

Спин протона и эксперимент SPD

А. Гуськов

avg@jinr.ru

Спин как могильщик теорий

Данные поляризационных экспериментов часто становились кладбищем модных теорий. Если бы теоретики могли, они, пожалуй, вообще запретили бы такие измерения — из соображений самозащиты. **Дж. Бьёркен (1987)**



1925: юбилей спина

Zuschriften und vorläufige Mitteilungen.

Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons.

§ 1. Bekanntlich kann man die Struktur und das magnetische Verhalten der Spektren eingehend beschreiben mit Hilfe des LANDÉschen Vektormodelles R, K, J und m[1]). Hierin bezeichnet R das Impulsmoment des Atomrestes — d. h. des Atoms ohne das Leuchtelektron — K das Impulsmoment des Leuchtelektrons, J ihre Resultante und m die Projektion von J auf die Richtung eines äußeren Magnetfeldes, alle in den gebräuchlichen Quanteneinheiten ausgedrückt. Man muß dann in diesem Modell annehmen:

a) daß für den Atomrest das Verhältnis des magnetischen Momentes zum mechanischen doppelt so groß ist, als man klassisch erwarten würde.

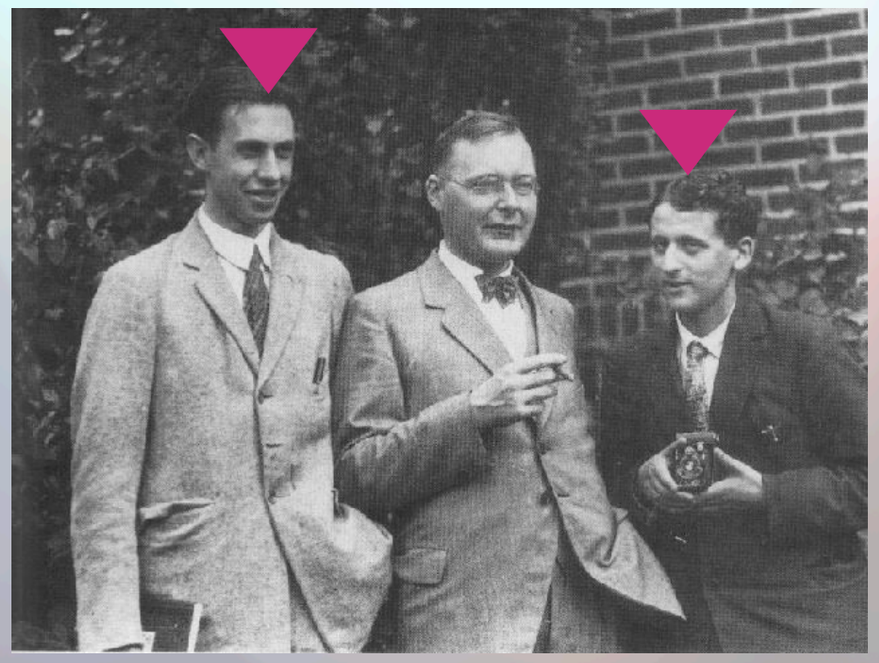
b) daß in den Formeln, wo R^2, K^2, J^2 auftritt, man diese durch $R^2 - \frac{1}{4}$, $K^2 - \frac{1}{4}$, $J^2 - \frac{1}{4}$ ersetzen muß. [Die HEISENBERGsche Mitteilung[1])].

Dieses Modell hat sich äußerst fruchtbar gezeigt und hat u. a. geführt zur Entwirrung der verwickeltesten Spektren.

§ 2. Man stößt aber auf Schwierigkeiten, sobald man versucht, das LANDÉsche Vektormodell anzuschließen

[1]) Siehe E. BACK und A. LANDÉ, ZEEMANeffekt und Multiplettstruktur der Spektrallinien.

[1]) W. HEISENBERG, Zeitschr. f. Phys. **26**, 291. 1925.



G. E. UHLENBECK und S. GOUDSMIT.
Leiden, den 17. Oktober 1925.
Instituut voor Theoretische Natuurkunde.

“… Ваша идея может быть ошибочной, но поскольку вы оба молоды и не имеете никакой научной репутации, вы ничего не потеряете, совершив глупую ошибку."

П. Эренфест

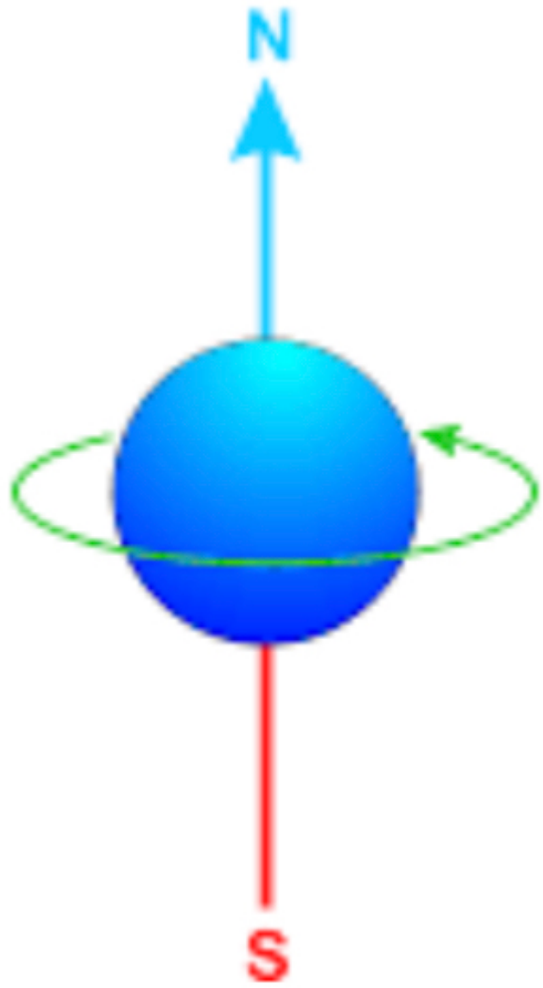
Спин как классический момент импульса

$$\frac{\hbar}{2} = \frac{2}{5} m R v$$

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34}\ J \cdot s$$

$$m = 9.11 \times 10^{-31}\ kg$$

$$R = 2.82 \times 10^{-15}\ m$$



$$v = 5.1 \times 10^{10}\ m/s = \boxed{170 \cdot c}$$

Уравнения Паули и Дирака

Уравнение Паули

1927

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi$$

$$\psi = \begin{pmatrix}\psi_+\\ \psi_-\end{pmatrix}.$$ - спин постулируется

Уравнение Дирака:

1928

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = \left(c\boldsymbol{\alpha}\cdot\hat{\mathbf{p}} + \beta mc^2\right)\psi$$

Уравнение Дирака естественным образом предсказало существование спина электрона как “внутреннего” момента импульса

electron, spin “up”

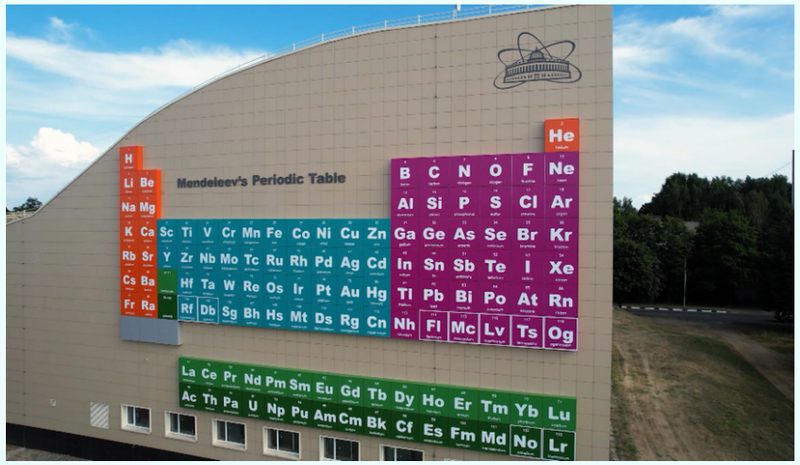
$$u^{(1)}(p) = \sqrt{E+m}\begin{pmatrix}1\\ 0\\ \frac{p_z}{E+m}\\ \frac{p_x+ip_y}{E+m}\end{pmatrix}$$

electron, spin “down”

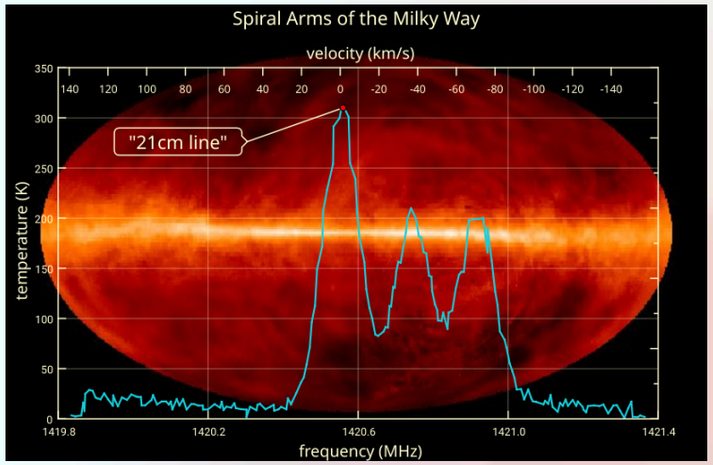
$$u^{(2)}(p) = \sqrt{E+m}\begin{pmatrix}0\\ 1\\ \frac{p_x-ip_y}{E+m}\\ \frac{-p_z}{E+m}\end{pmatrix}$$

1925: юбилей спина

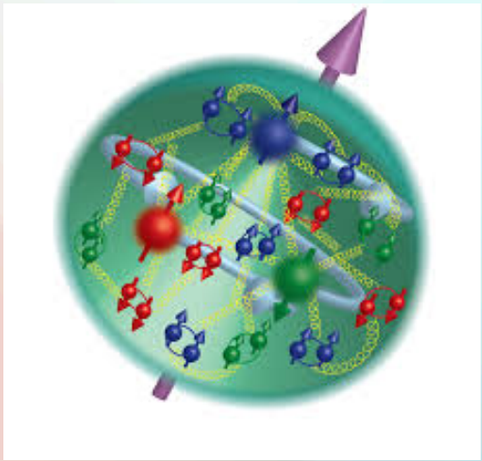
Понимание периодического закона



Астрономия на 21 см



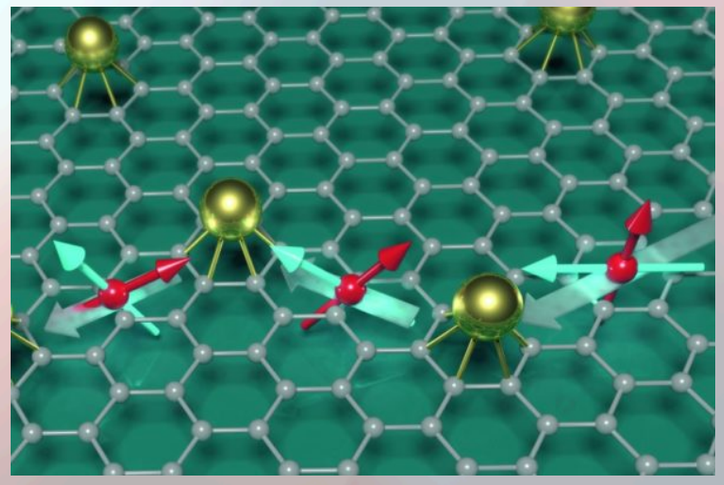
Структура нуклона



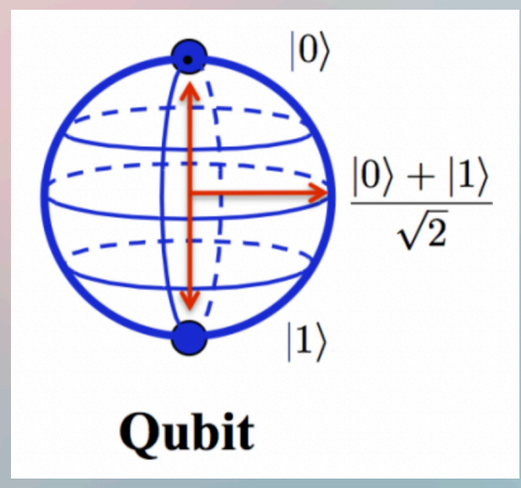
МРТ



Спинтроника

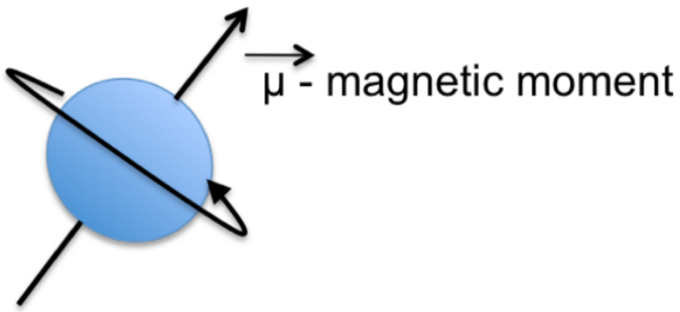


Квантовые вычисления



Заглядывая ещё на 100 лет вперёд, трудно представить, что спин снова не сыграет решающей роли в научных открытиях!

Сложность нуклонов



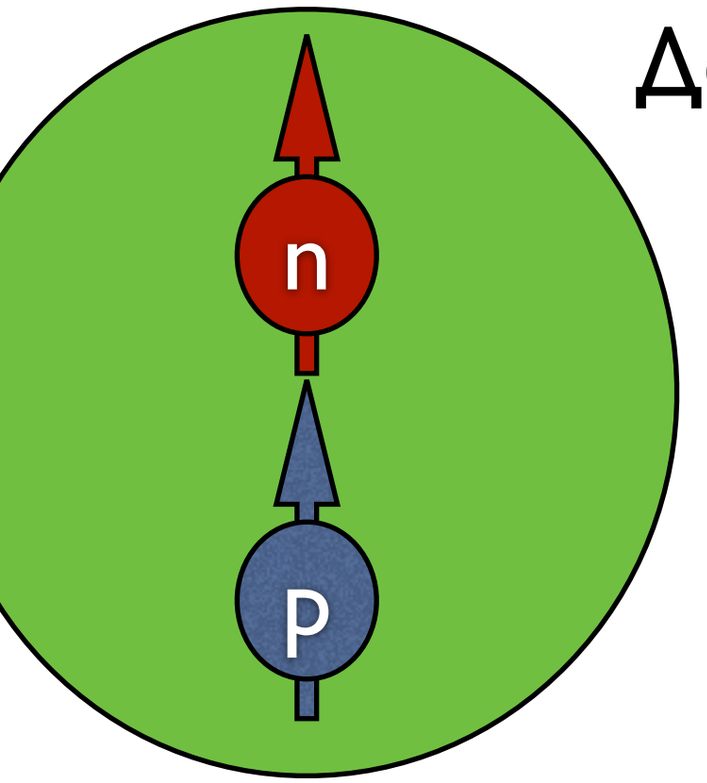
$$\vec{\mu}_S = g_S \times \frac{e}{2m} \times \vec{S}$$

	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.

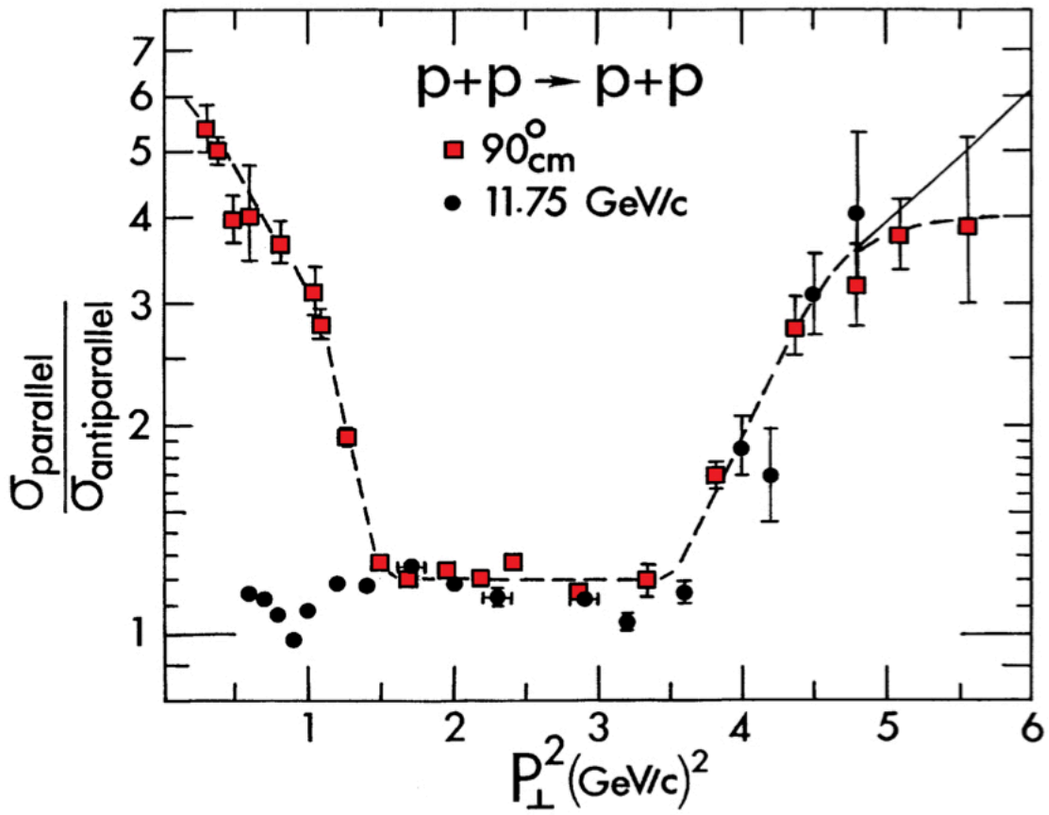
Спин-зависимость ядерных сил



Дейтрон

Упругое p-p рассеяние 12 ГэВ

$$\sigma_{\uparrow\uparrow}/\sigma_{\uparrow\downarrow}$$



Поляризация: эксперимент

1950е: Динамическая ядерная поляризация (Эффект Оверхауэра и т. д.)
1960е : Первые проляризованные мишени
1962: Поляризованный протонный пучок 20 МэВ и поляризованная мишень (Saclay)
1973: 12 GeV поляризованный протонный пучок на ZGS (ANL)
1978-79: Первые эксперименты по поляризованному ГНР (SLAC)
1986: 4.5 ГэВ/нуклон поляризованный дейтронный пучок в ОИЯИ
1980е-сегодня: Серия экспериментов по поляризованному ГНР в CERN (EMC-SMC-NMC-COMPASS)
1986: Протонный спиновый кризис
1995-2007: Эксперимент HERMES в DESY по поляризованному ГНР
2000-2026: Первый коллайдер прляризованных протонов - RHIC

Spin Physic Detector @ NICA

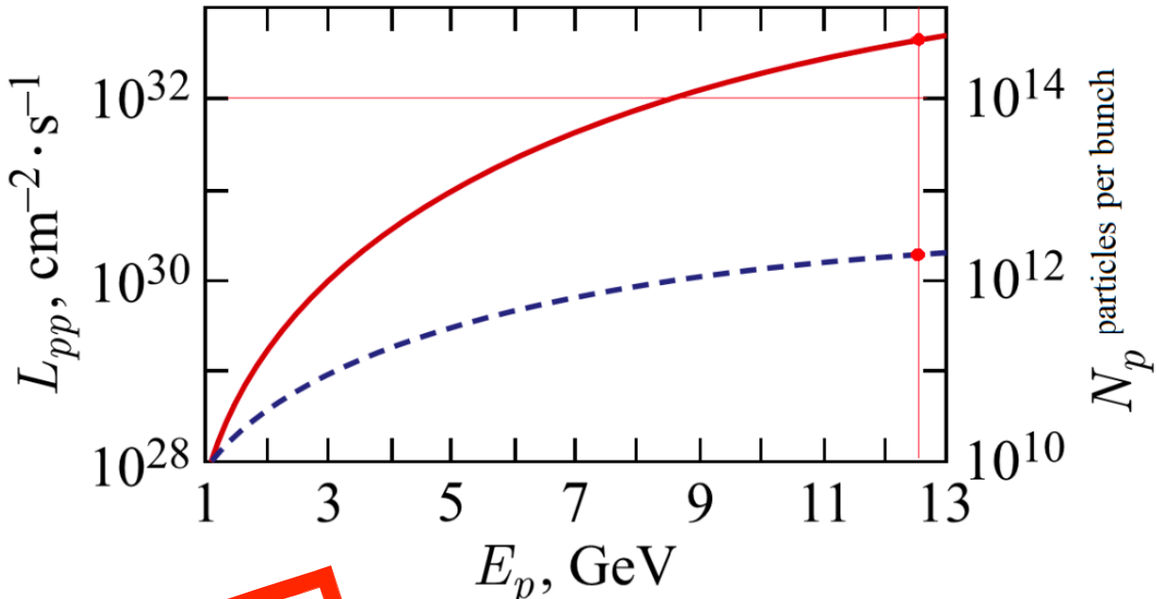
NICA - Nuclotron-based Ion Collider fAcility

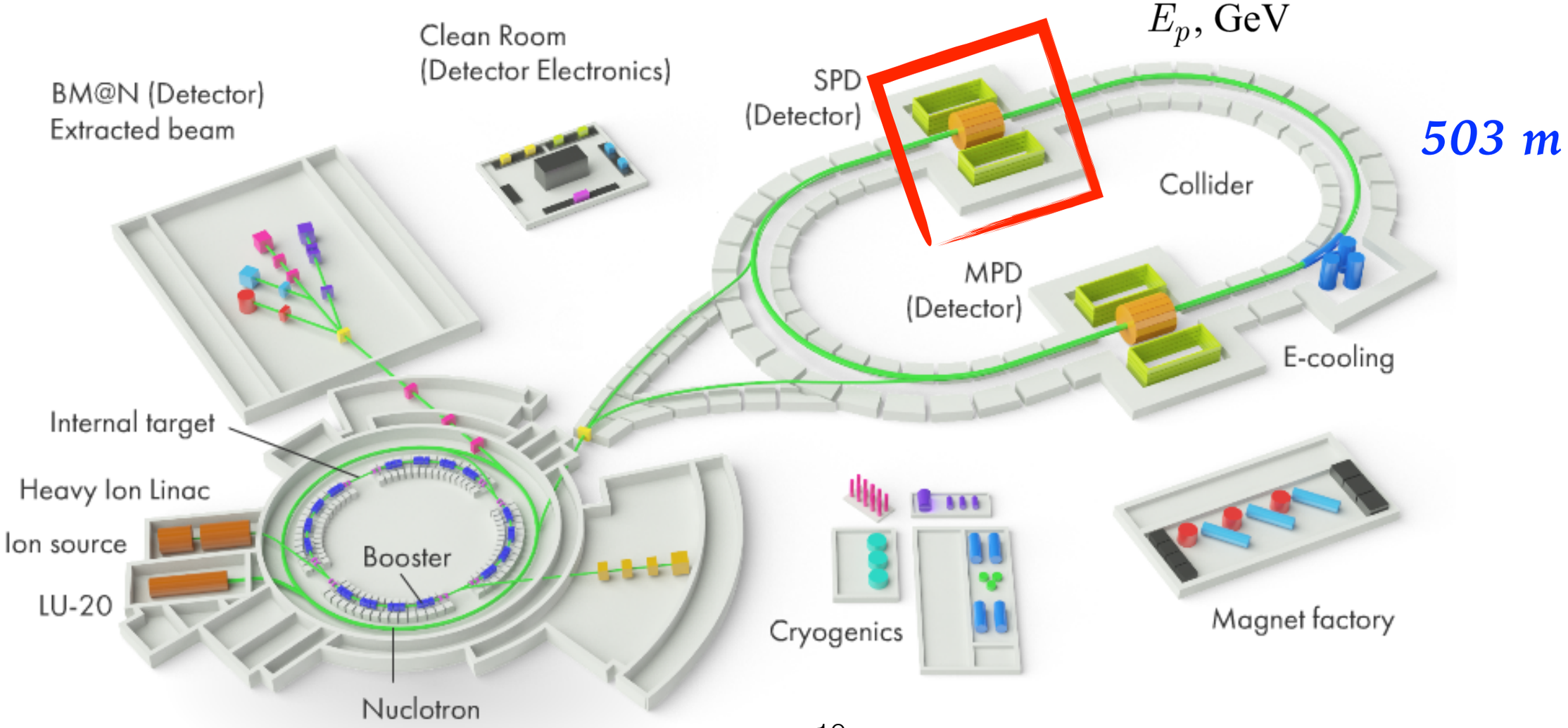
$p^{\uparrow}p^{\uparrow} : \sqrt{s} \leq 27\ GeV$

