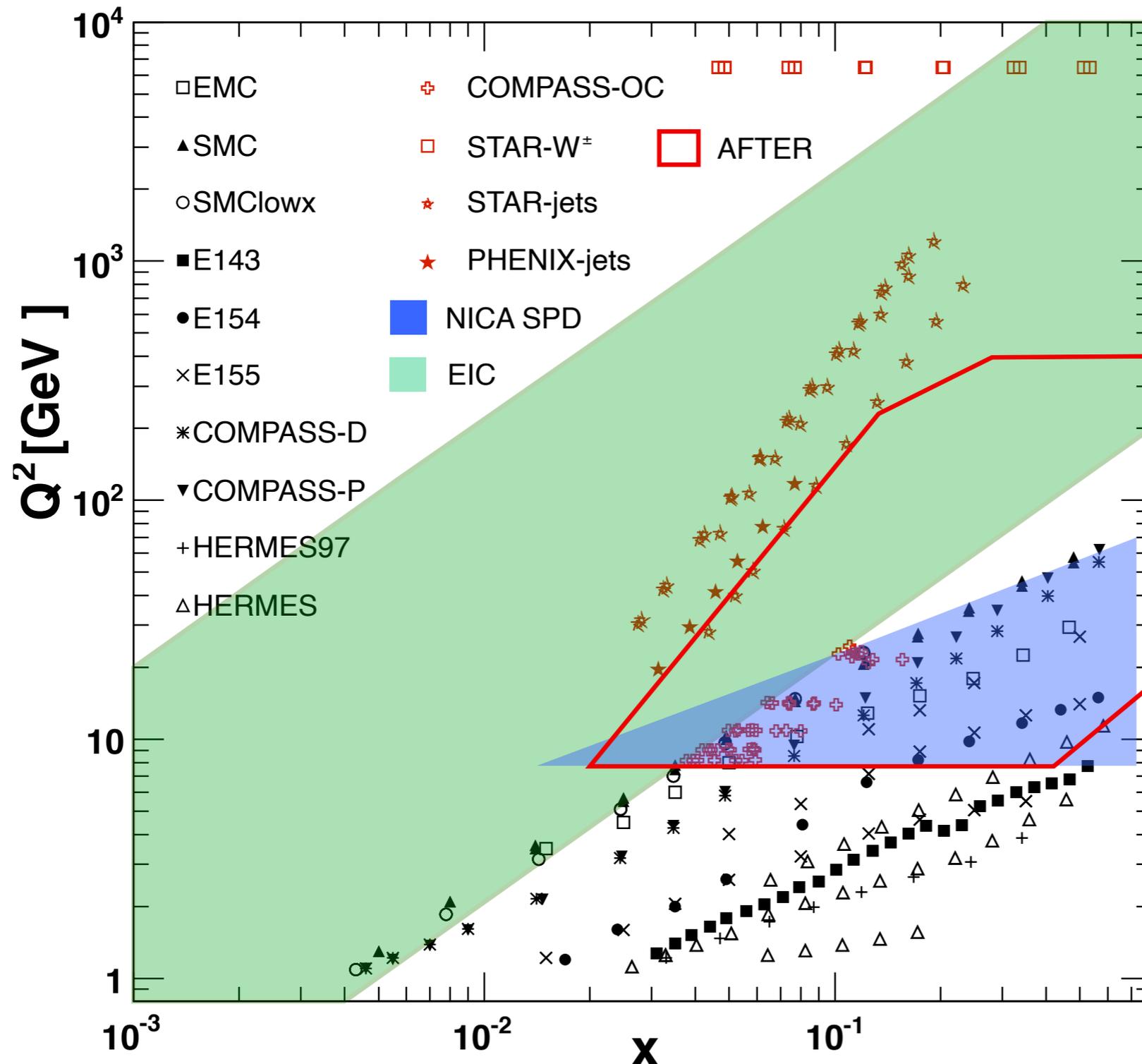
А что в мире?

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	≤ 27 ($p-p$) ≤ 13.5 ($d-d$) ≤ 19 ($p-d$)	63, 200, 500	20-140 (ep)	115	115
Max. luminosity, $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	~ 1 ($p-p$) ~ 0.1 ($d-d$)	2	1000	up to ~ 10 ($p-p$)	4.7
Physics run	>2025	running	>2030	>2025	>2025

А что в мире?

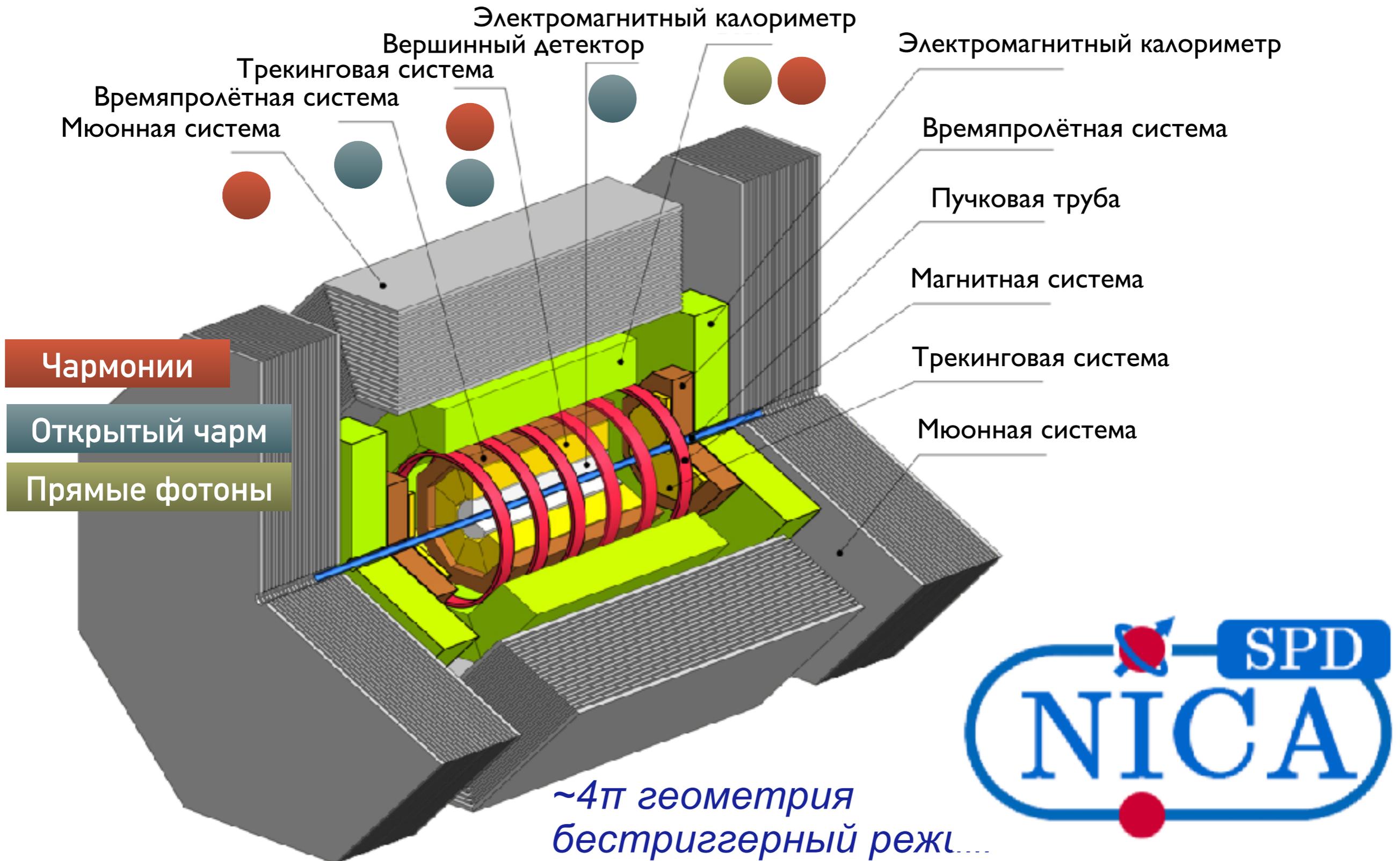


Кинематическая область



Область, в которой
готовится работать
SPD, никогда
систематически не
изучалась в адронных
взаимодействиях