$d^{\uparrow}d^{\uparrow} : \sqrt{s} \leq 13.5\ GeV$

U, L, T

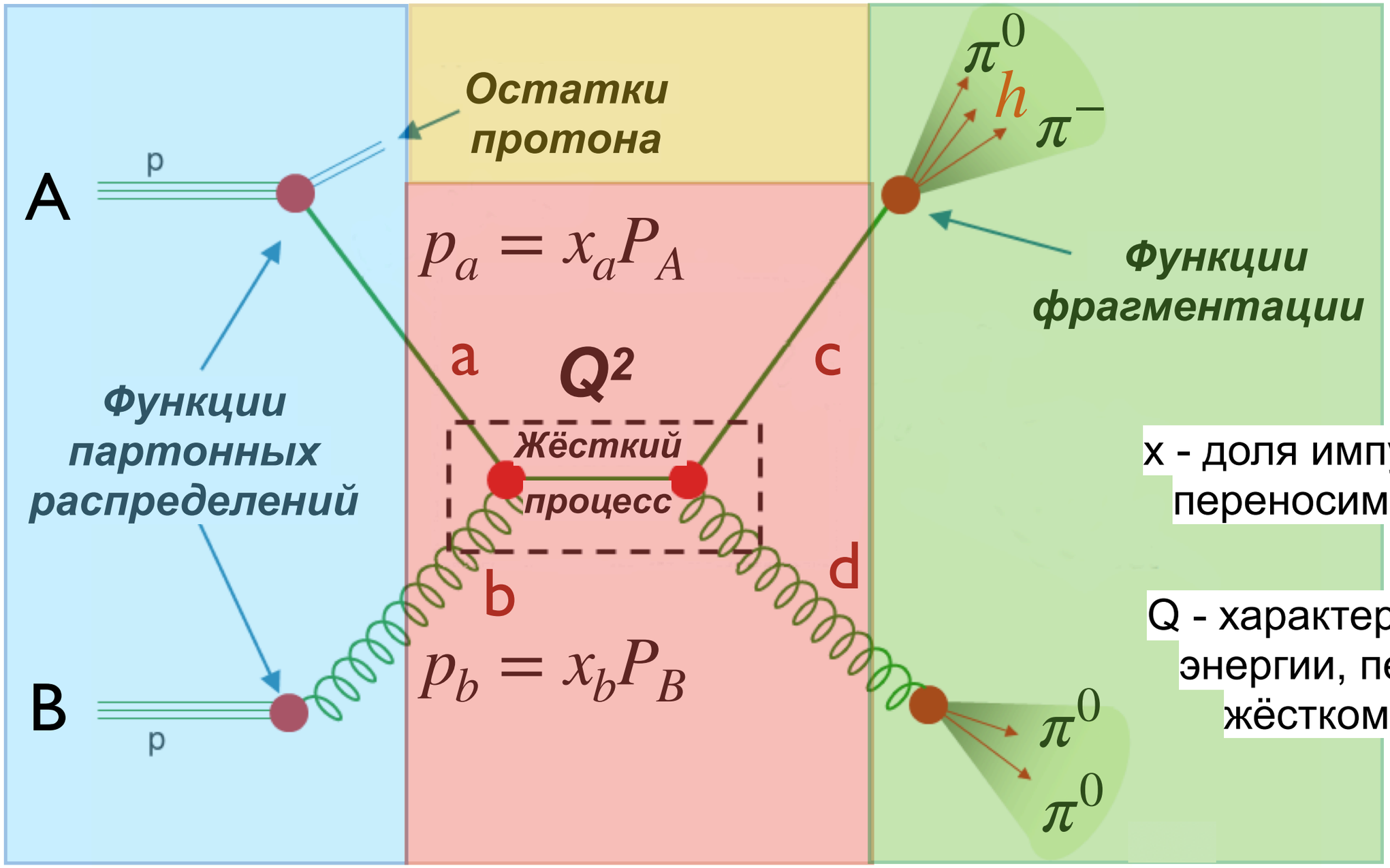
$|P| > 70\%$





503 m

Теорема о факторизации



x - доля импульса адрона, переносимая партоном

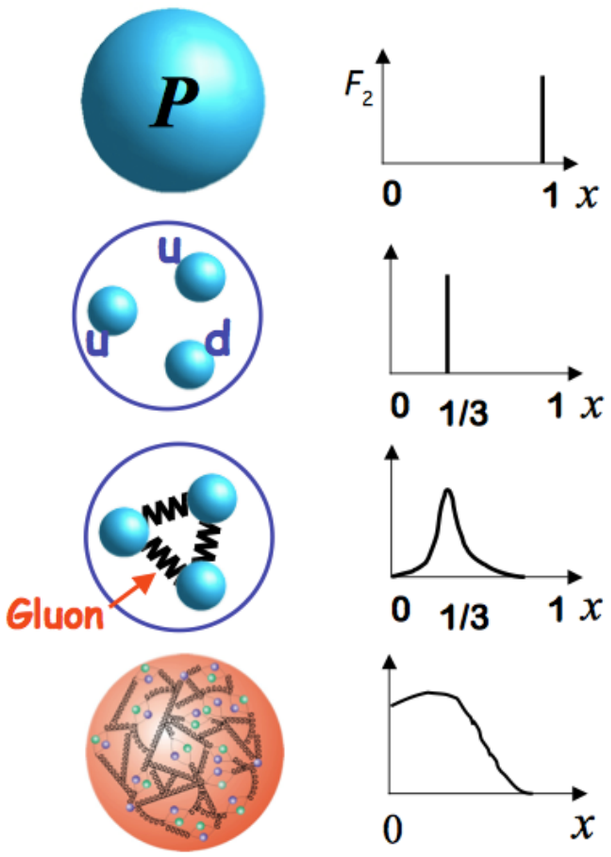
Q - характерный масштаб энергии, переданной в жёстком процессе

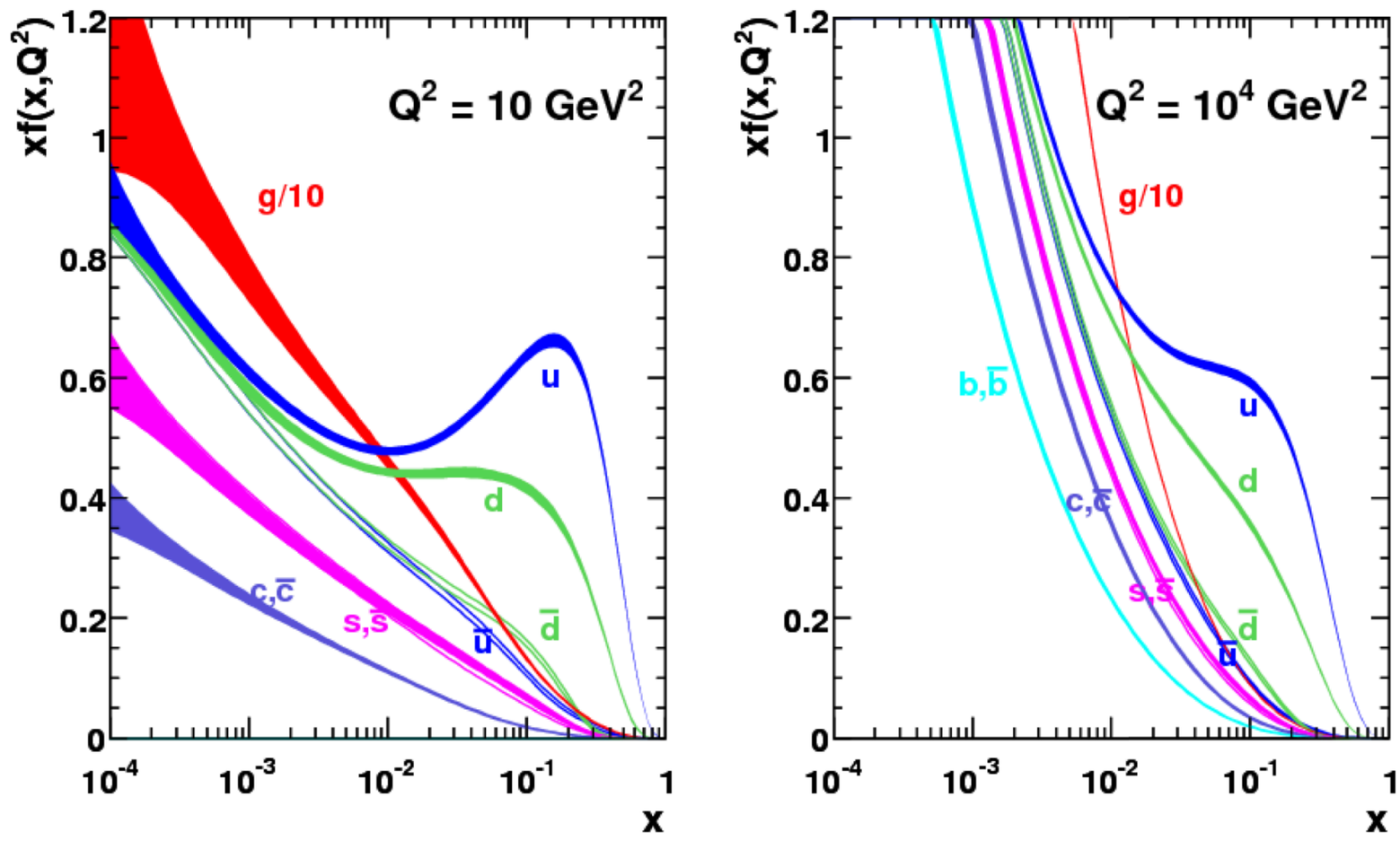
$$\sigma_{AB\to hX} = \sum_{a,b=q,\bar{q},g} \int dx_a dx_b f(x_a, Q^2) f(x_b, Q^2) \times \hat{\sigma}_{ab\to cd}(x_a, x_b, Q^2) \times D_{cd\to h}$$

$Q^2 >> 1\ GeV^2/c^2$

Партонная структура адронов

Функции партонных распределений $f(x,Q^2)$ описывают вероятность при данном Q^2 найти внутри адрона партон, несущий долю импульса x





Морские кварки и глюоны становятся более значимы при больших Q^2

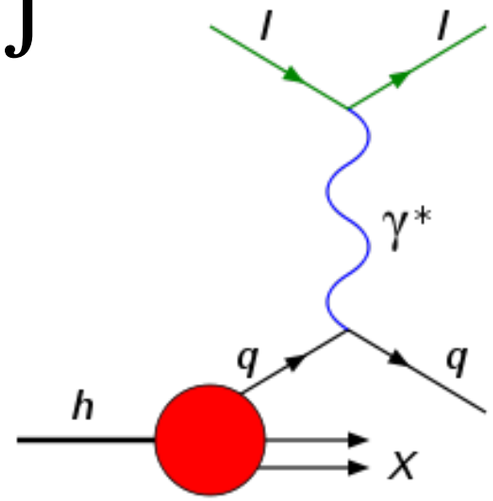
Уравнения эволюции: $f(x, Q_1^2) \rightarrow f(x, Q_2^2)$

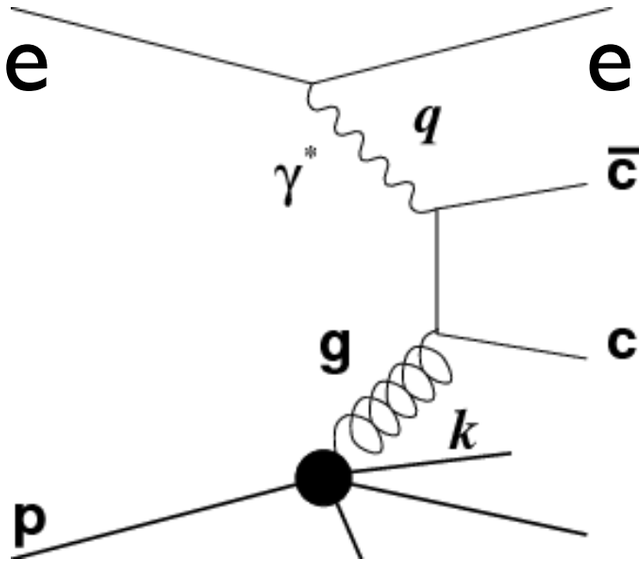
Партонные распределения универсальны и не зависят от жёсткого процесса!

А откуда берут PDF ?

Глубоко неупругое рассеяние (ГНР)

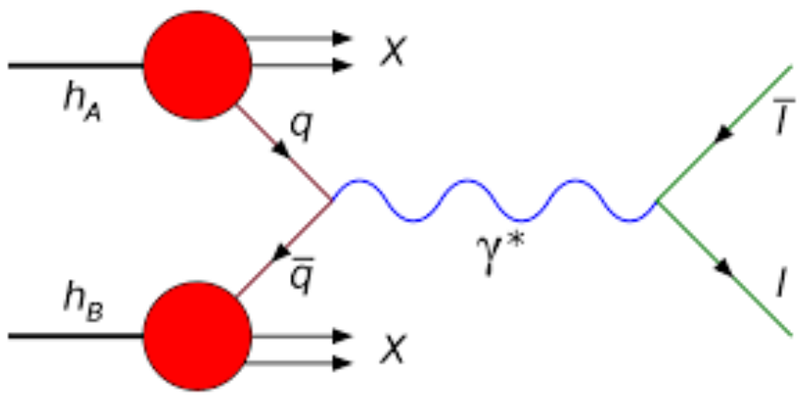
$$\sigma = \int \hat{\sigma} q(x) dx$$

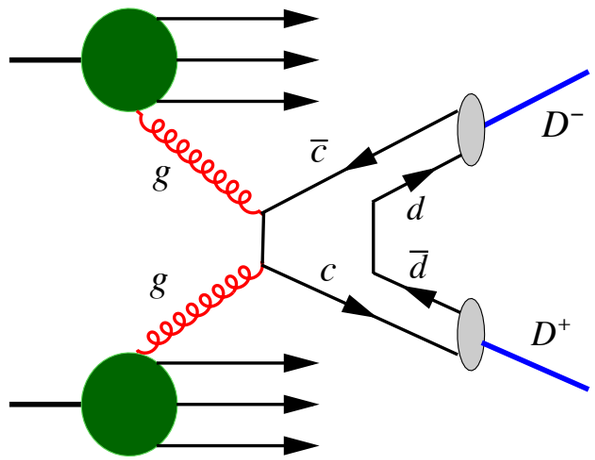




Адронные взаимодействия

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

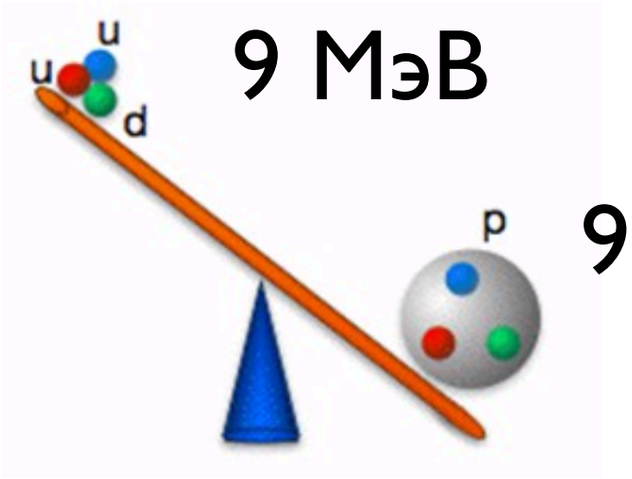




CTEQ Collaboration
JAM Collaboration
DSSV Collaboration
NNPDF Collaboration

…

Масса протона



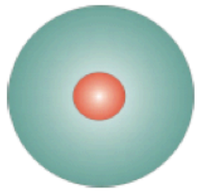
Механизм Хиггса практически не причастен к формированию масс адронов!



Глюоны важнее кварков!

Поляризованный протон

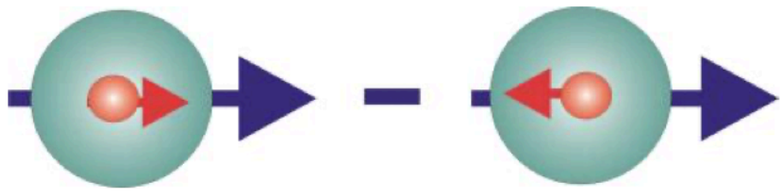
f(x)



Неполяризованные PDF

Сечение

Δf(x)

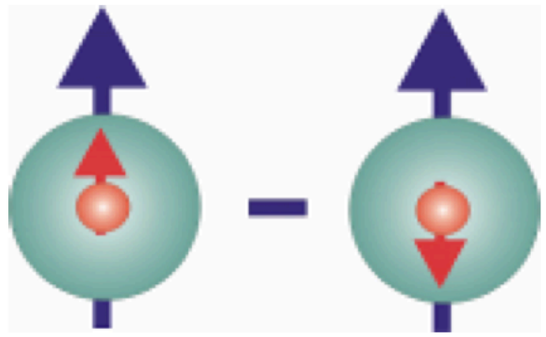


Спиральность

Асимметрии сечений

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

$\Delta_T f(x)$



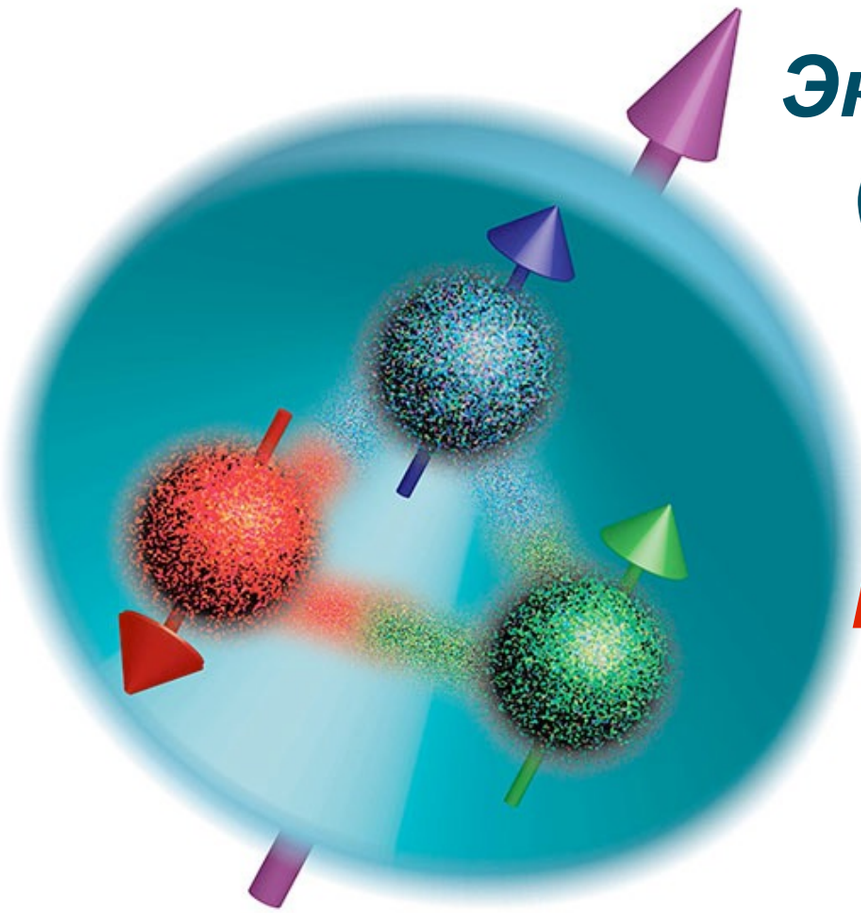
Поперечность

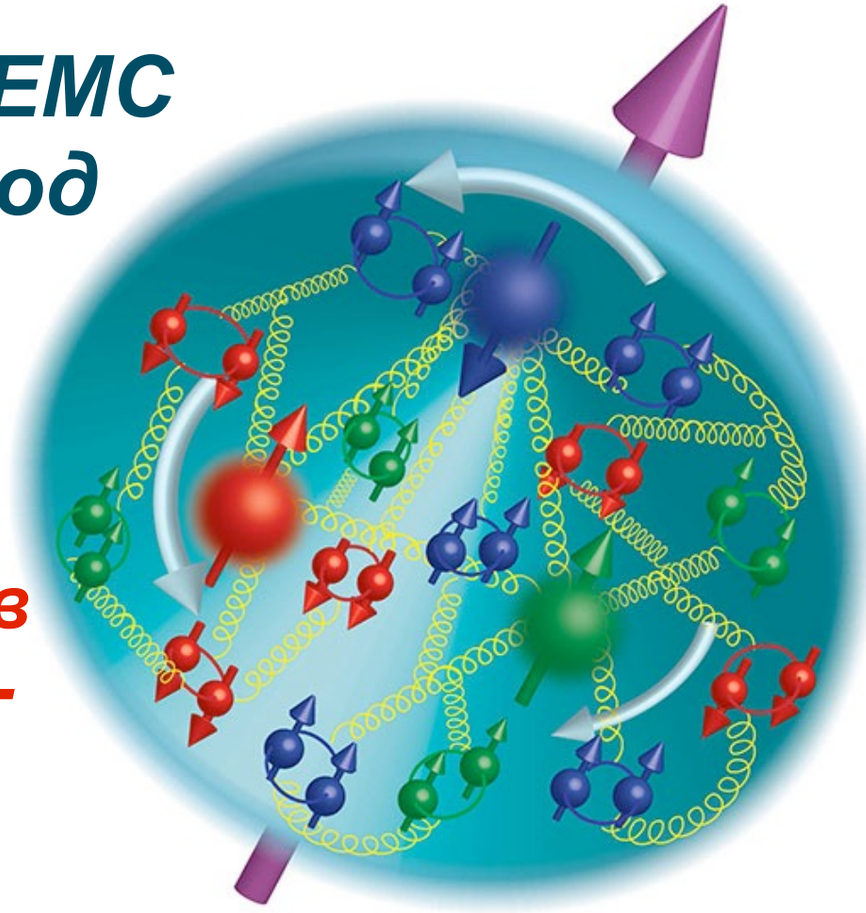
Азимутальные асимметрии в рождении частиц

P

Спиновый кризис

Эксперимент EMC (ЦЕРН) 1988 год





Вклад кварков в спин протона - не более 30% !

Наивная кварковая модель

$$\frac{1}{2} = \sum_{q=u,u,d} (\frac{\vec{1}}{2})$$

Реальная ситуация

L - орбитальные моменты кварков и глюонов

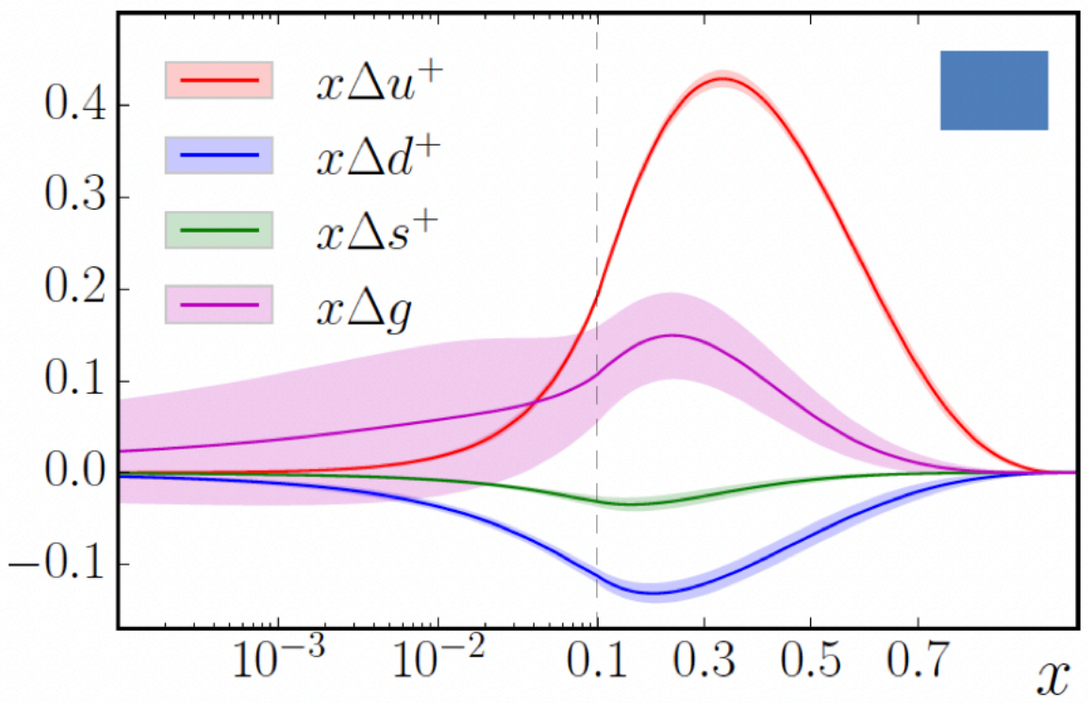
$$S_N = ½ = ½\,\Delta\Sigma + \Delta G + L$$

Спиновый кризис

$$J = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q^{?} + L_g^{?}$$

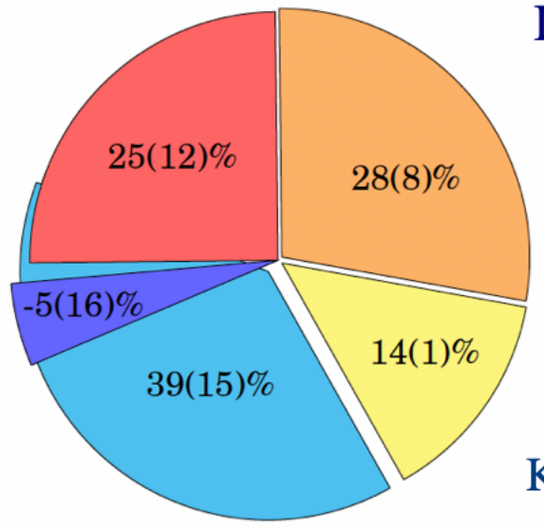
~30%

~10-20%



JAM Collaboration, PRD (2016).