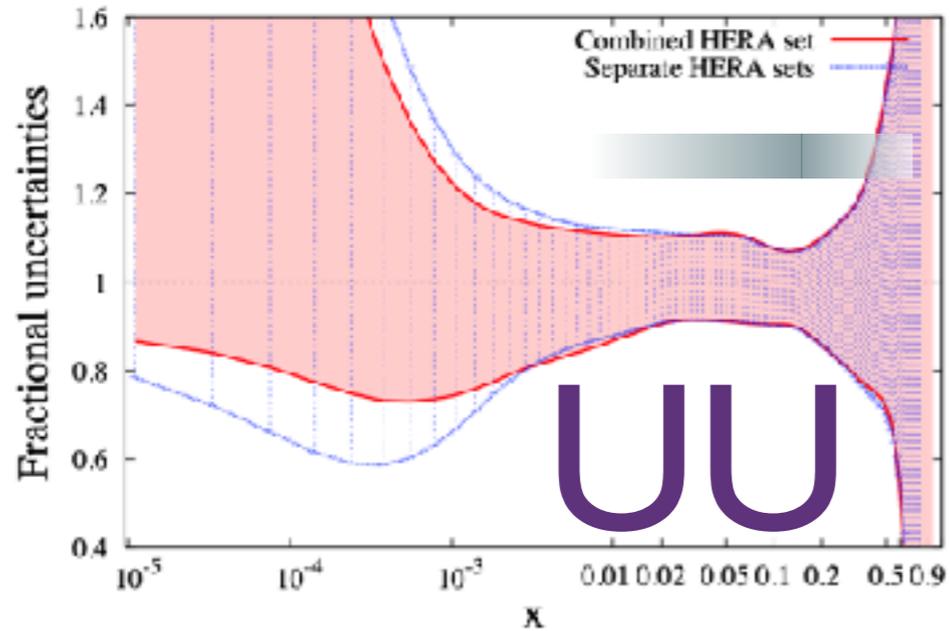
Концепция детектора SPD



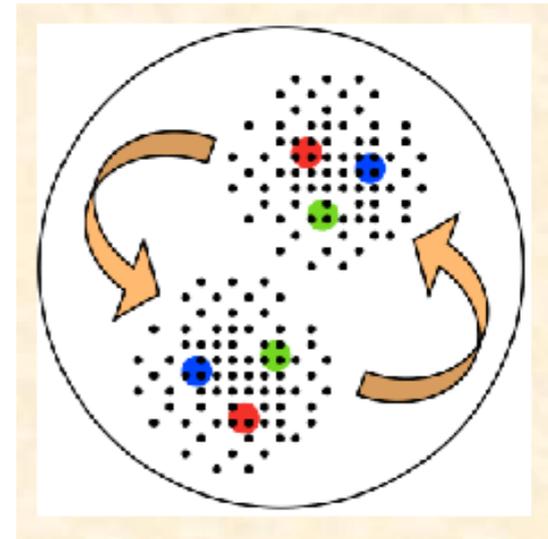
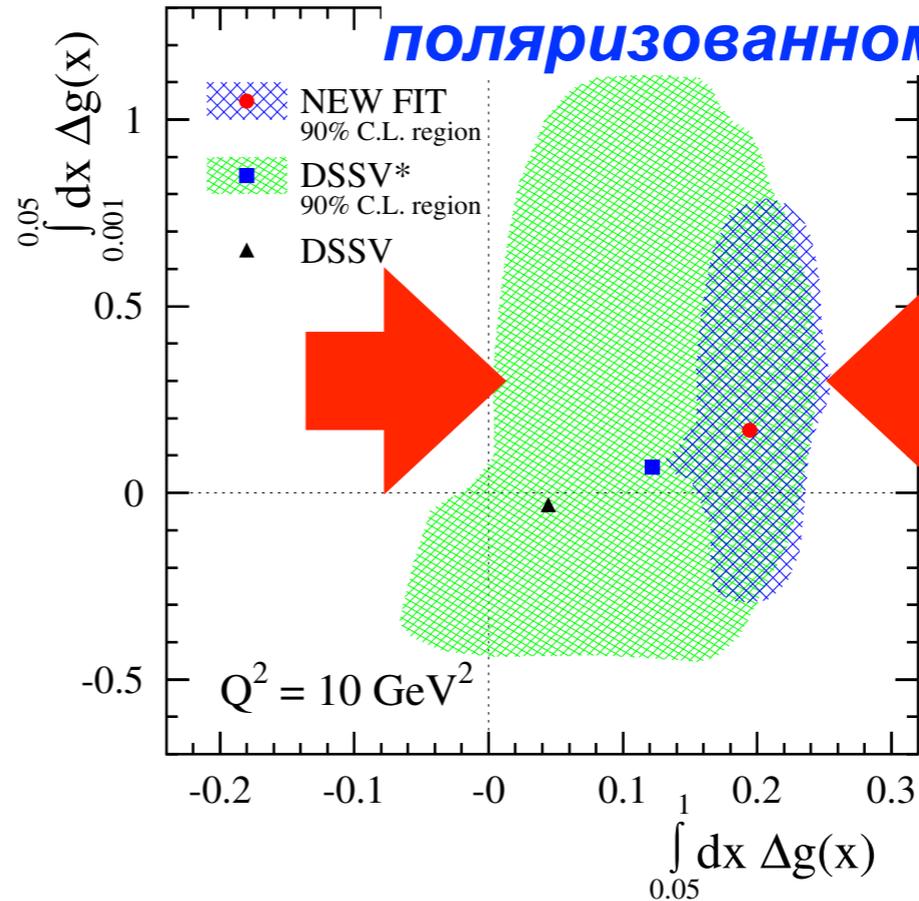
Что можно изучать на SPD?