Чтобы получить доступ к моментам импульса, мы должны изучить **трёхмерную** структуру нуклона!

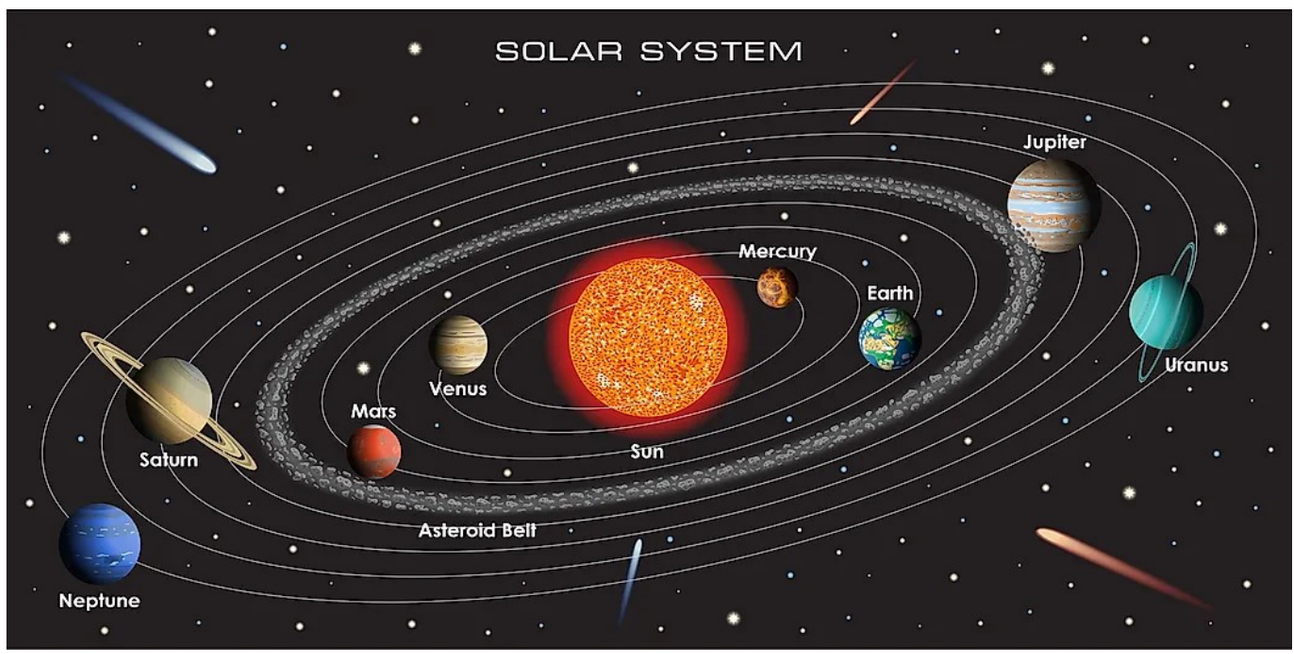


Lattice QCD

- L^u (CI + DI)
- L^d (CI + DI)
- L^s (DI)
- J^g
- $\frac{\Delta\Sigma}{2}\Big|^{u+d+s}$

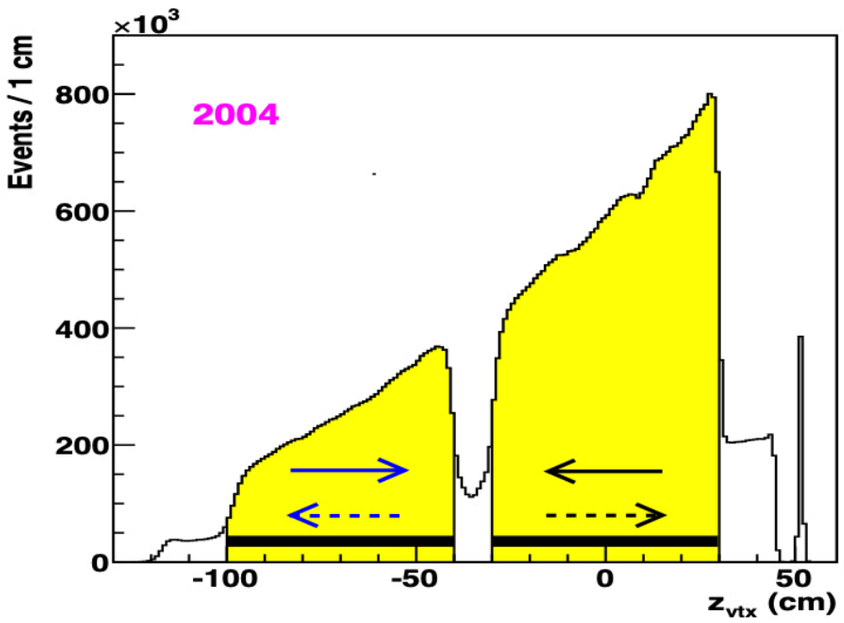
K.-F. Liu, NP A928, 99 (2014).

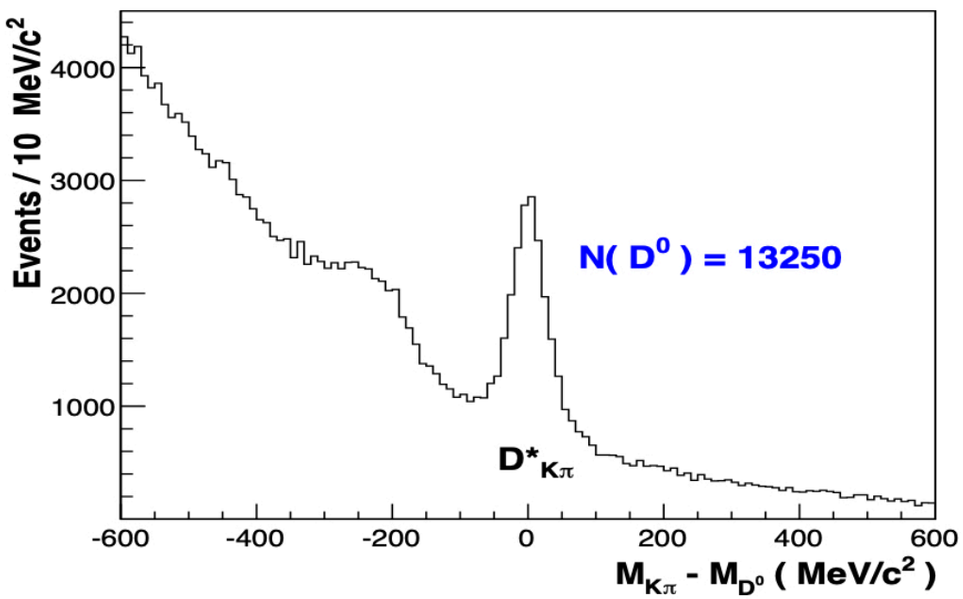
Для Солнечной Системы



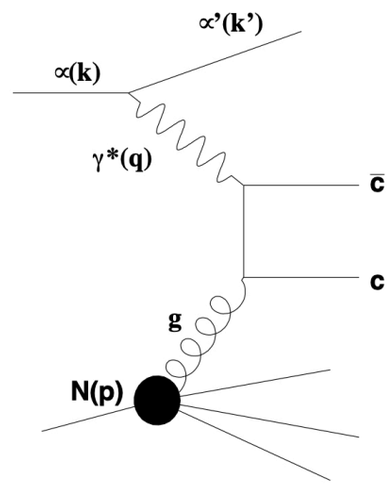
98% - орбитальный момент

Пример (COMPASS, Δg/g)

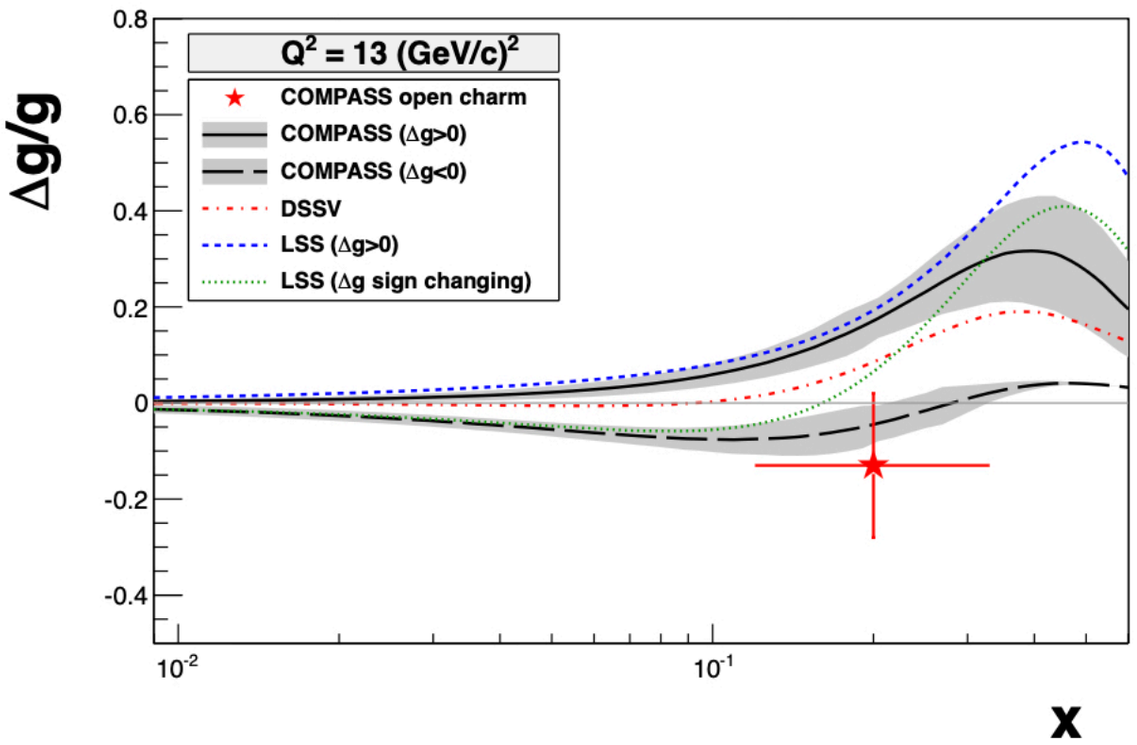




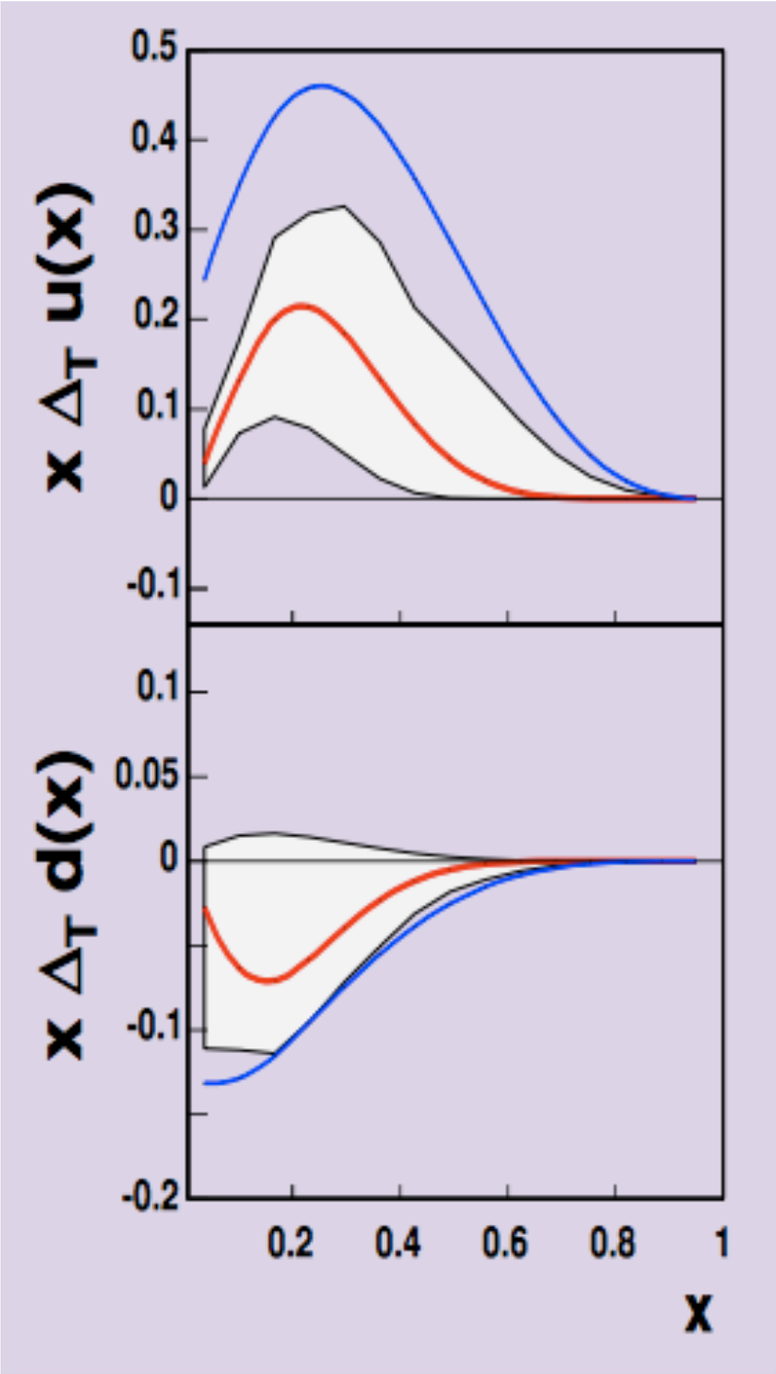
$$LL = \frac{\sigma^{++} - \sigma^{+-}}{\sigma^{++} + \sigma^{+-}}$$



Bin limits		$A^{\gamma N \to D^0 X}$	$\langle y \rangle$	$\langle Q^2 \rangle$	$\langle p_T^{D^0} \rangle$	$\langle E_{D^0} \rangle$	$\langle D \rangle$
$p_T^{D^0}$ (GeV/c)	E_{D^0} (GeV)			(GeV/c)^2	(GeV/c)	(GeV)	
0–0.3	0–30	$-0.90 \pm 0.63 \pm 0.11$	0.50	0.46	0.19	24.3	0.62
0–0.3	30–50	$-0.19 \pm 0.48 \pm 0.06$	0.60	0.69	0.20	39.1	0.74
0–0.3	> 50	$+0.07 \pm 0.68 \pm 0.06$	0.69	1.17	0.20	59.2	0.84
0.3–0.7	0–30	$-0.18 \pm 0.37 \pm 0.04$	0.51	0.47	0.51	24.6	0.63
0.3–0.7	30–50	$+0.10 \pm 0.26 \pm 0.04$	0.60	0.62	0.51	39.5	0.75
0.3–0.7	> 50	$-0.04 \pm 0.36 \pm 0.05$	0.69	0.73	0.51	59.0	0.83
0.7–1	0–30	$-0.42 \pm 0.44 \pm 0.05$	0.50	0.45	0.85	24.7	0.62
0.7–1	30–50	$-0.36 \pm 0.29 \pm 0.04$	0.61	0.60	0.85	39.2	0.75
0.7–1	> 50	$+1.49 \pm 0.42 \pm 0.15$	0.69	0.76	0.84	58.6	0.83
1–1.5	0–30	$-0.30 \pm 0.35 \pm 0.03$	0.54	0.41	1.23	25.3	0.66
1–1.5	30–50	$+0.13 \pm 0.23 \pm 0.01$	0.64	0.55	1.24	39.2	0.77
1–1.5	> 50	$-0.20 \pm 0.33 \pm 0.02$	0.71	0.73	1.24	58.3	0.85
> 1.5	0–30	$+0.38 \pm 0.49 \pm 0.04$	0.56	0.47	1.84	25.6	0.69
> 1.5	30–50	$0.00 \pm 0.25 \pm 0.02$	0.65	0.70	1.92	39.9	0.79
> 1.5	> 50	$+0.36 \pm 0.33 \pm 0.04$	0.69	0.60	1.95	59.9	0.86



Поперечность Δ_T or h_1

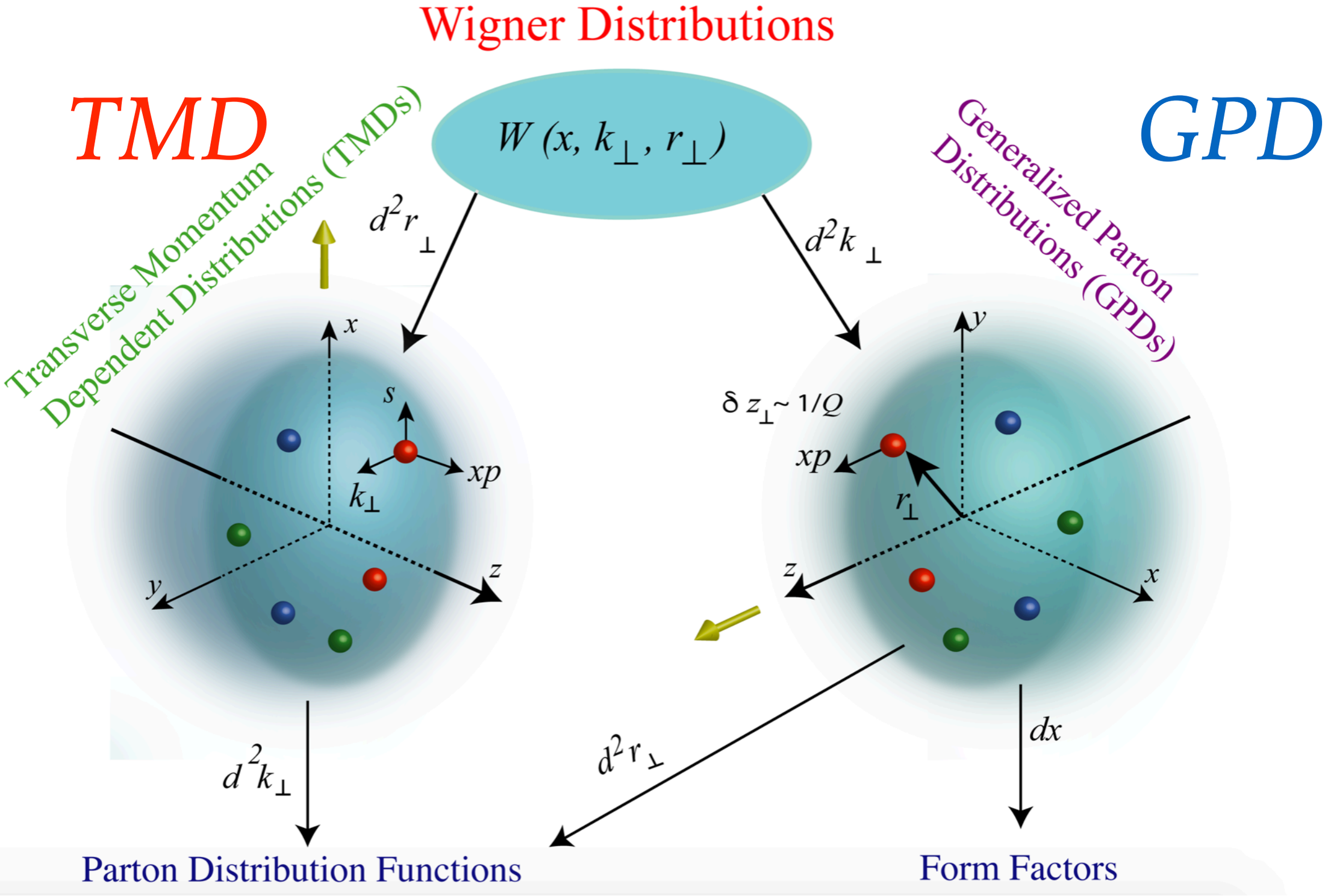


- ***u* и *d* полязированы в противоположные стороны**

неопределённость слишком велика

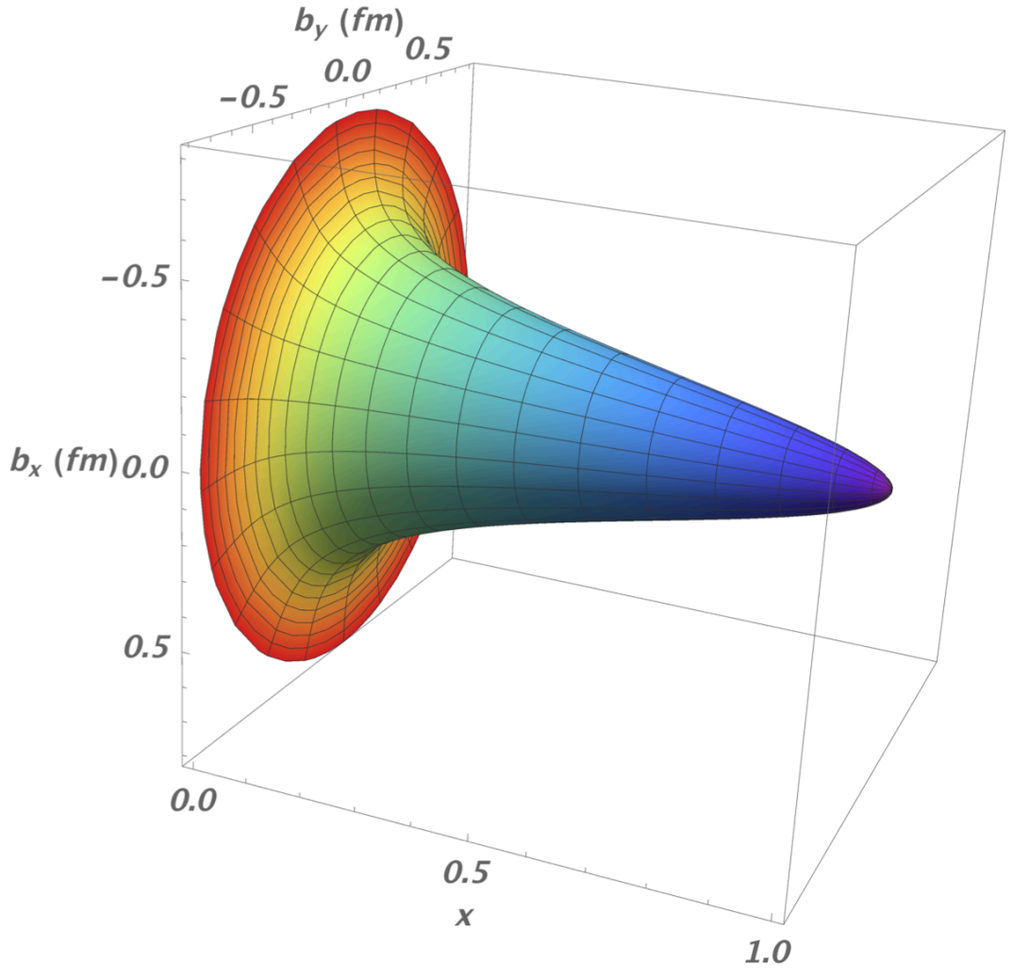
НЕ ИМЕЕТ СМЫСЛА ДЛЯ ГЛЮОНОВ

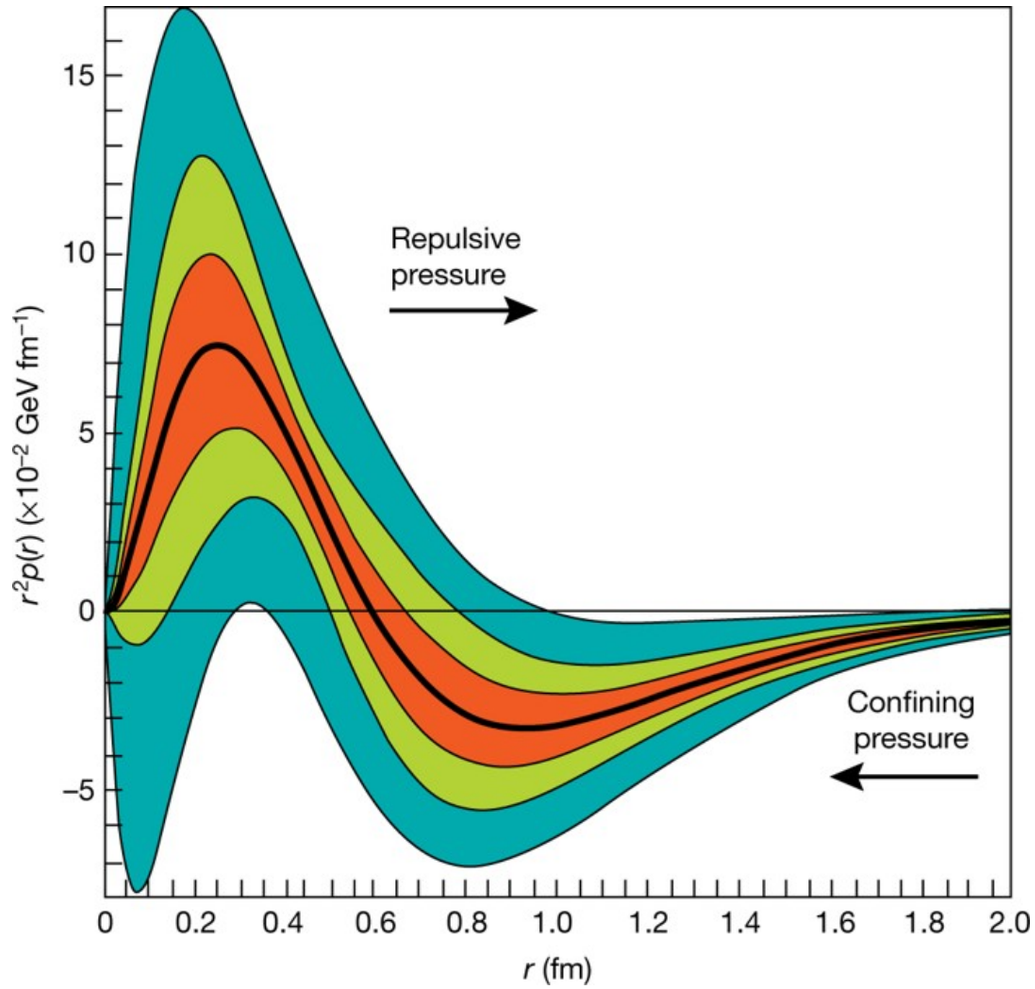
Трёхмерная томография протона



Трёхмерный протон и GPD

Размер протона зависит от того, на каком масштабе мы его пытаемся “пощупать” !

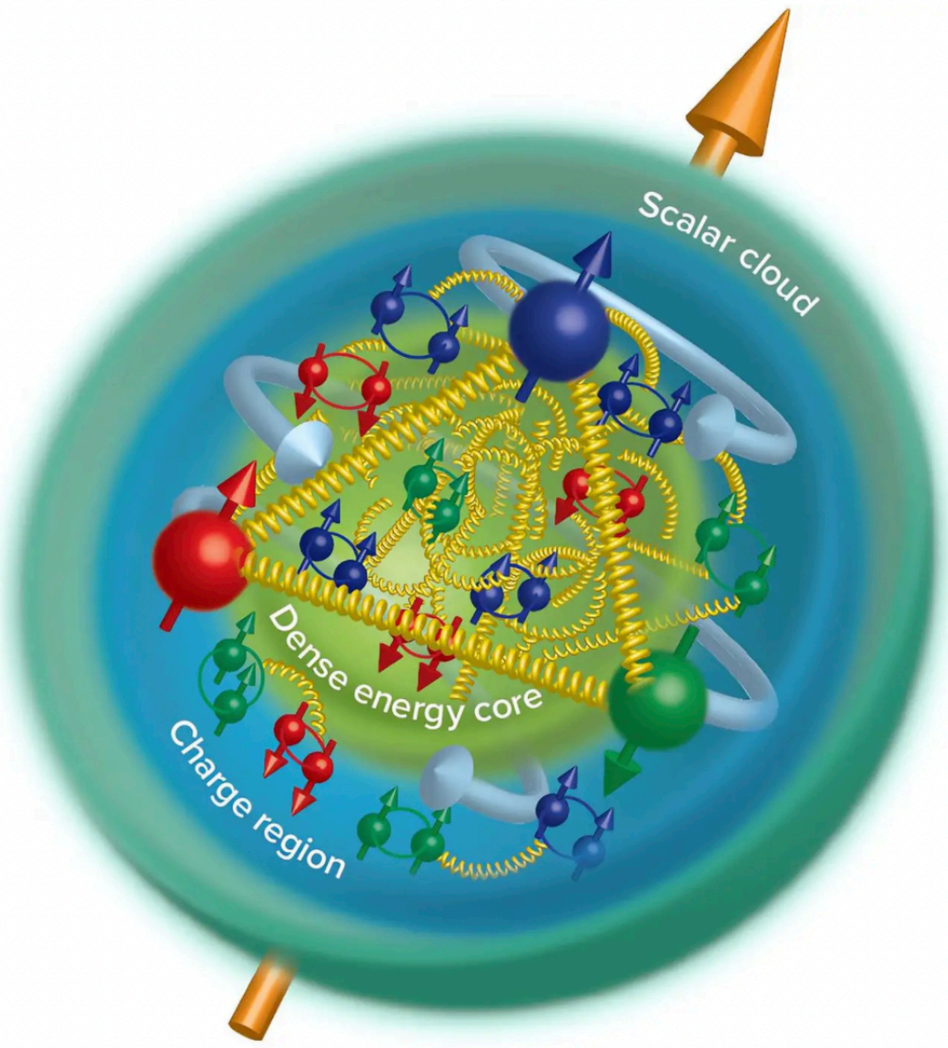




Давление адронного вещества в протоне ~10^{34} Па!

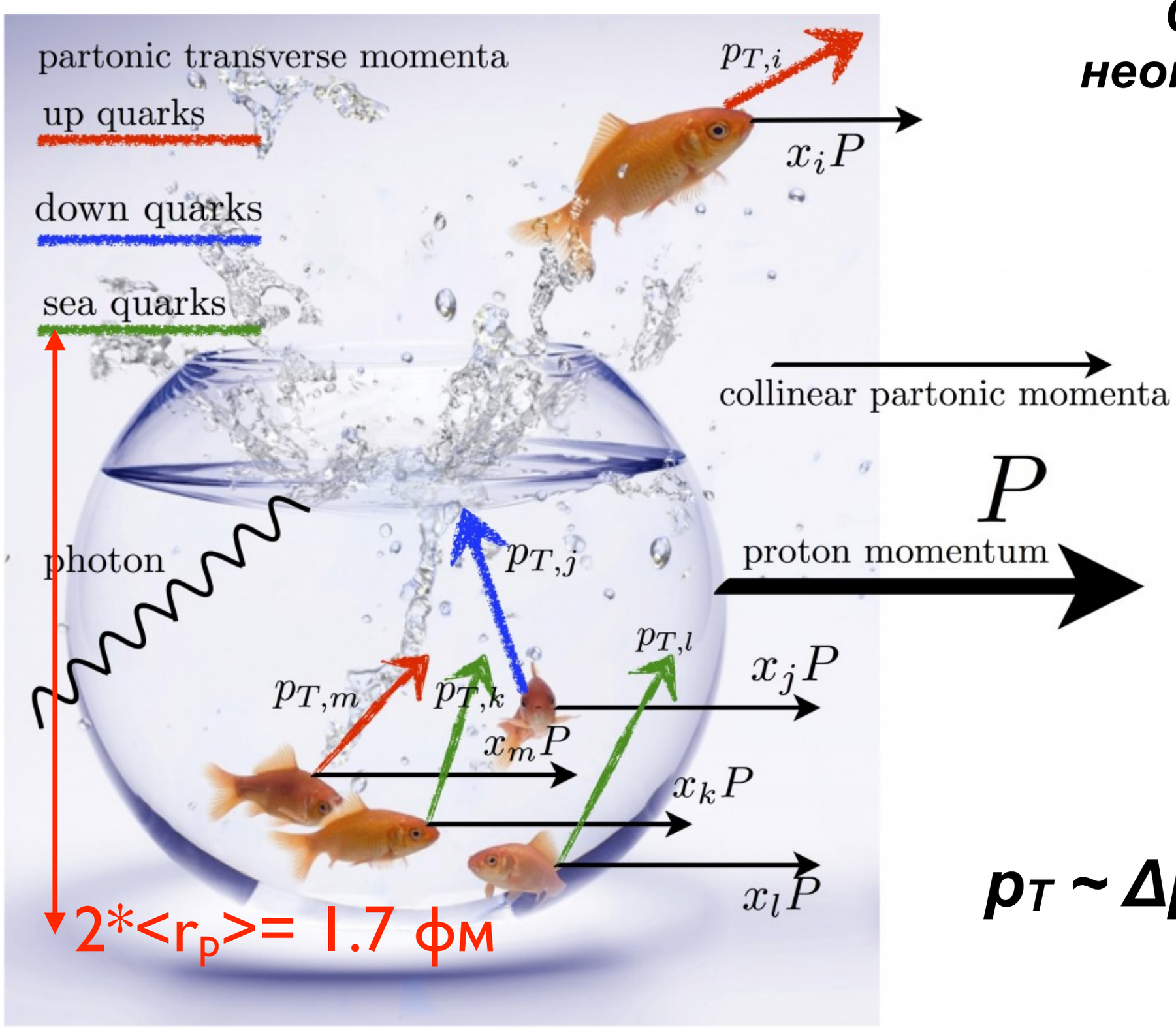
Три радиуса протона

	Распределение	R, фм
Зарядовый	Заряд (кварки)	0.84
Гравитацион-ный	Масса (глюоны)	0.5 - 0.75
Слабый	Слабый заряд	1.55



GPD-based calculations

А откуда вообще берется поперечный импульс партонов?



Соотношение неопределенностей:

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

$\Delta y \sim 2\langle r_p \rangle$

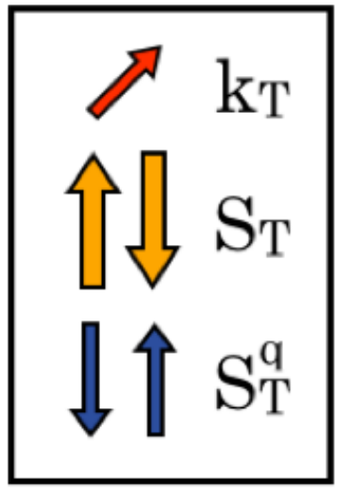
$p_T \sim \Delta p_y \geq 0.1$ GeV/c

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

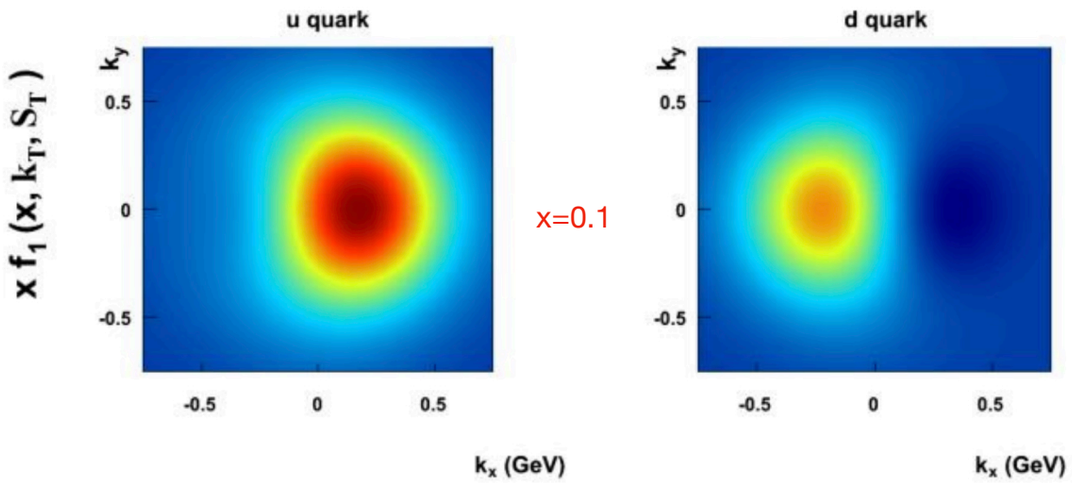


5

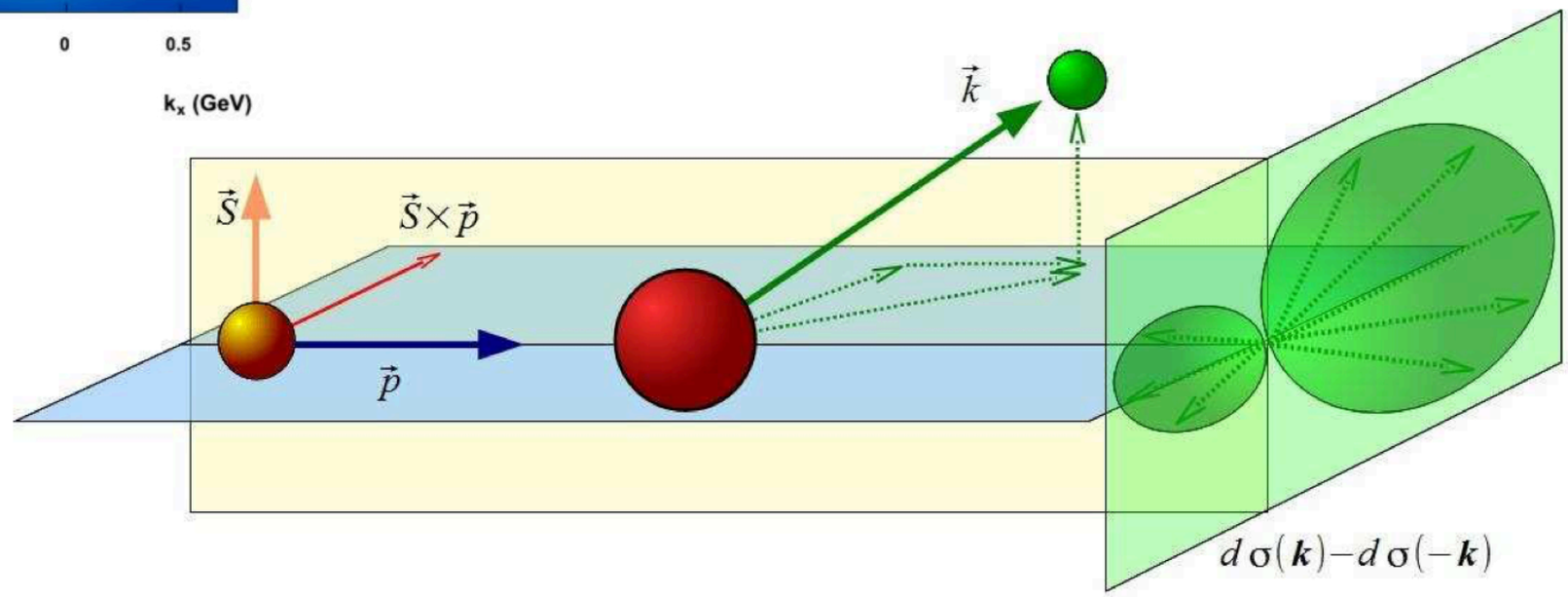
дополнительных наборов TMD PDF описывающих корреляцию между спином нуклона, спином партона и поперечным импульсом партона

Эффект Сиверса

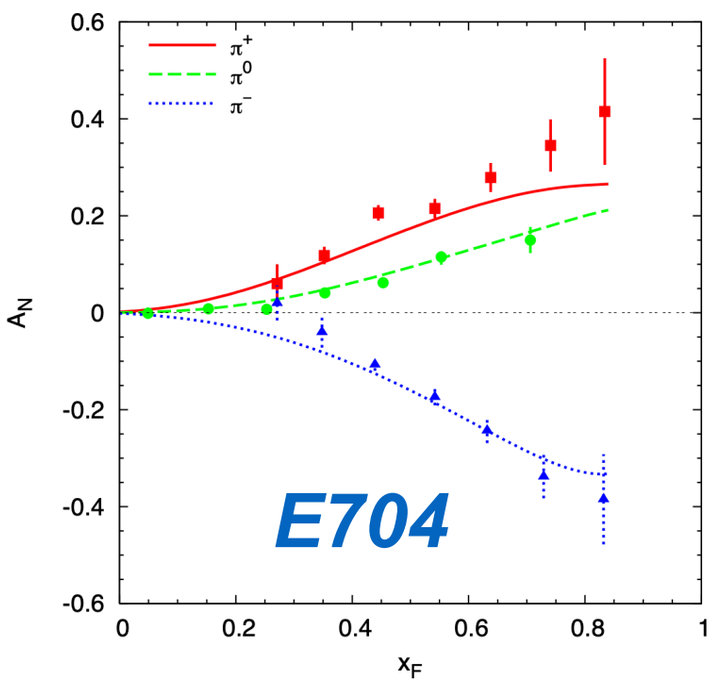
Вероятности в поперечно поляризованном протоне встретить партон, летящий влево и вправо относительно плоскости $(\vec{S}, \vec{p})$ ***разные!***



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



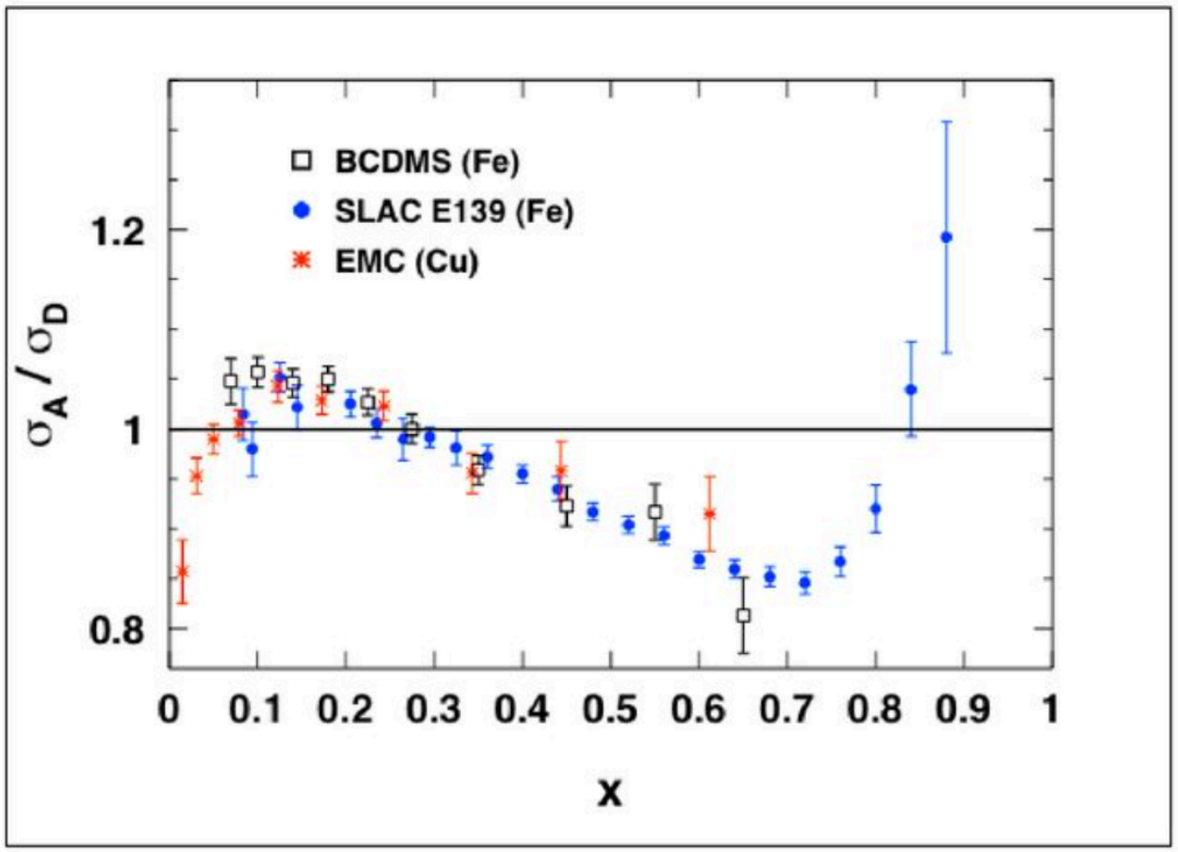
A_N



p_L/p_{max}

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

EMC-эффект

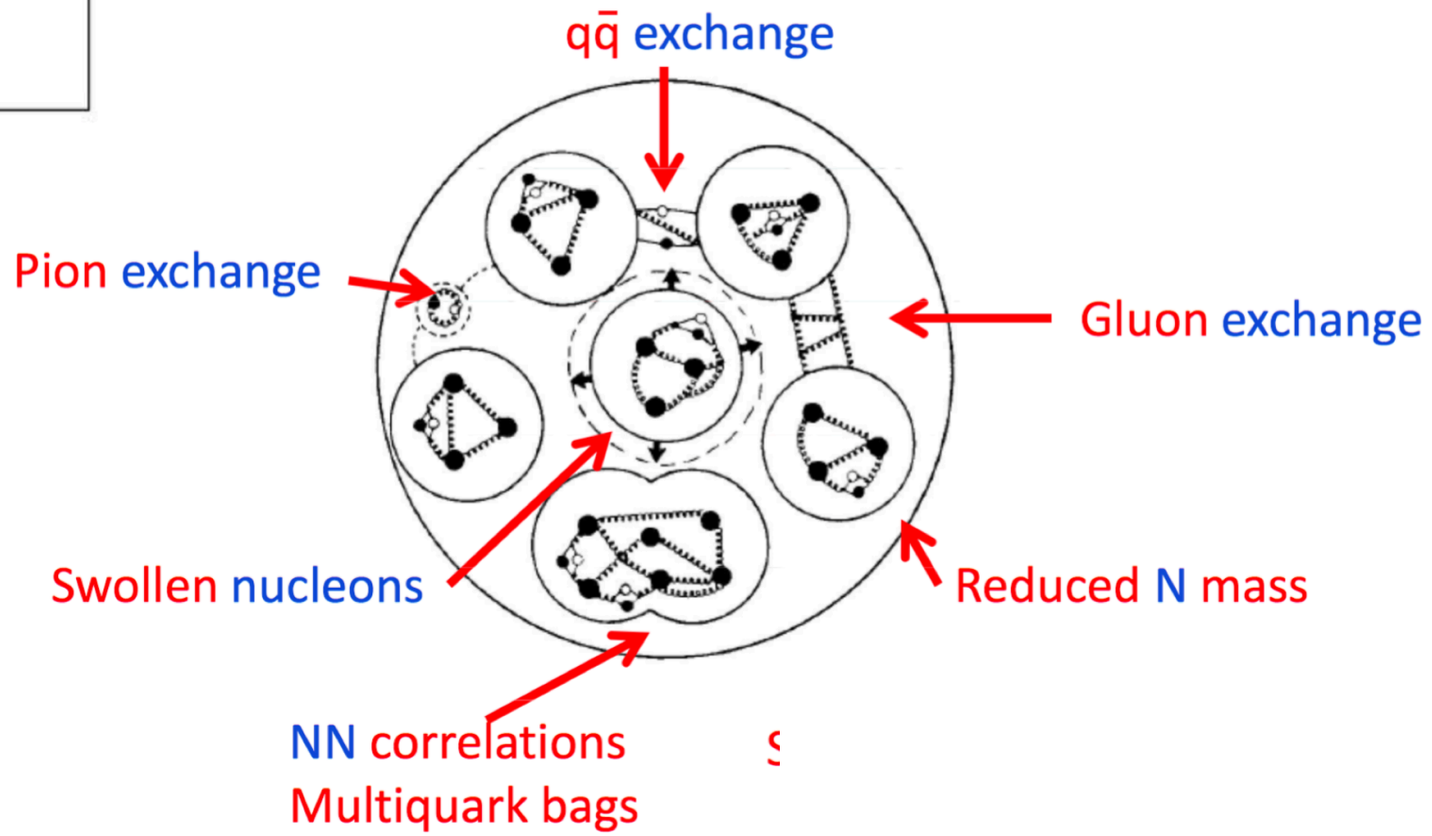




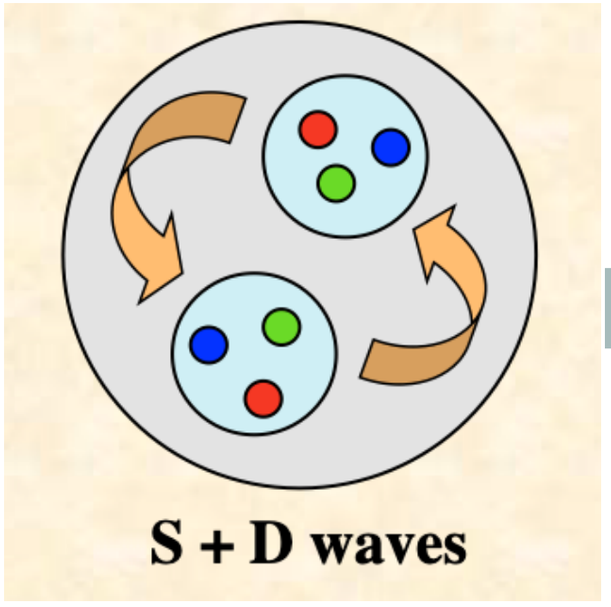
EMC collaboration, 1982

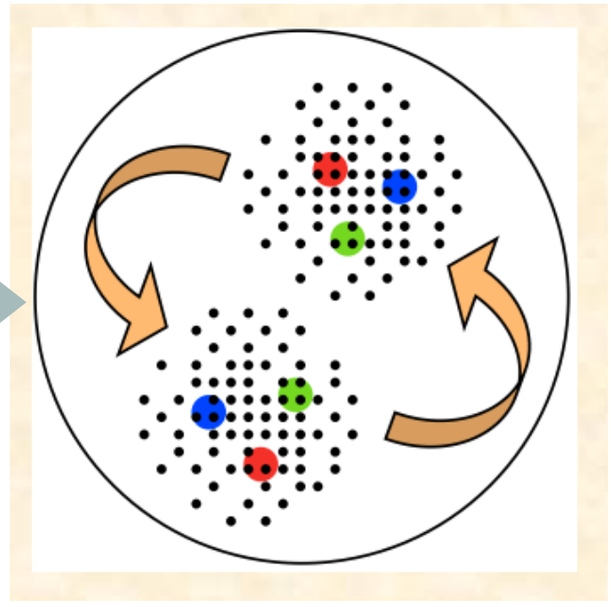
Партоны внутри нуклона знают, в каком ядре он находится.