Неполяризованные глюонные распределения при больших x в протоне

$g(x, \mu)$ at $\mu = 2$ GeV

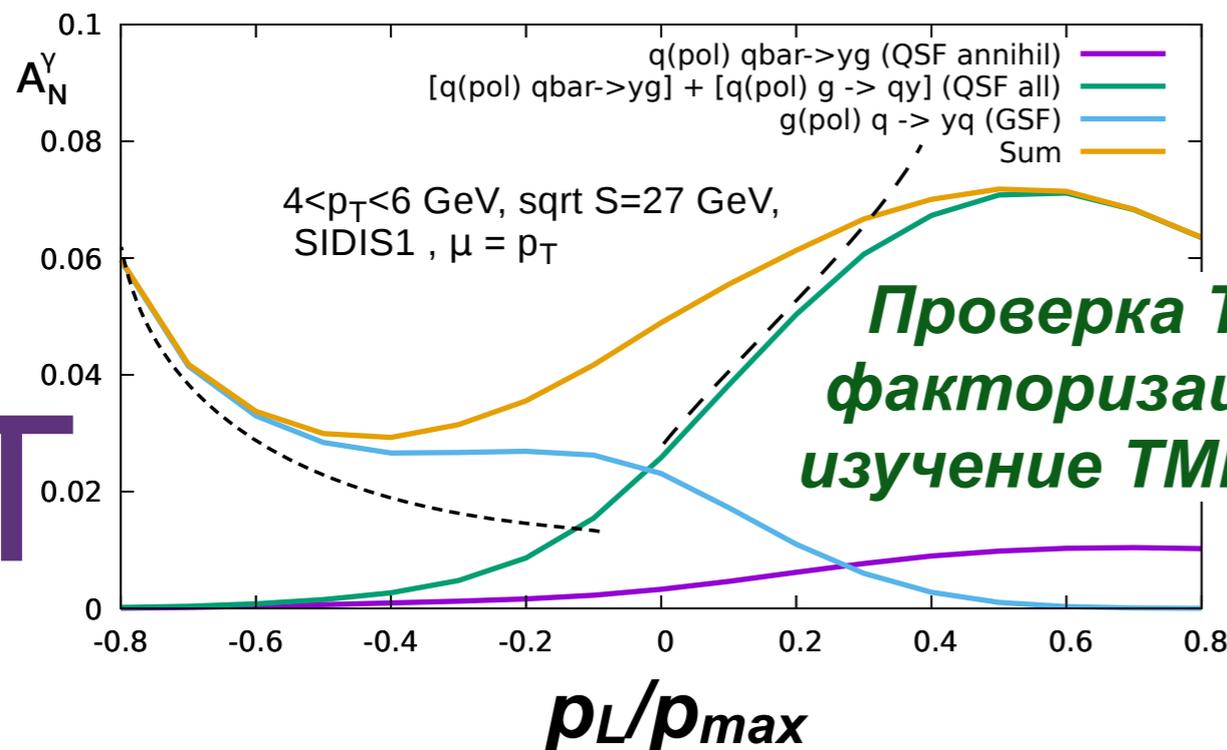


Поляризация глюонов в продольно поляризованном протоне



Ненуклонная структура дейтрона, процессы с переворотом спина глюона

UU, TT

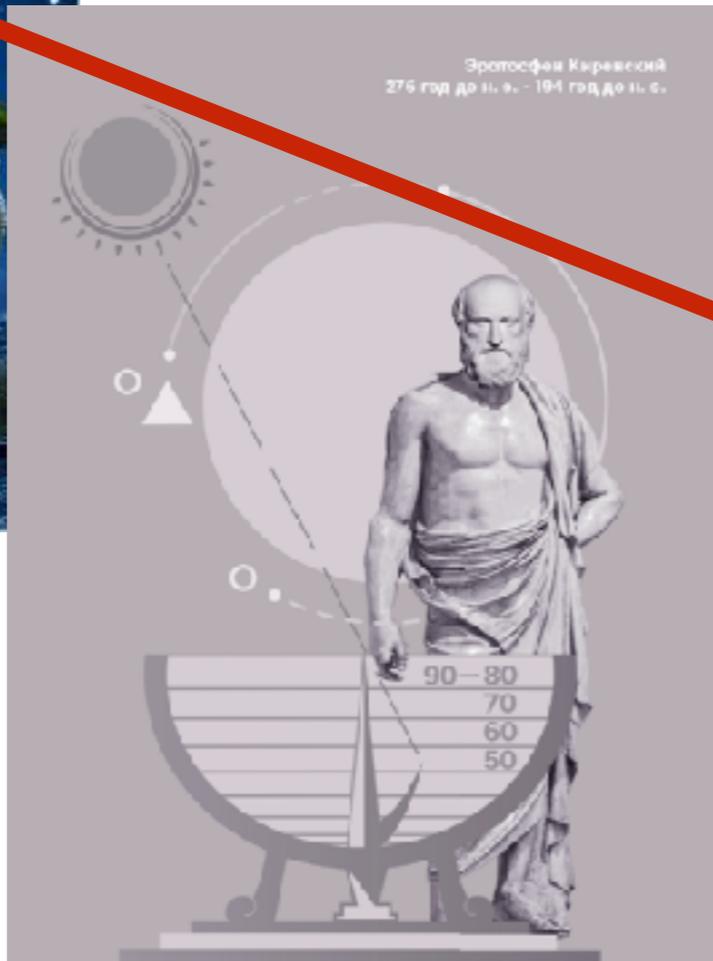


Проверка TMD факторизации и изучение TMD PDF

Эволюция знаний

Наивные представления

**Земля - шар!
II век до н. э.**



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



Дрейф материков, 1912 г

Заключение

*Точка в изучении внутренней структуры нуклонов не поставлена. Этот раздел физики частиц ждёт новых исследователей, как теоретиков, так и экспериментаторов. Будущий эксперимент **SPD** на коллайдере **NICA***