Возможны x>1 !



Дейтрон





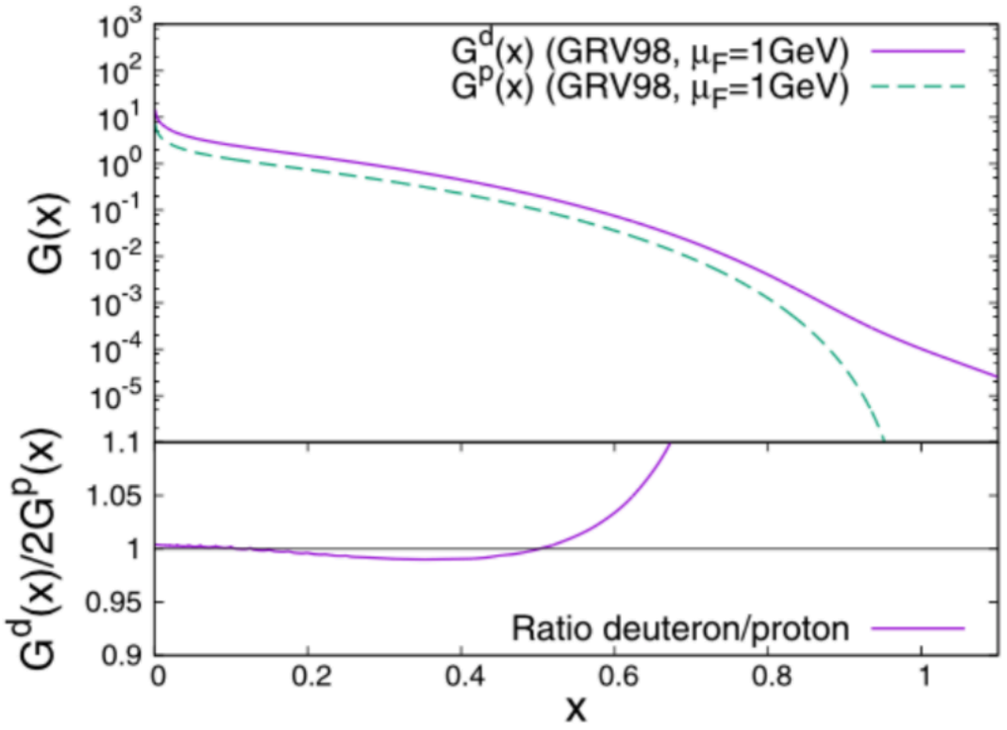
Дейтрон всегда служил референсом для изучения EMC-эффекта. Но и в нём самом ядерные эффекты присутствуют!

Дейтрон ≠ протон + нейтрон !

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

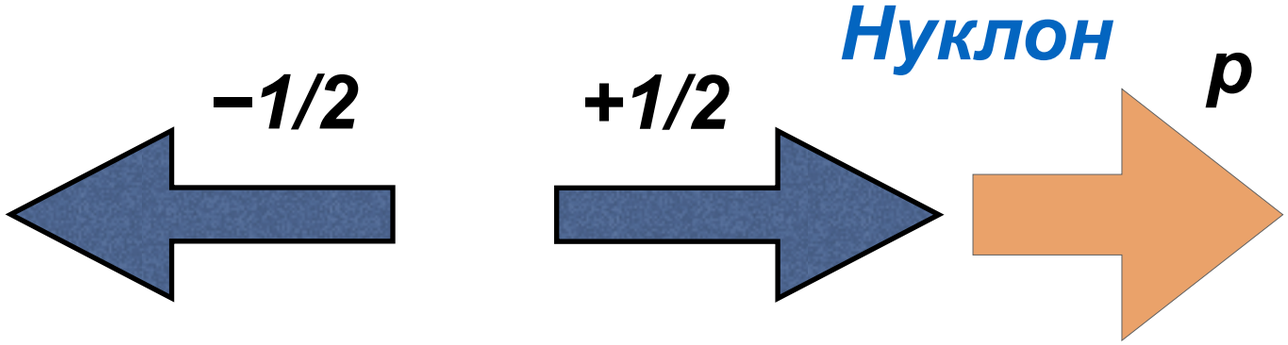
скрытый цвет

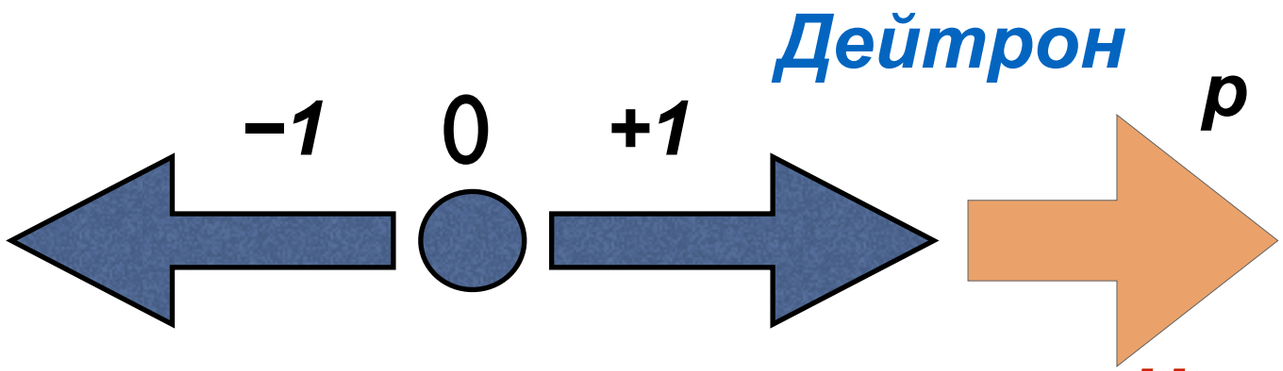
- небарионная компонента, доля некоторой в некоторых моделях достигает 90%



Больше глюонов с большим значением x

Дейтрон как частица с о спином 1





Векторная поляризация

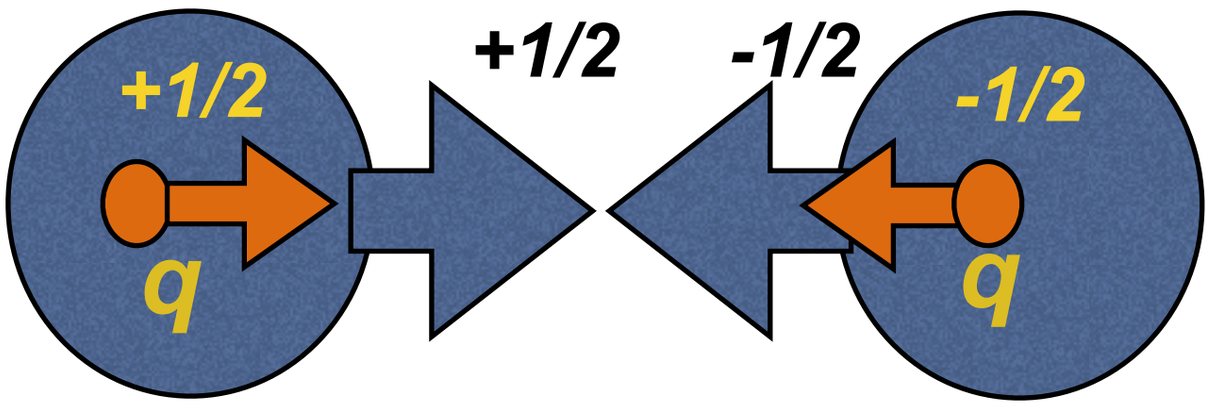
$$\frac{N_{1/2} - N_{-1/2}}{N_{1/2} + N_{-1/2}}$$

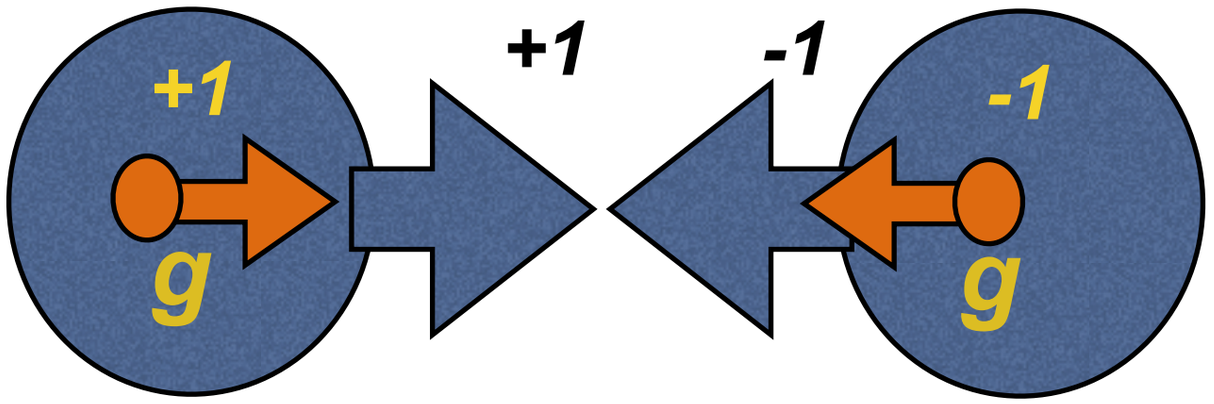
Тензорная поляризация

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

Новые "тензорные" PDF, которые пока неизвестны.

Новые возможности для глюонов:

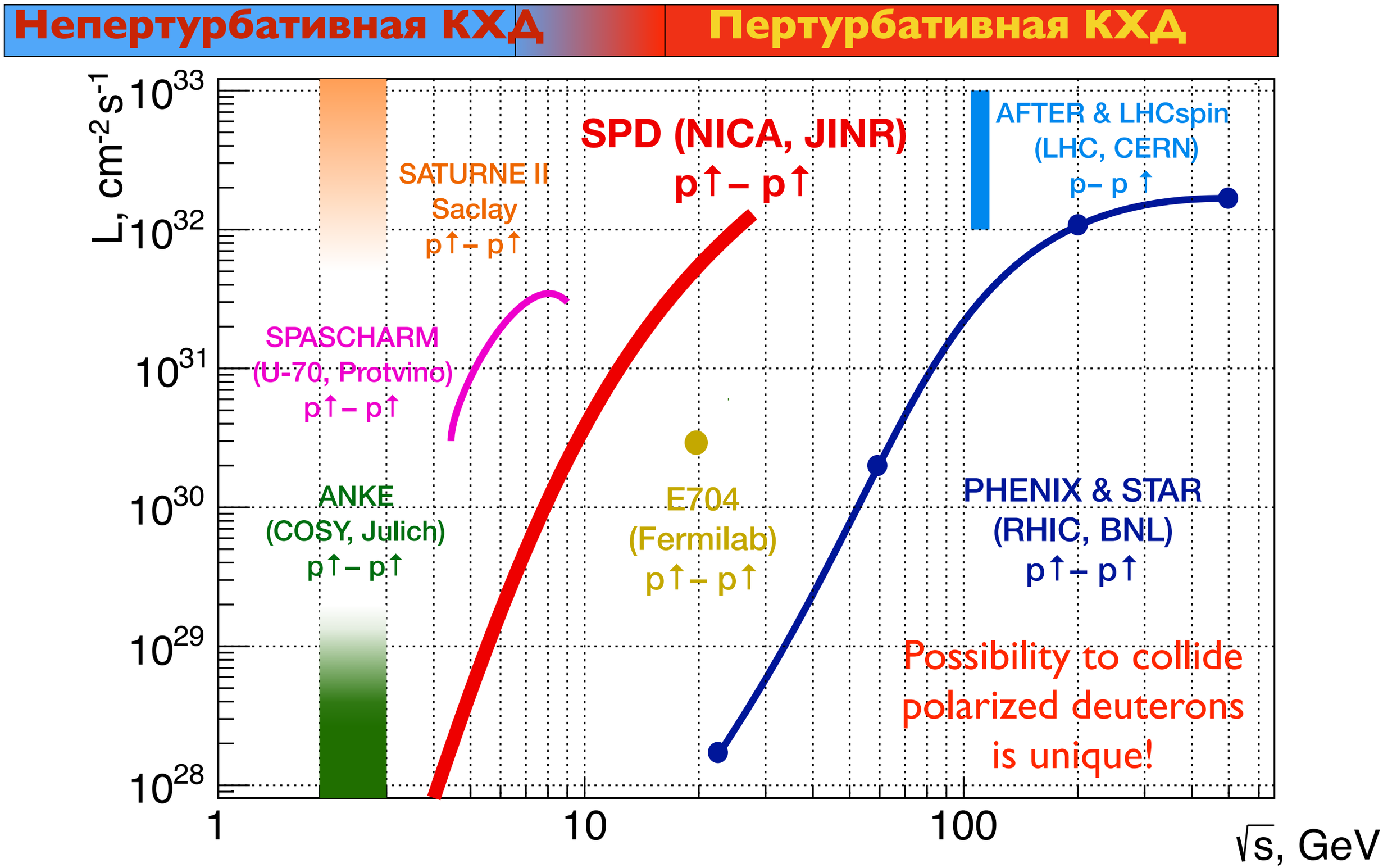




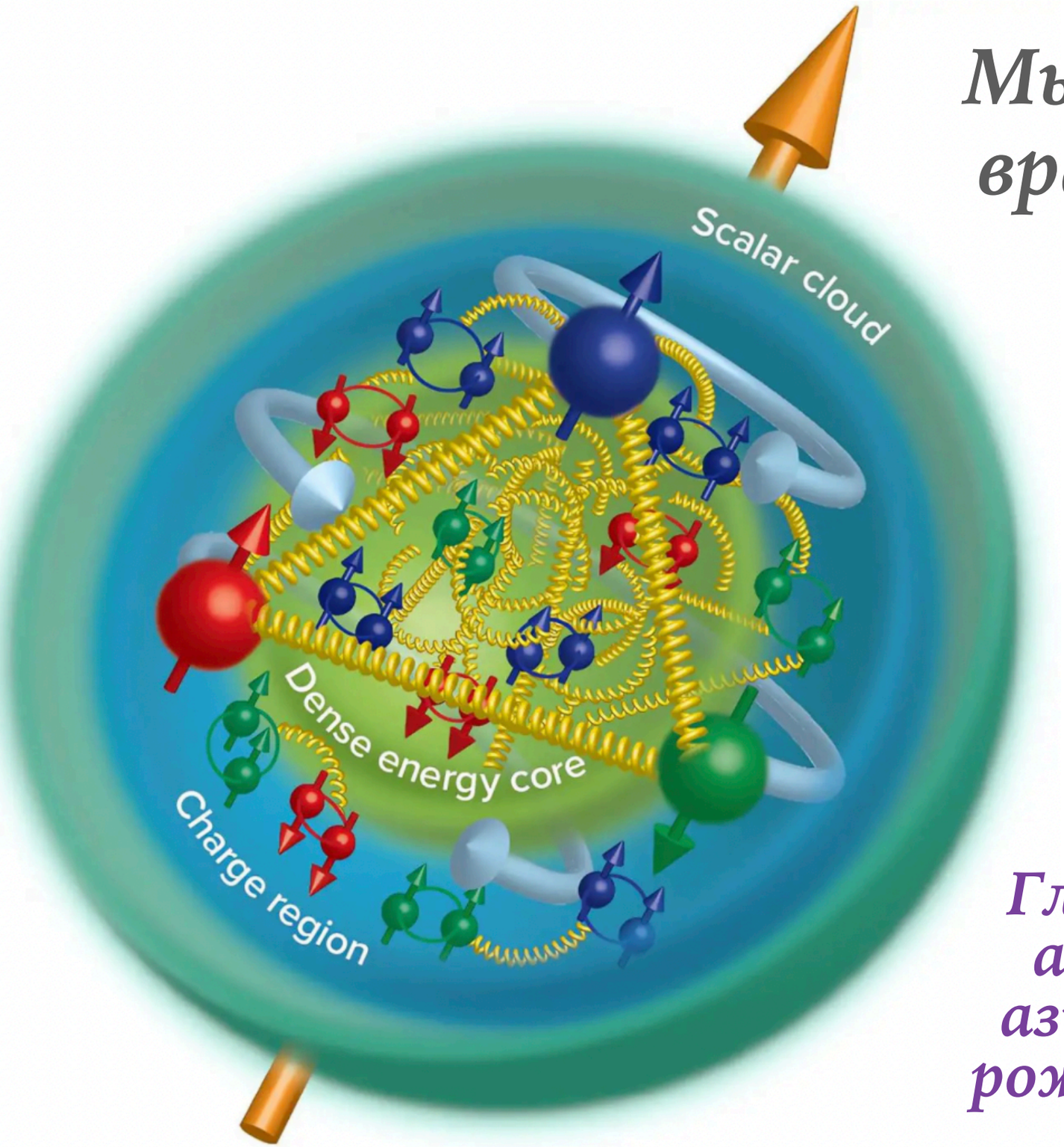
Жесткие процессы с переворотом спина глюона невозможны в нуклоне (спин 1/2)

Для дейтрона возможно!

А что в мире?


Непертурбативная КХД
Пертурбативная КХД
L, cm-2 s-1
10^33
10^32
10^31
10^30
10^29
10^28
1
10
100
√s, GeV
SATURNE II
Saclay
p↑ – p↑
SPD (NICA, JINR)
p↑ – p↑
AFTER & LHCspin
(LHC, CERN)
p– p ↑
SPASCHARM
(U-70, Protvino)
p↑ – p↑
ANKE
(COSY, Julich)
p↑ – p↑
E704
(Fermilab)
p↑ – p↑
PHENIX & STAR
(RHIC, BNL)
p↑ – p↑
Possibility to collide
polarized deuterons
is unique!

Спиновая физика на NICA



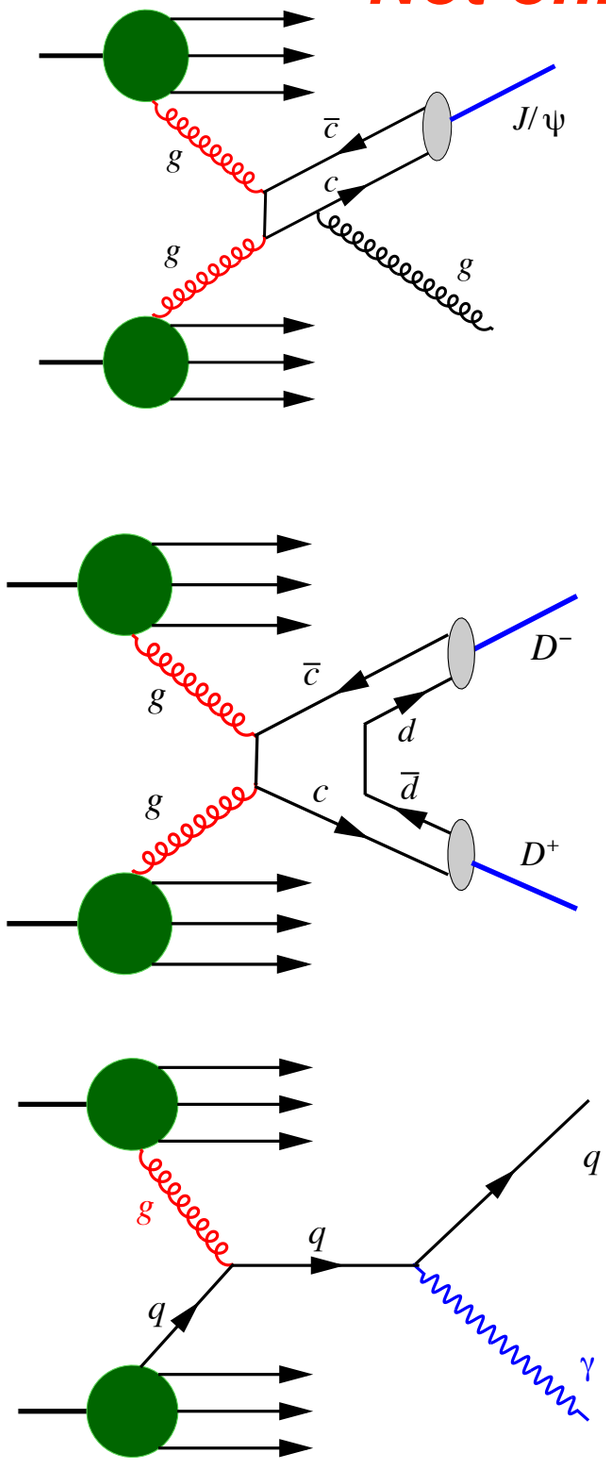
Мы хотим знать, как вращаются протон и дейтрон

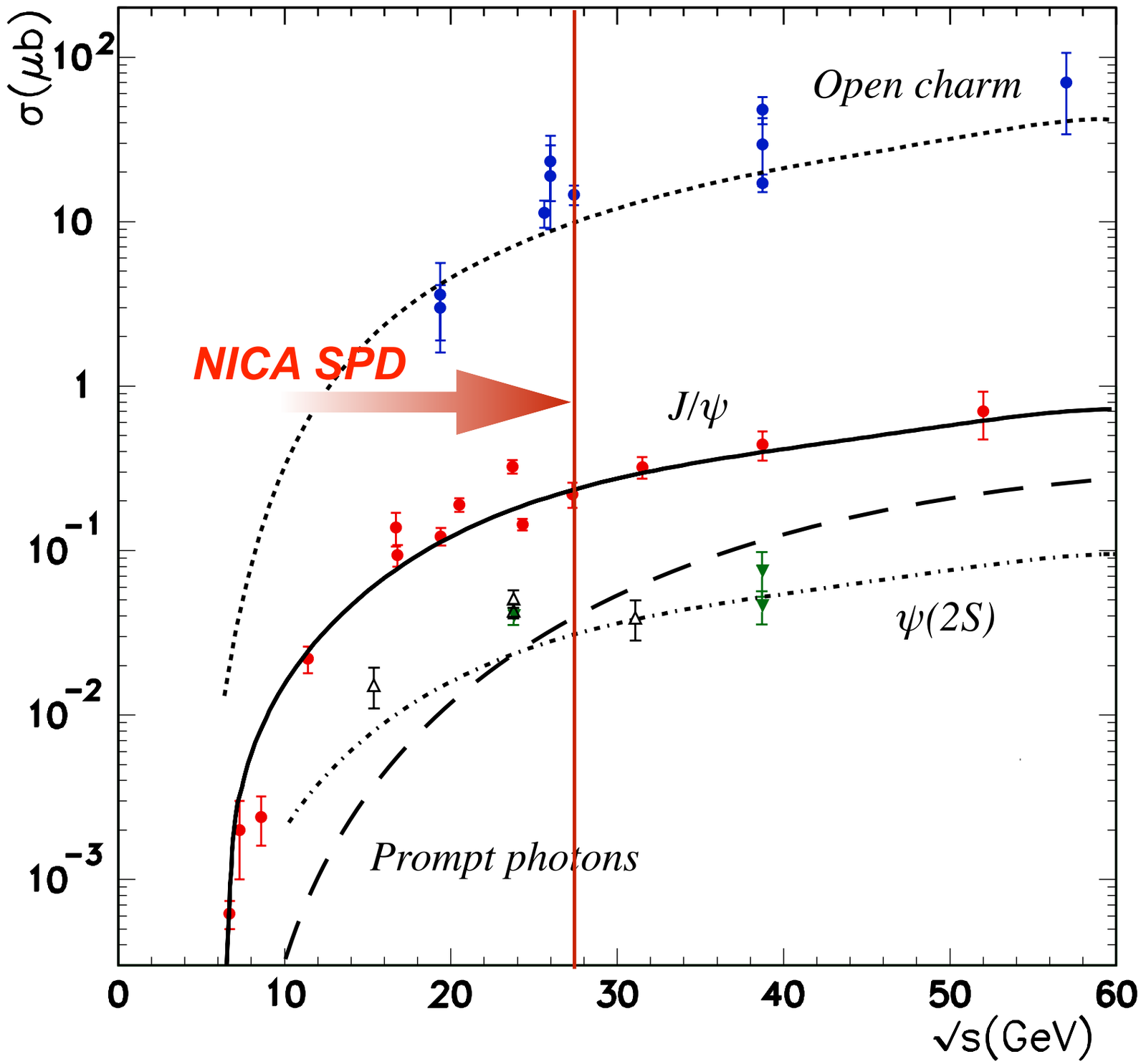
Особенно интересна их глюонная компонента

Глюонные TMD PDFs через асимметрии в сечениях и азимутальные модуляции в рождении вторичных частиц

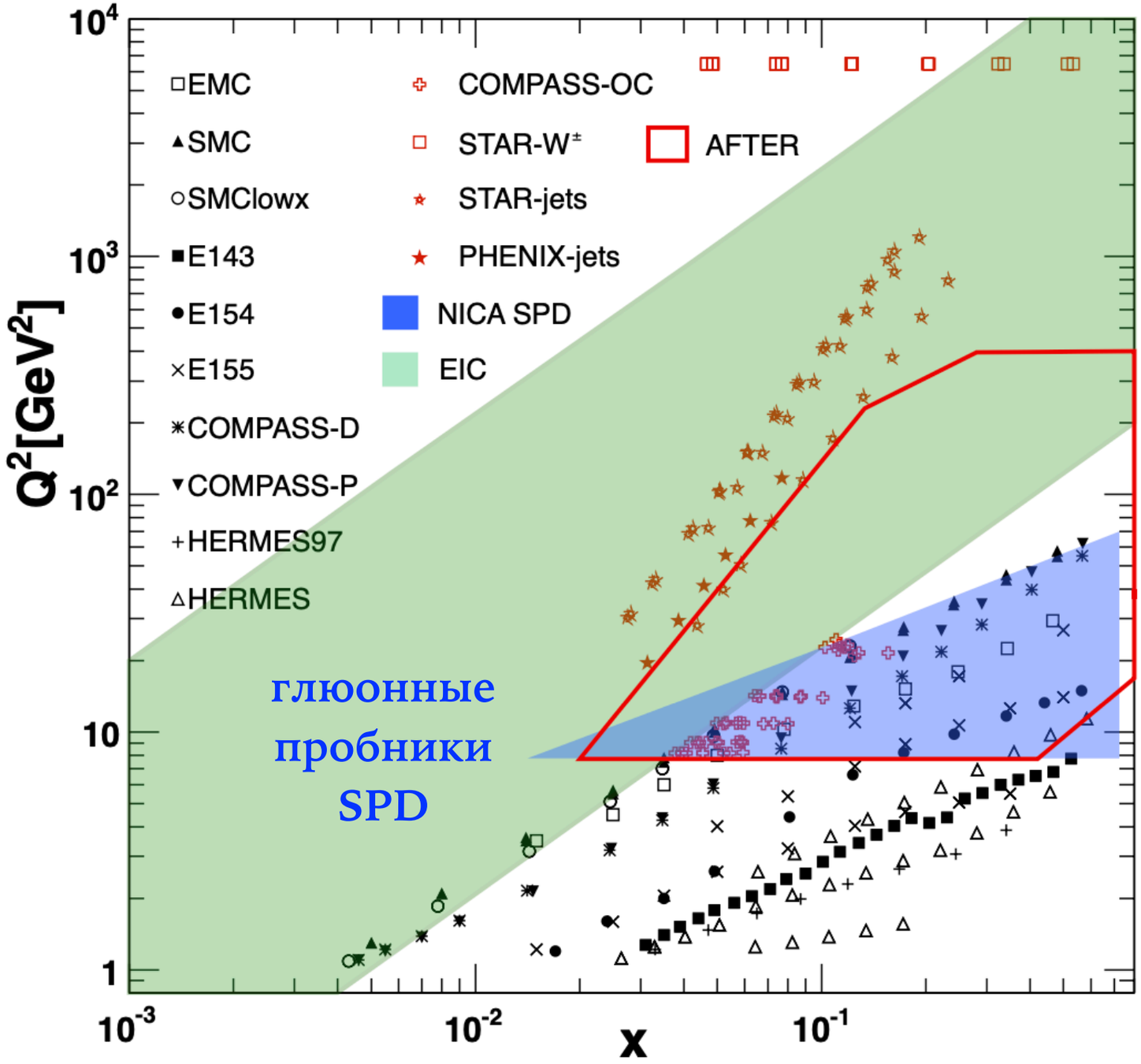
SPD и глюонная структура нуклона

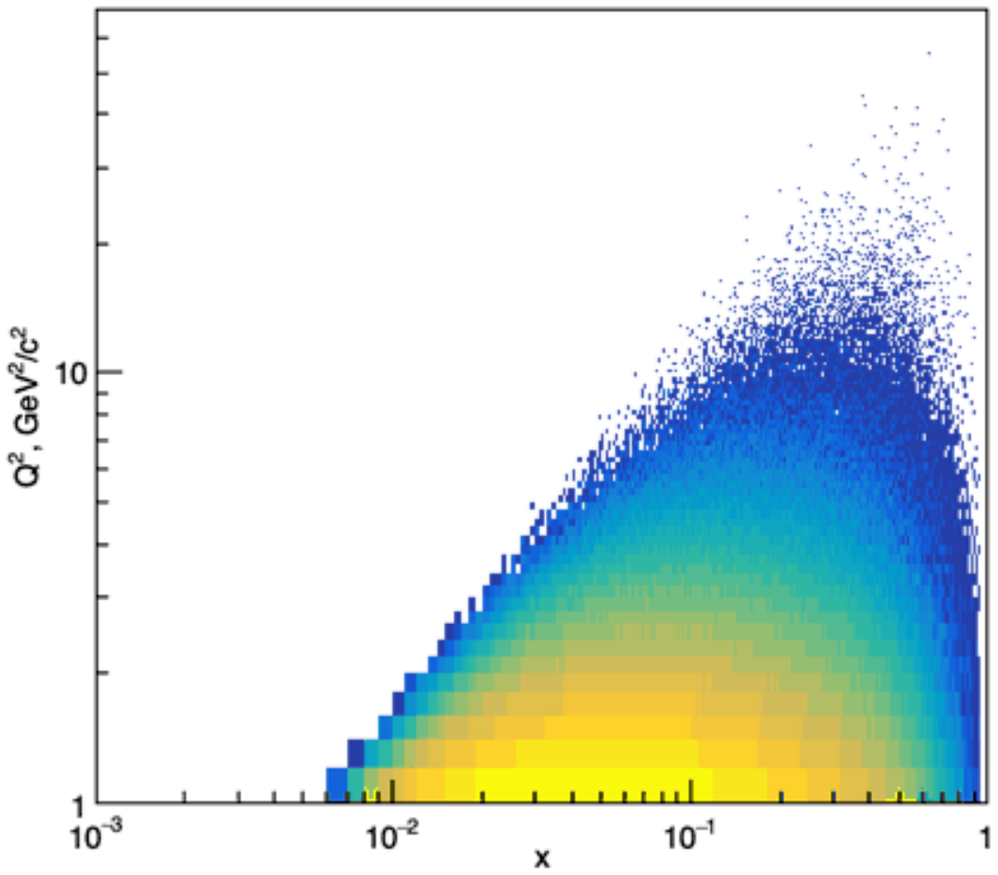
Not only J/ψ!





SPD и все-все-все

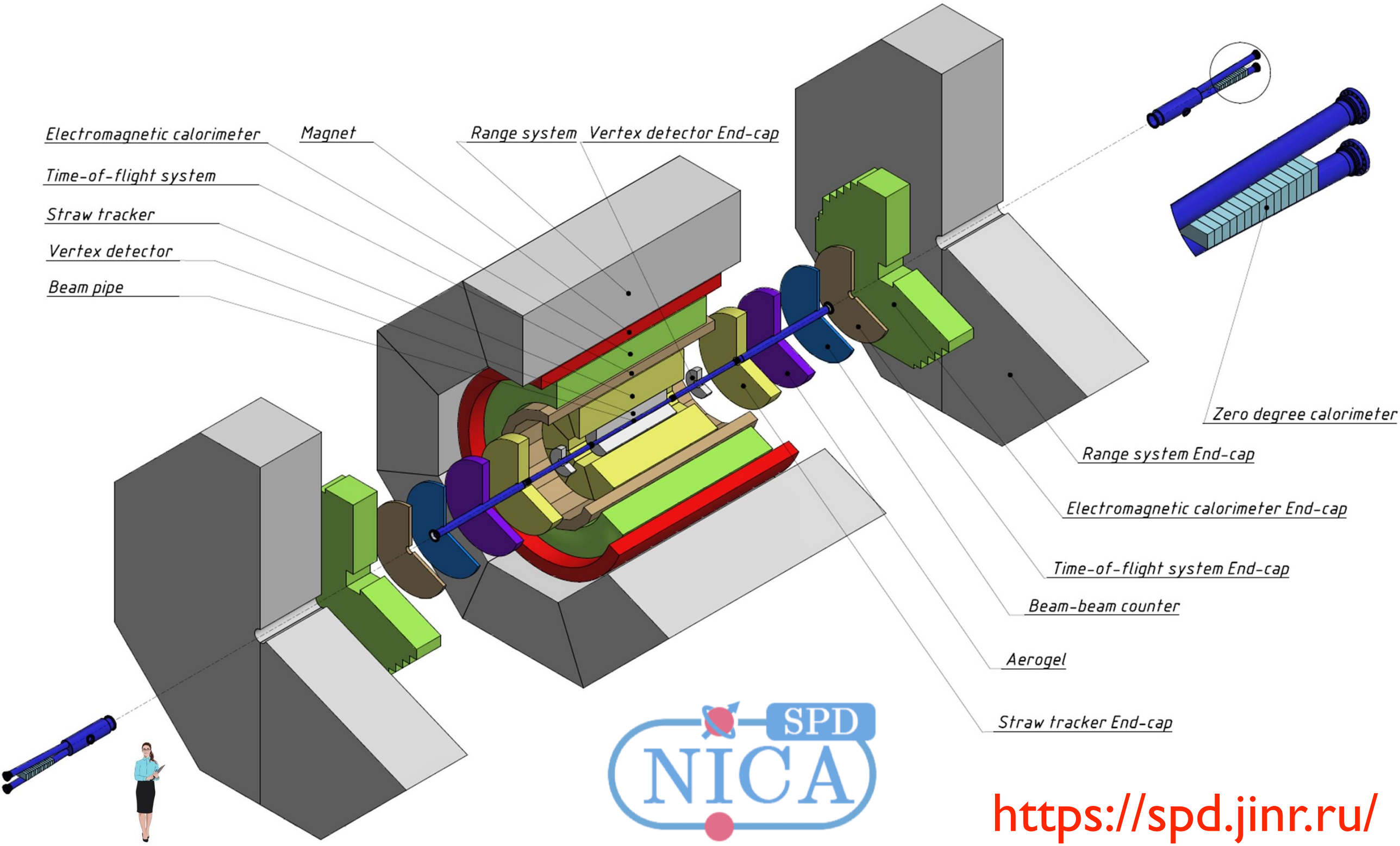




$$Q^2 = 1\ GeV^2/c^2, < x > = 0.16$$

$$Q^2 = 10\ GeV^2/c^2, < x > = 0.3$$

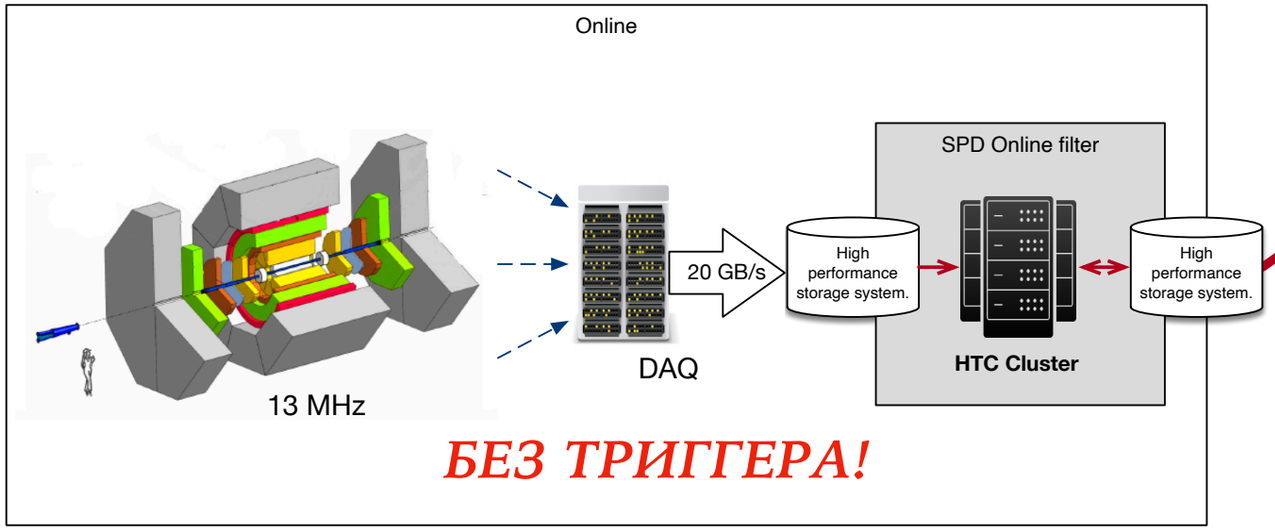
Установка SPD

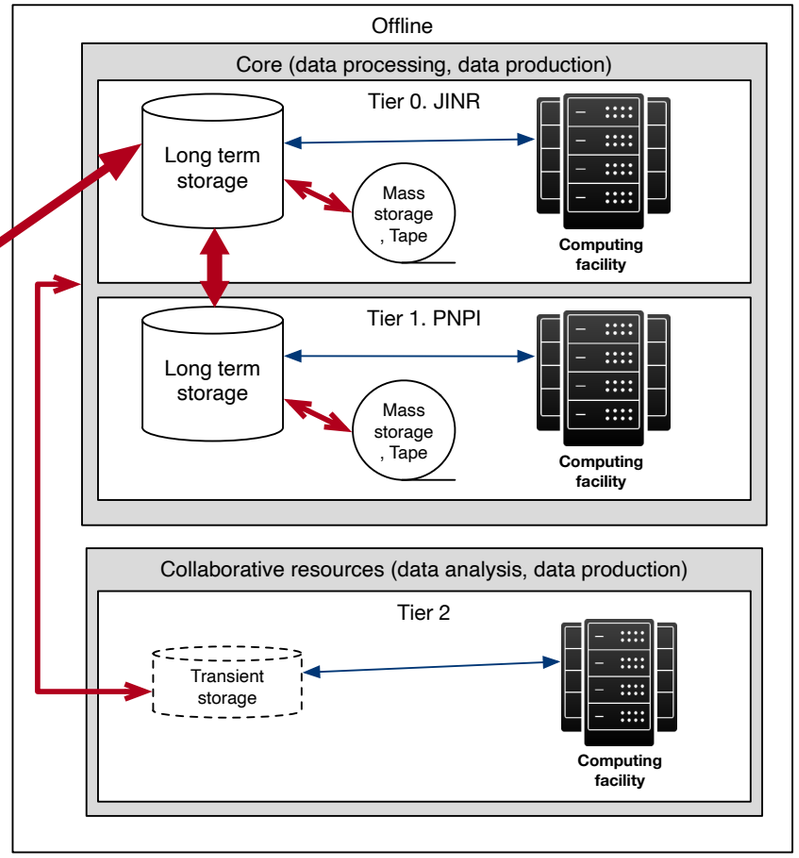


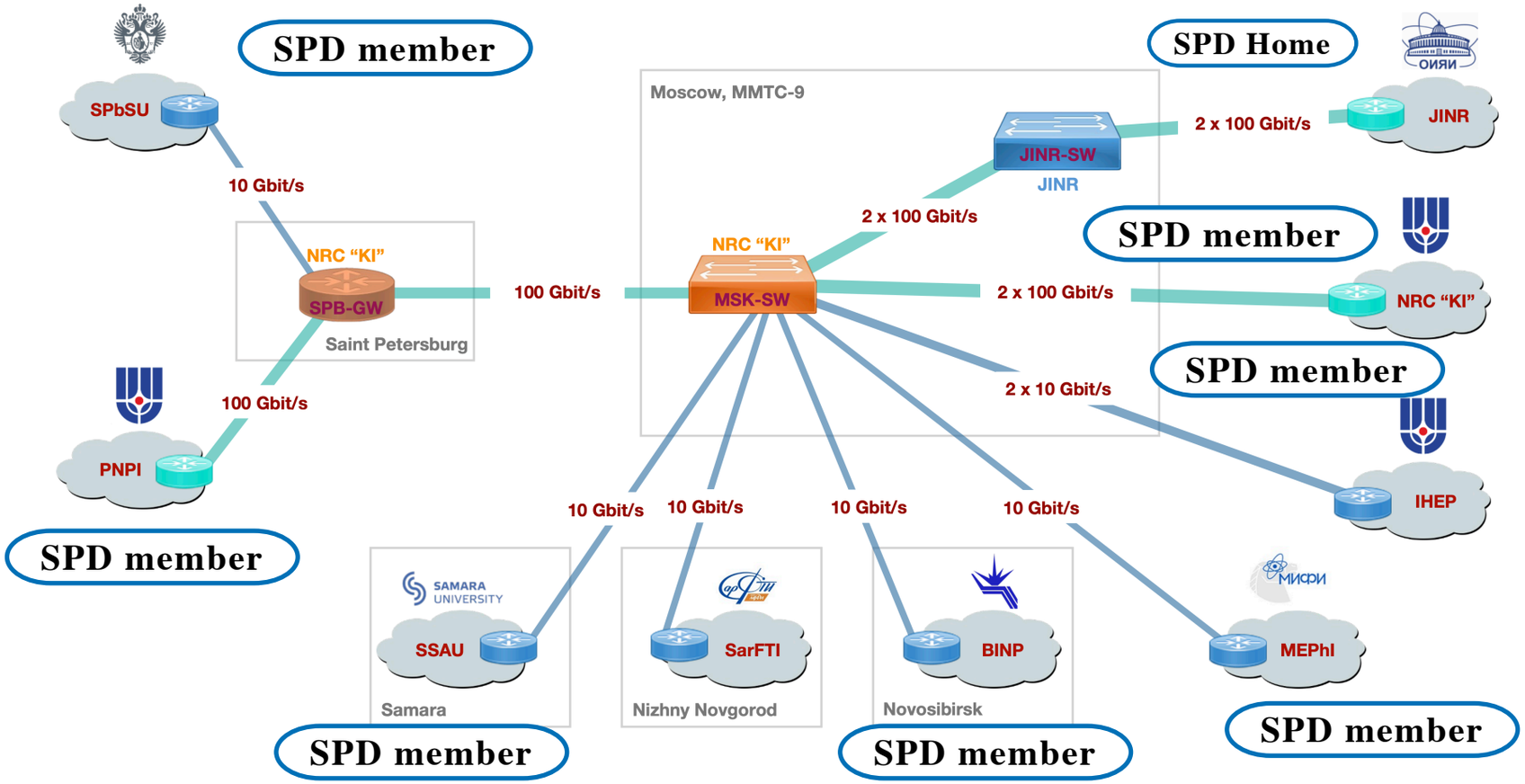
https://spd.jinr.ru/

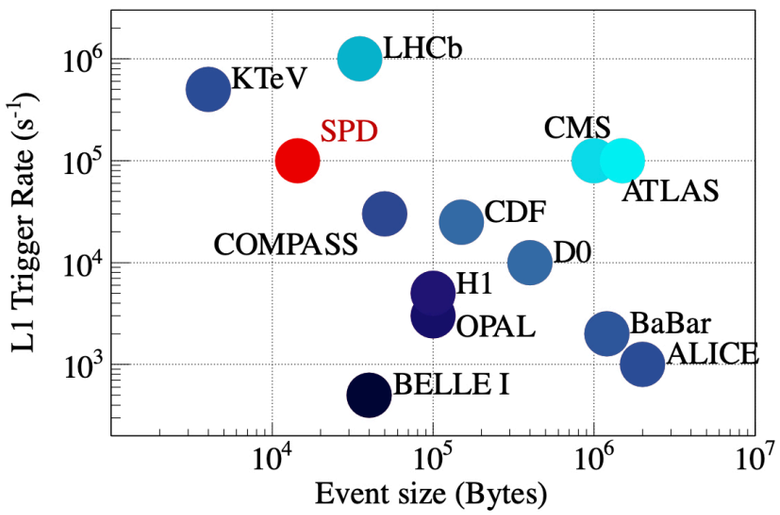
IT-инфраструктура

Потоки данных в SPD

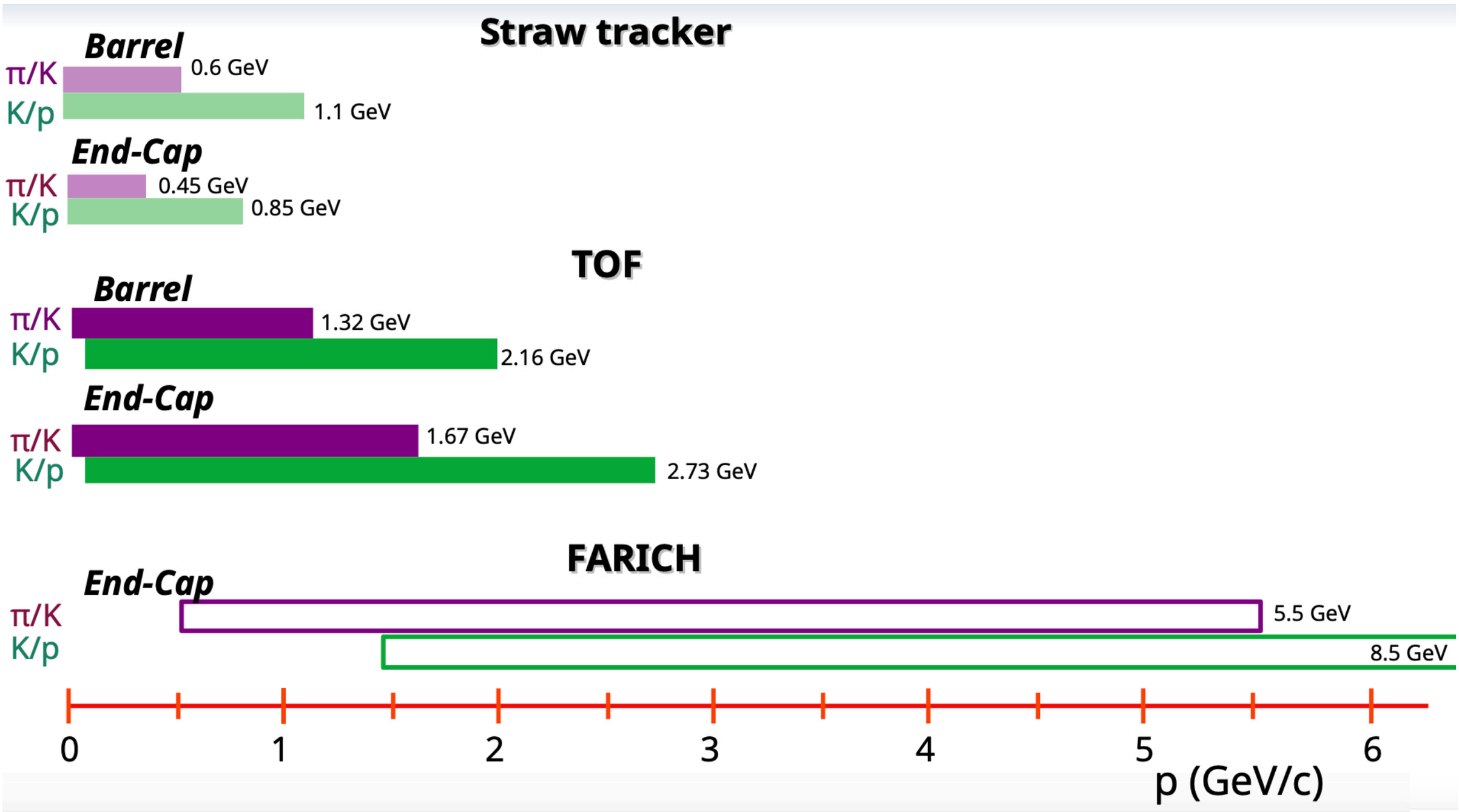






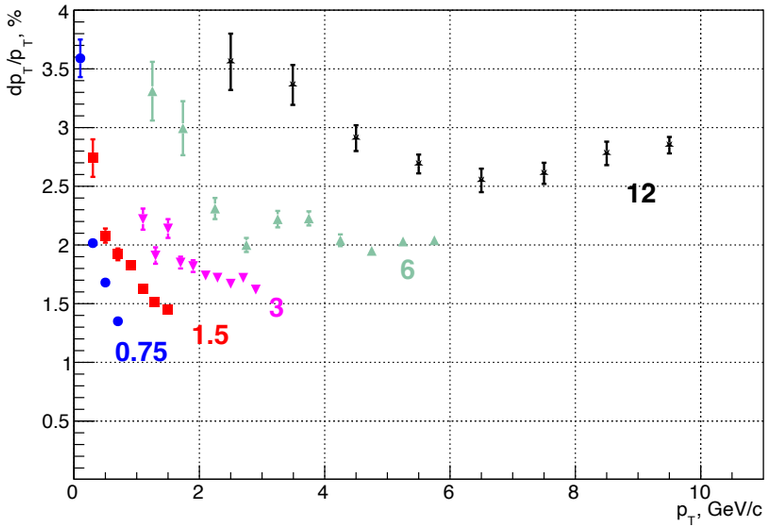


Идентификация частиц

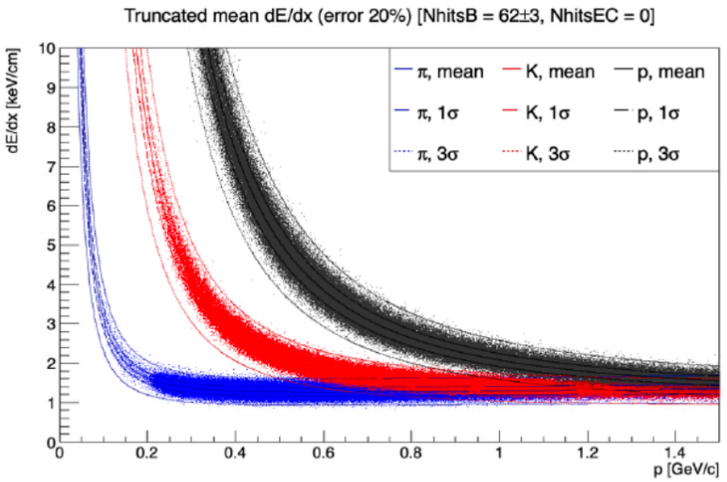


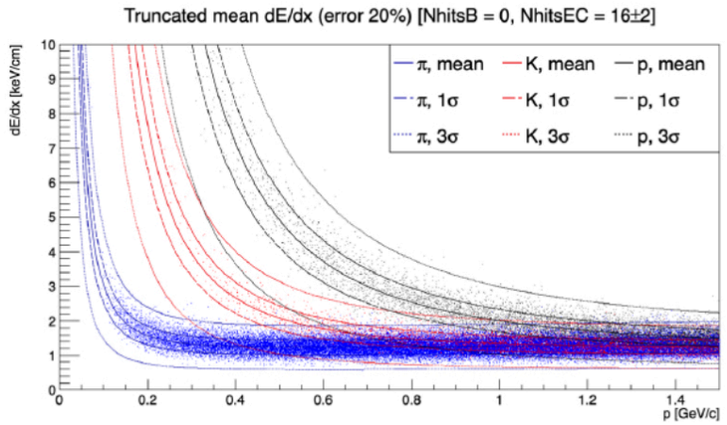
Ожидаемые параметры

Momentum resolution



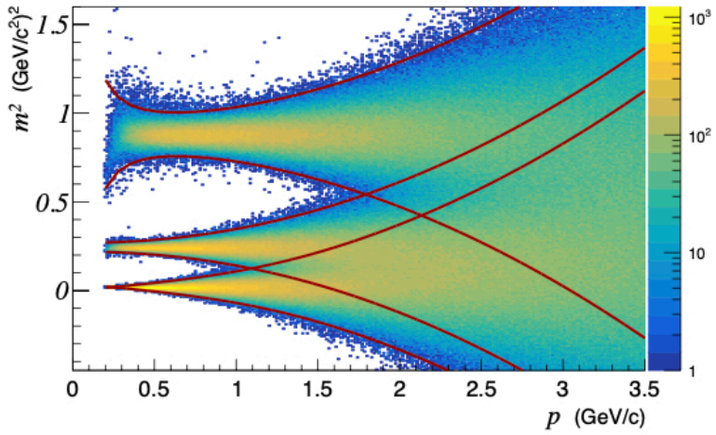
dE/dx in Straw tracker



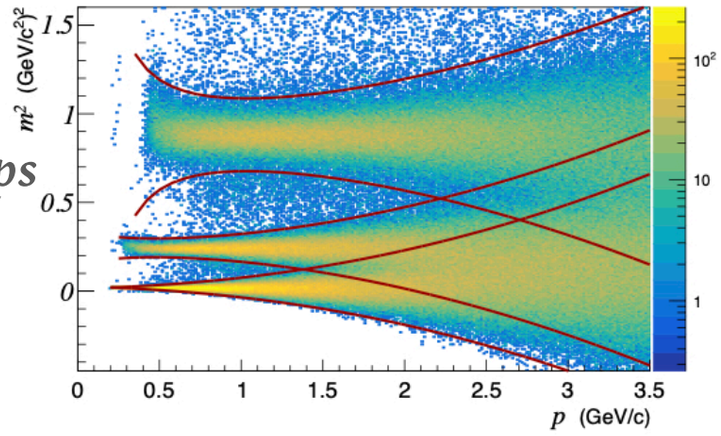


TOF performance

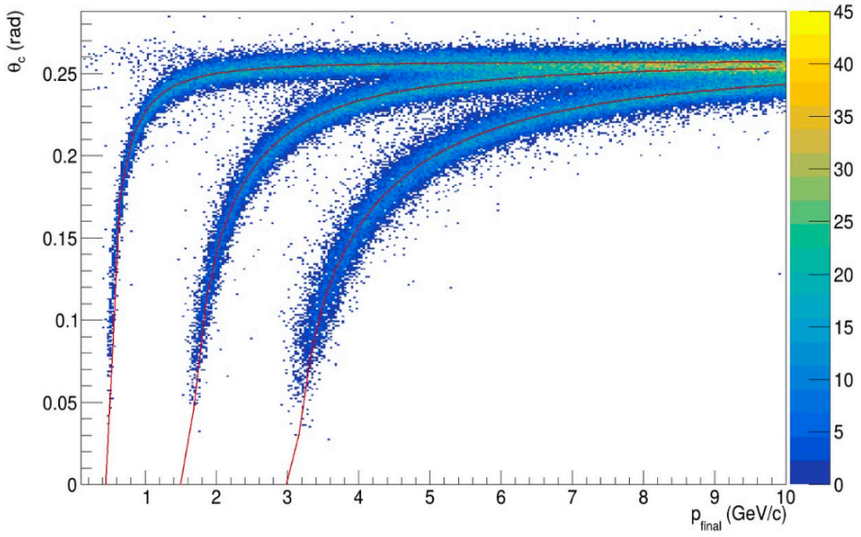
barrel

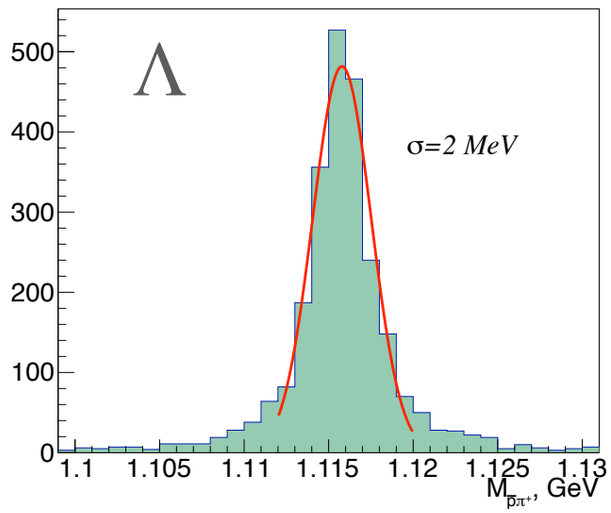


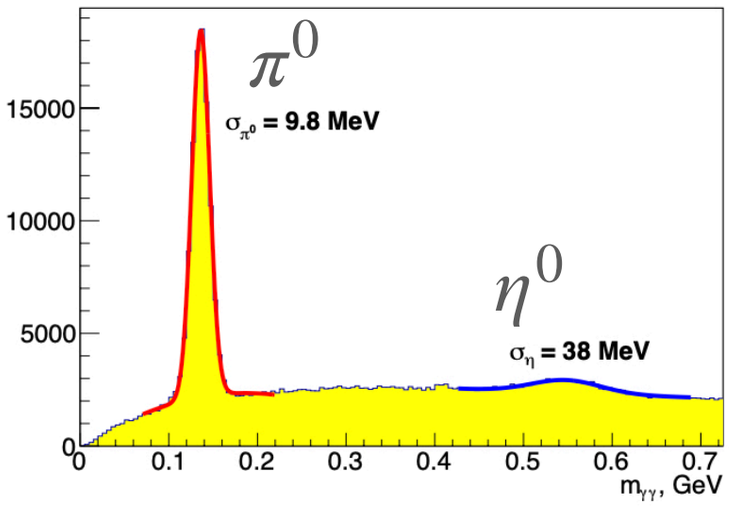
endcaps



FARICH performance

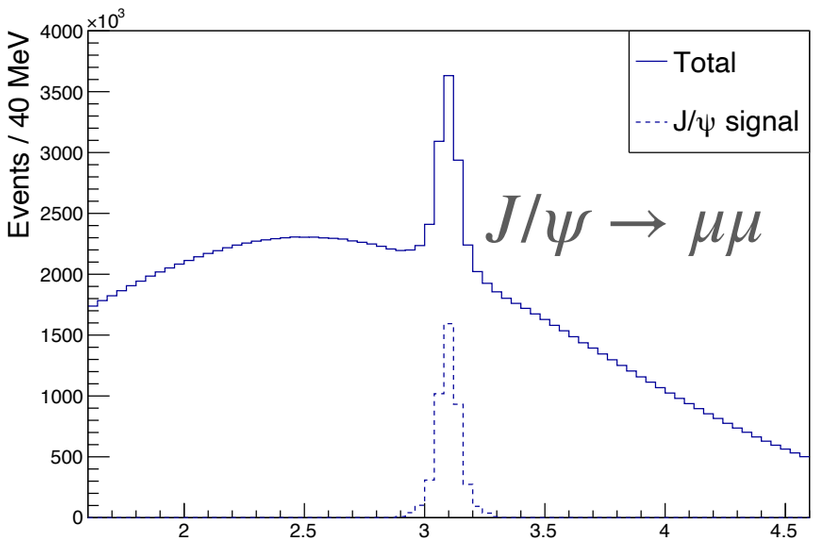


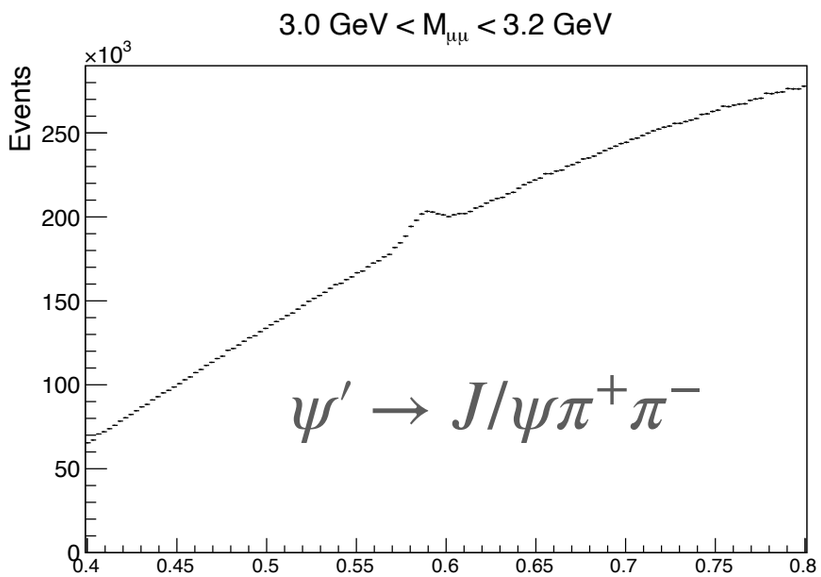


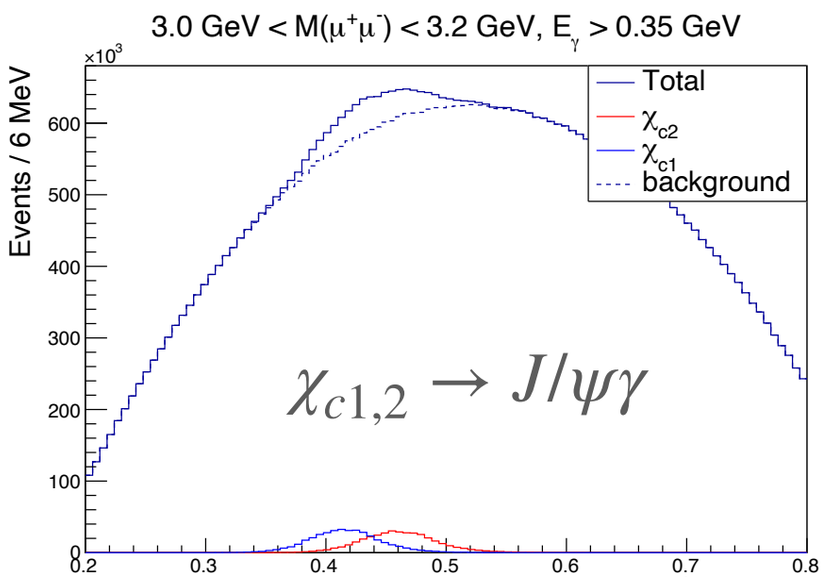


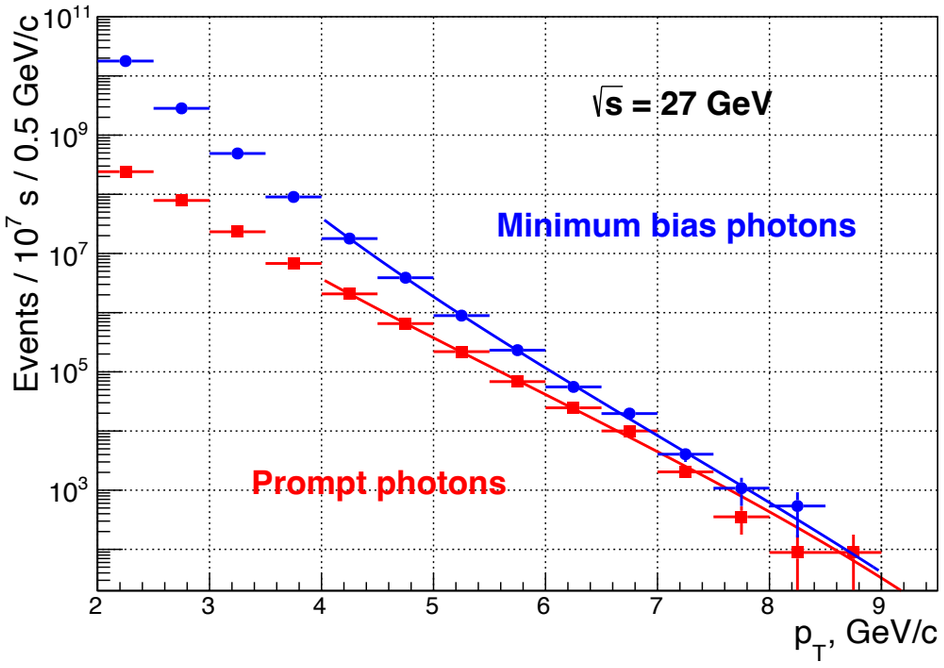
Основные сигналы и фоны

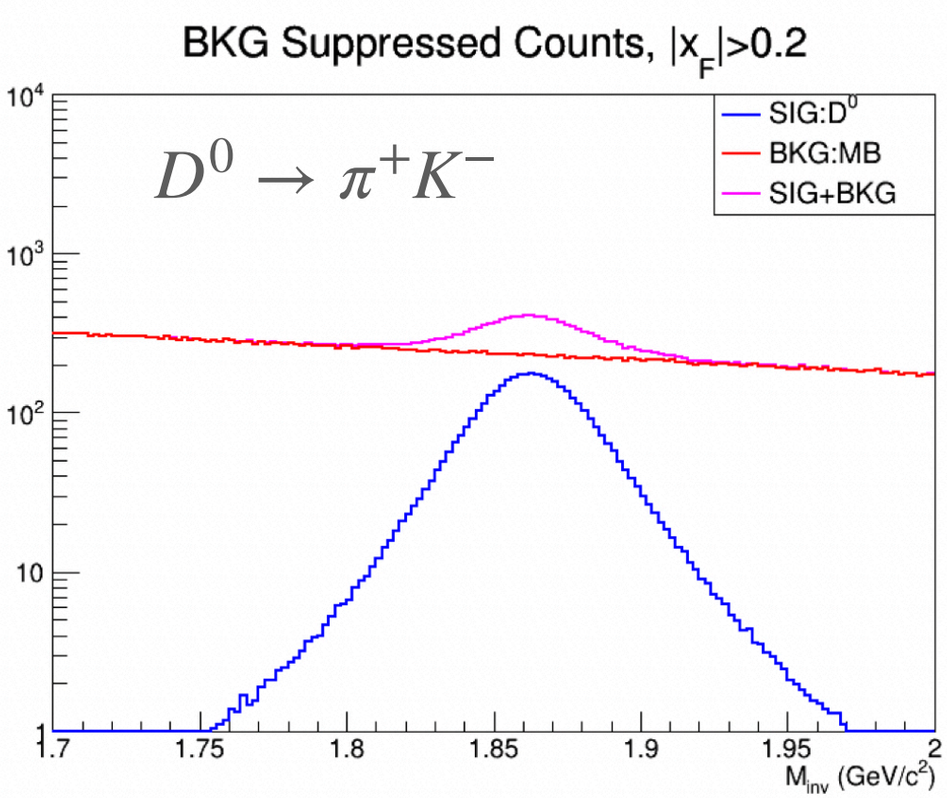
(1 год =10^7 с, 27 ГэВ)





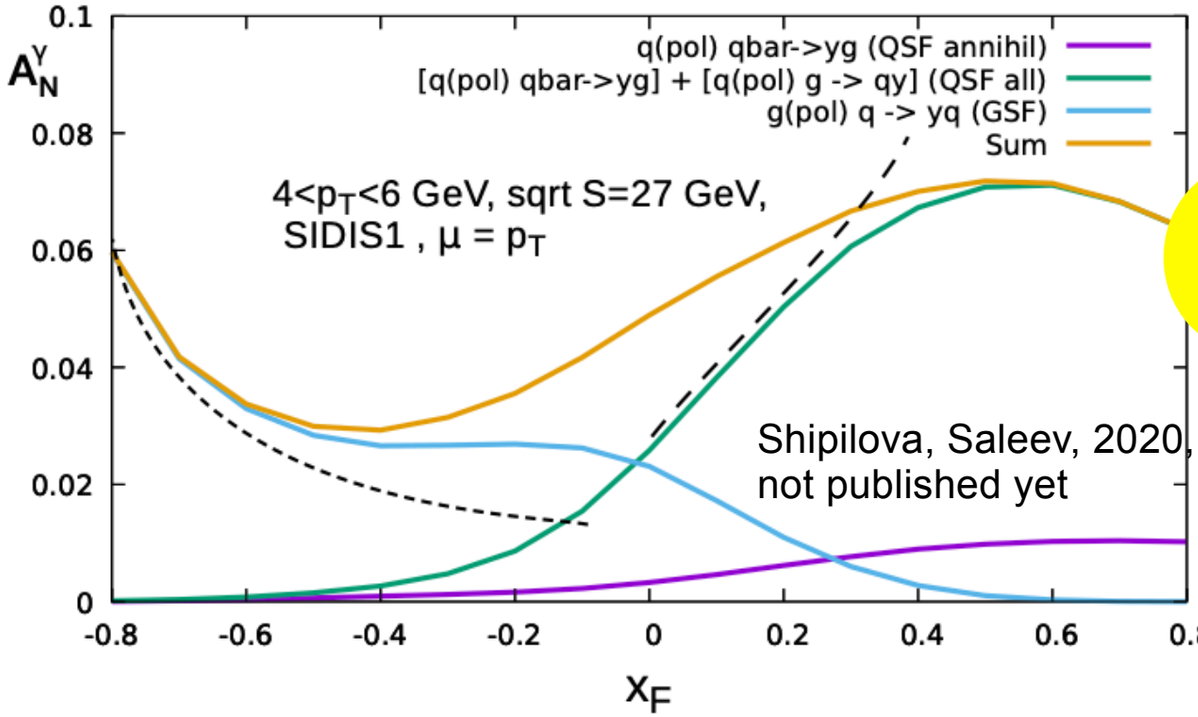




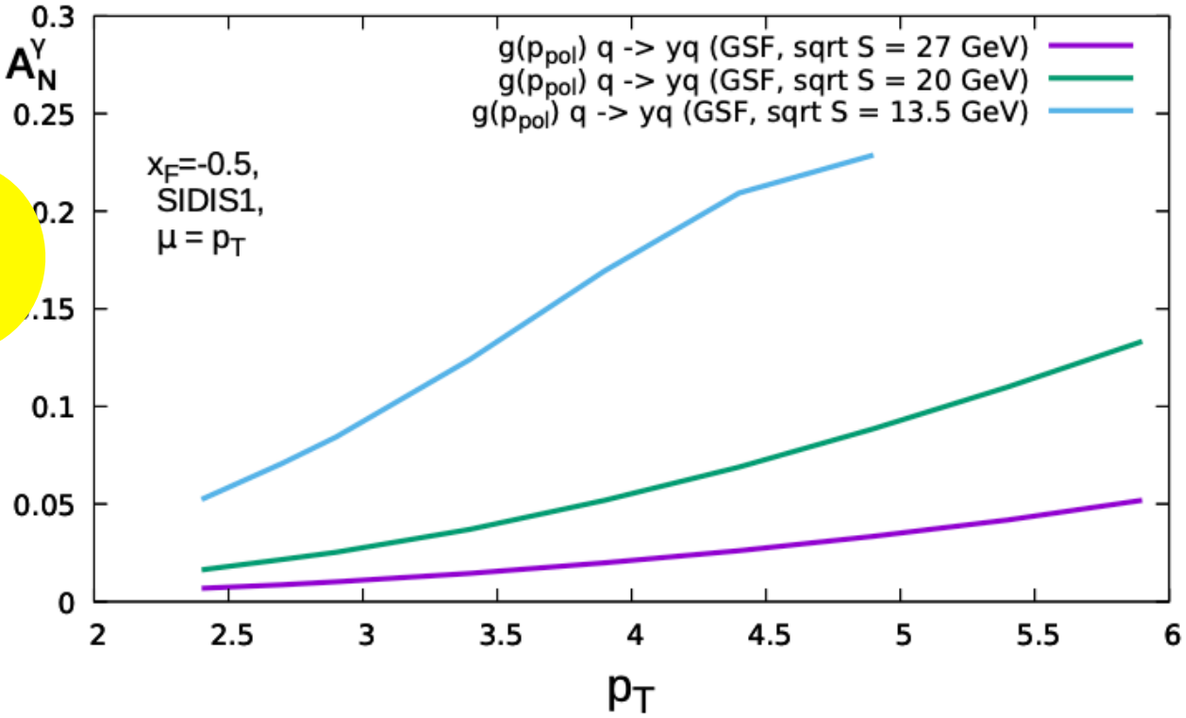


Ожидаемые асимметрии A_N

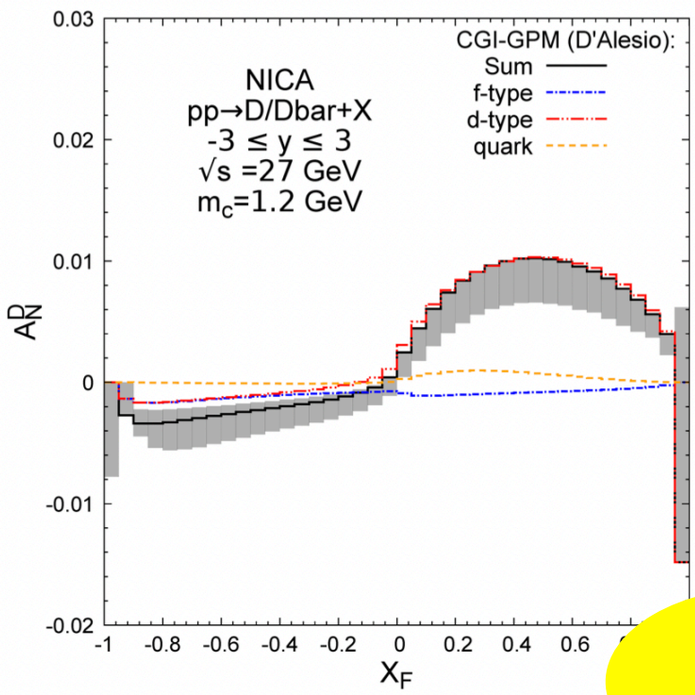
Вклад Сиверс-эффекта



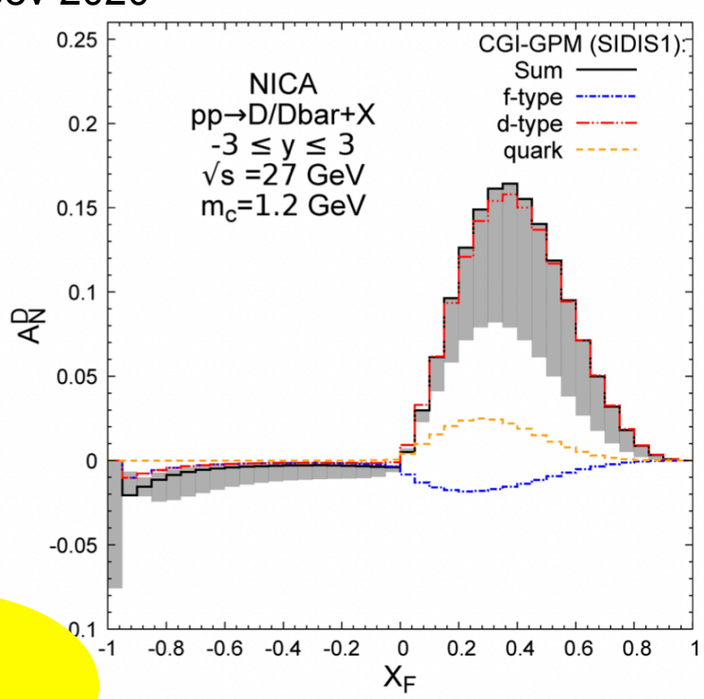
γ

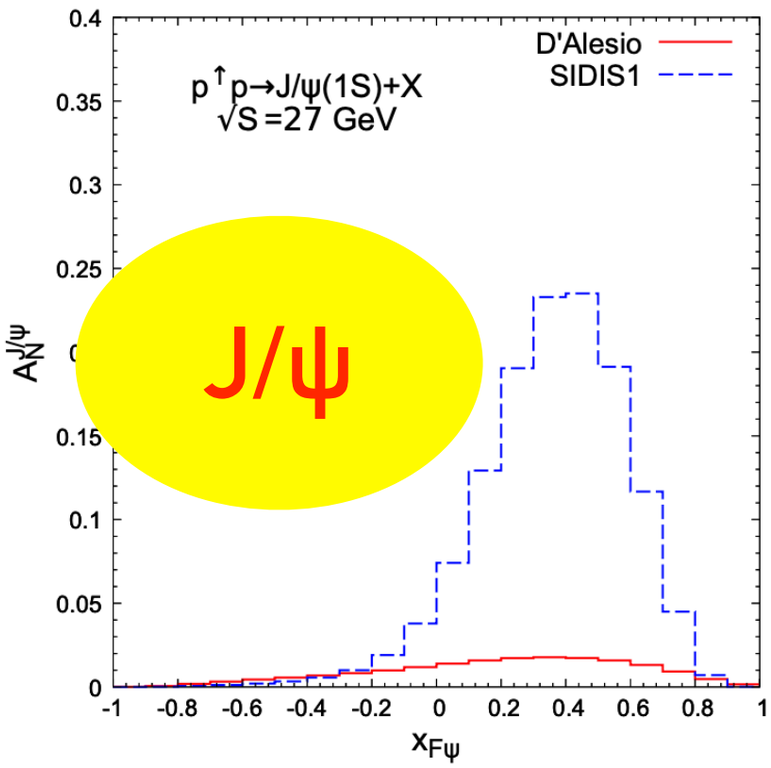


Saleev 2020

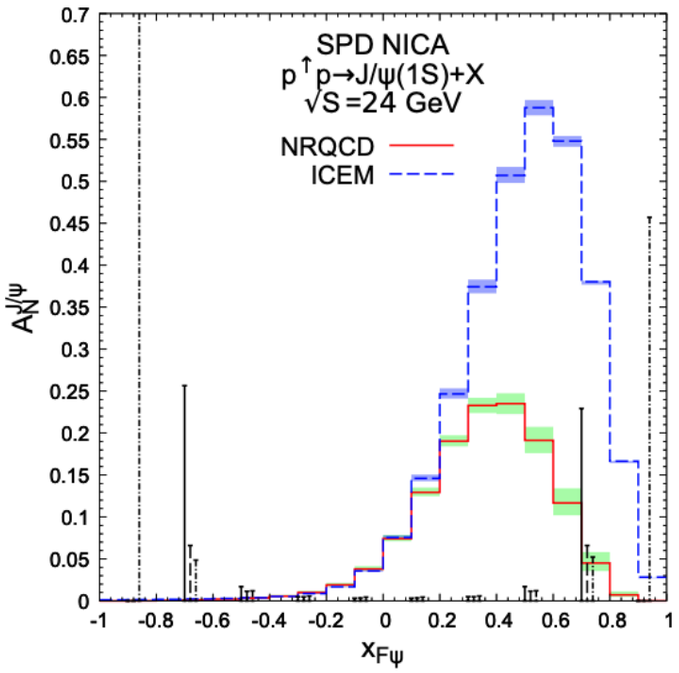


D-mesons

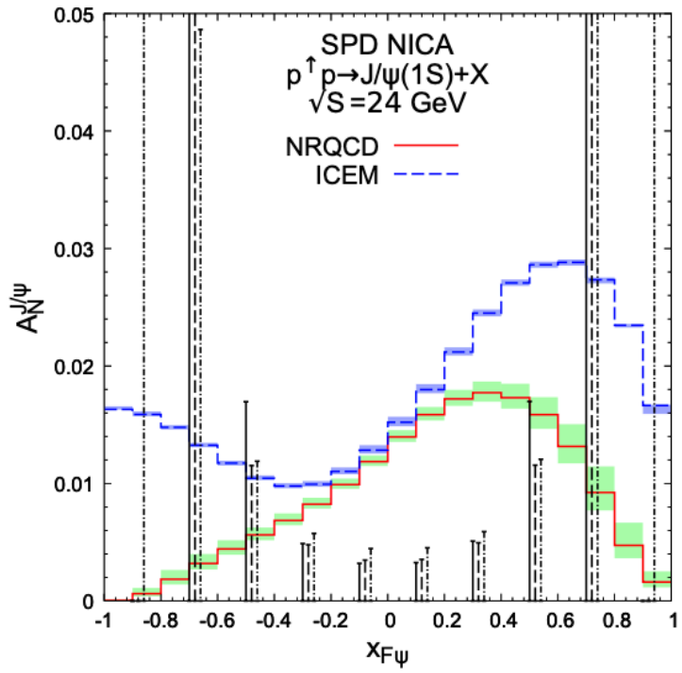


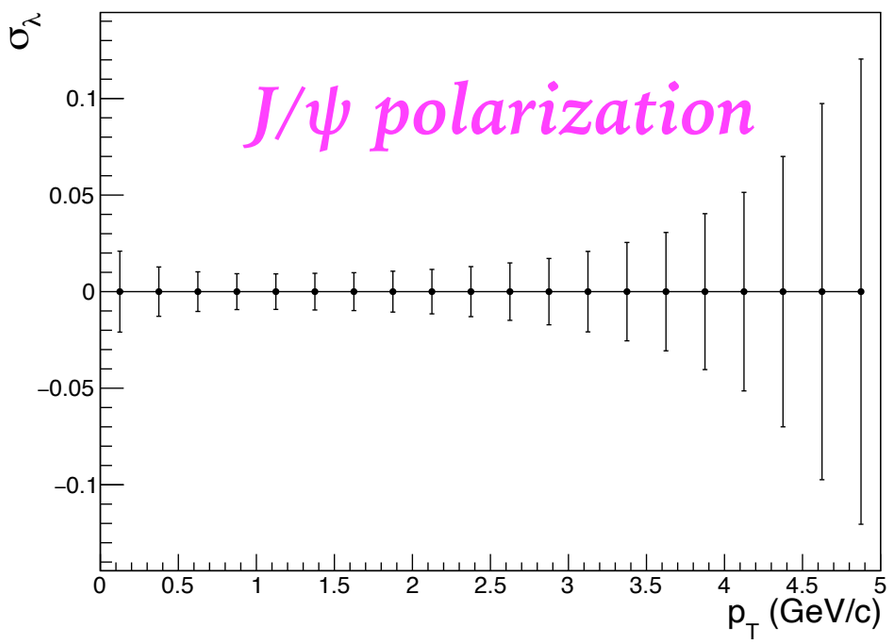


Ожидаемая точность измерения асимметрий

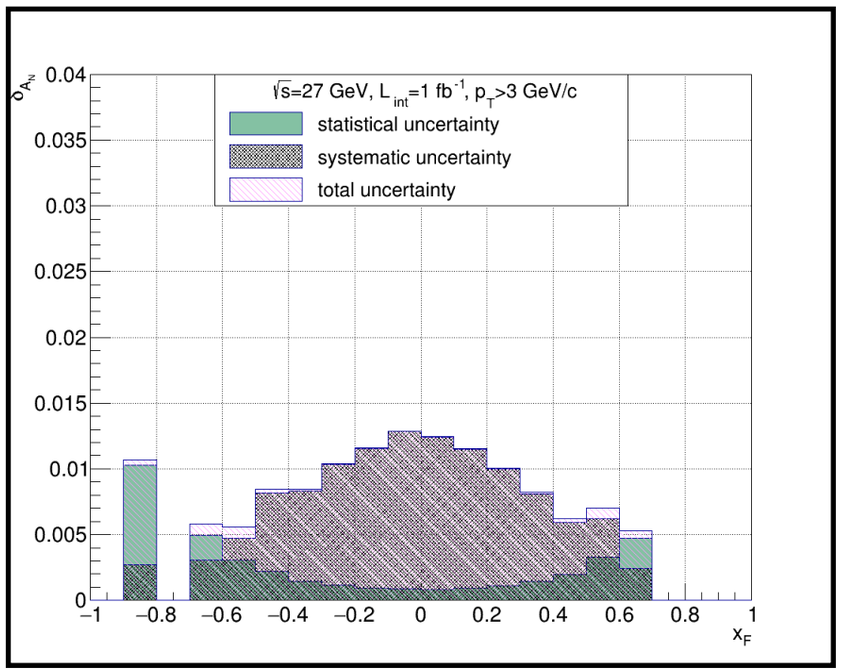


J/ψ

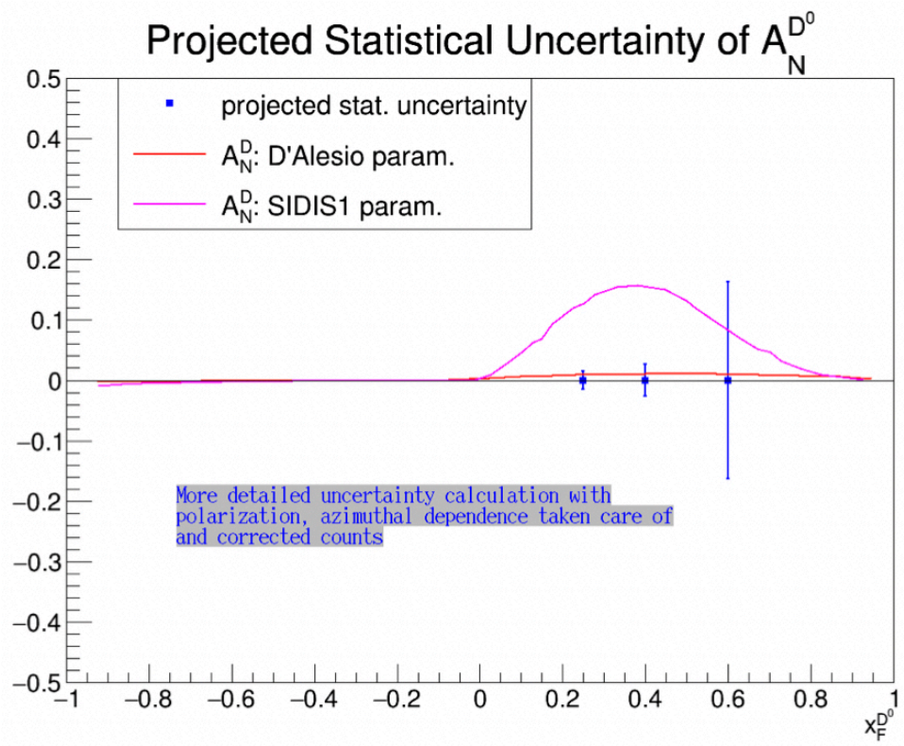




Different inputs for gluon Sivers function

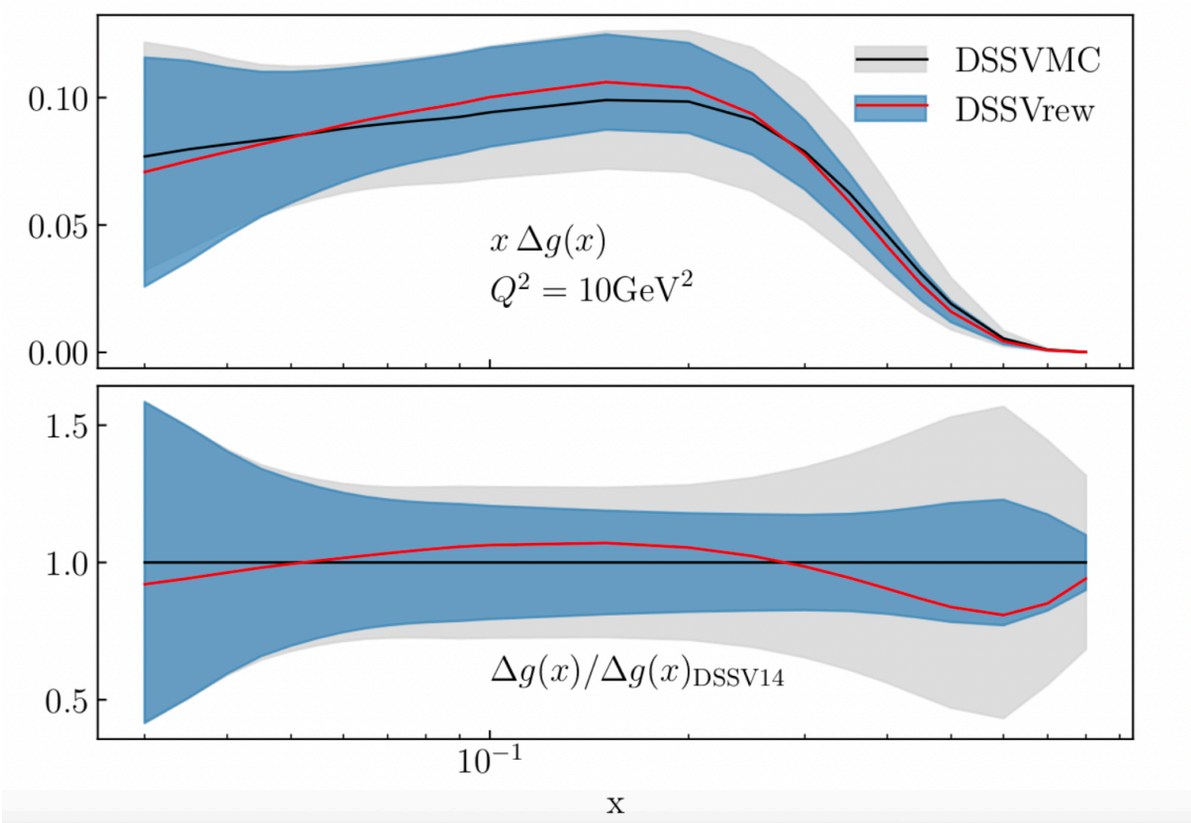


prompt-γ

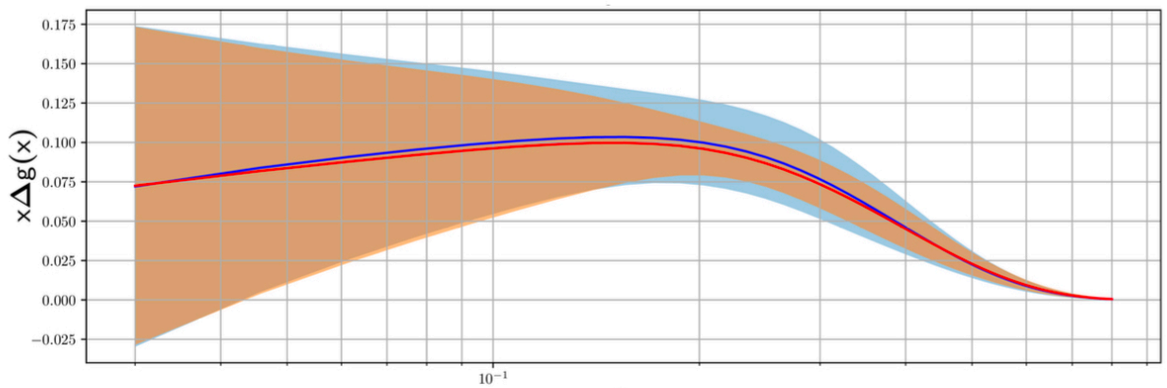


D⁰

Пример ожидаемого влияния SPD результатов на мировые данные $\Delta g(x)$

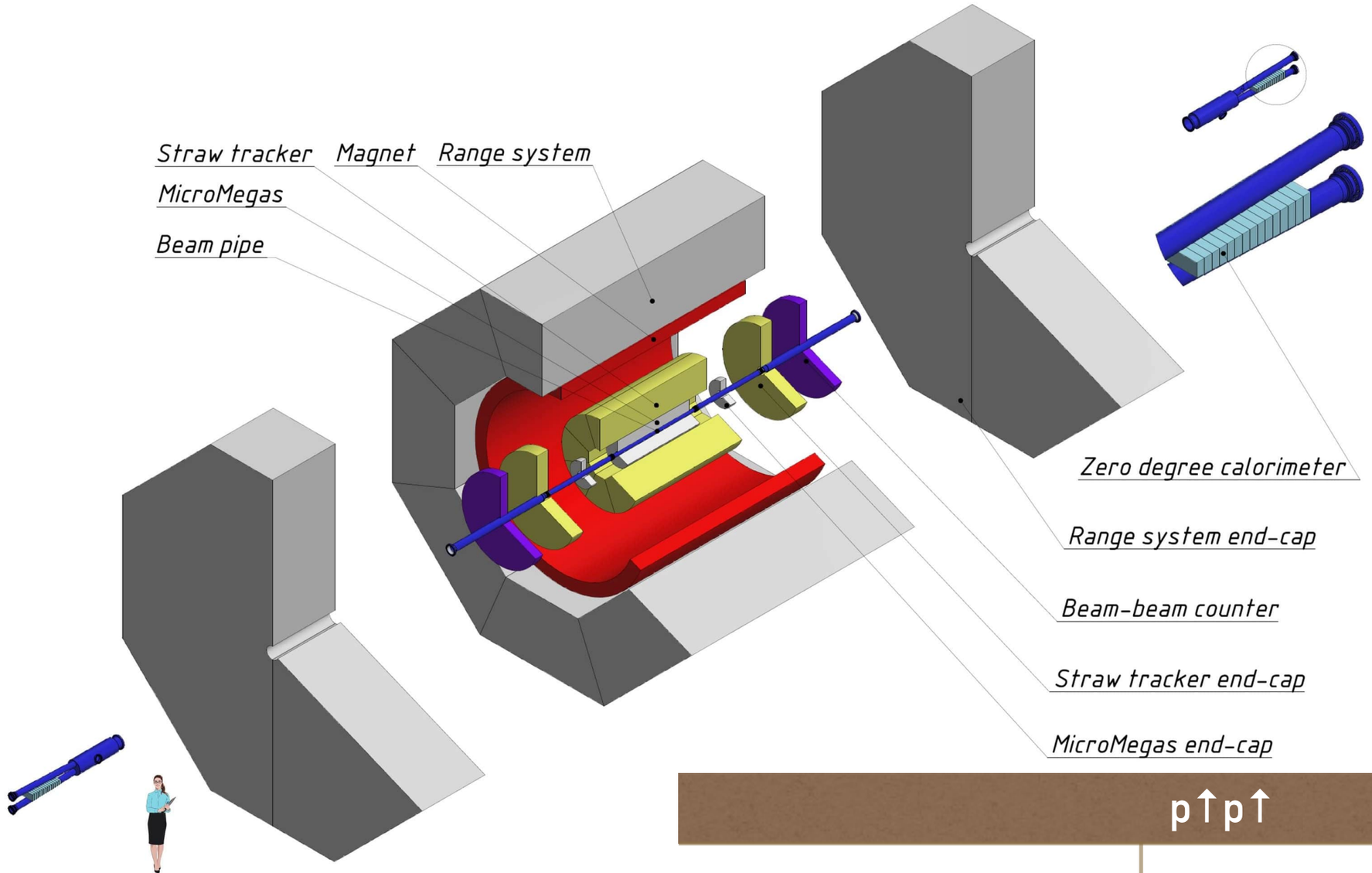


A_{LL} *for prompt photons*



A_{LL} *for* J/ψ

SPD: фаза 1



	p↑p↑	d↑d↑	AA
	Первая фаза		
$\sqrt{s_{NN}}$, GeV	< 9.4	< 4.5	< 4.5
L, 10^{30} cm^{-1} s^{-1}	< 10	< 1	< 0.001
	Вторая фаза		
$\sqrt{s_{NN}}$, GeV	< 27	< 13.5	
L, 10^{30} cm^{-1} s^{-1}	< 100	< 10	

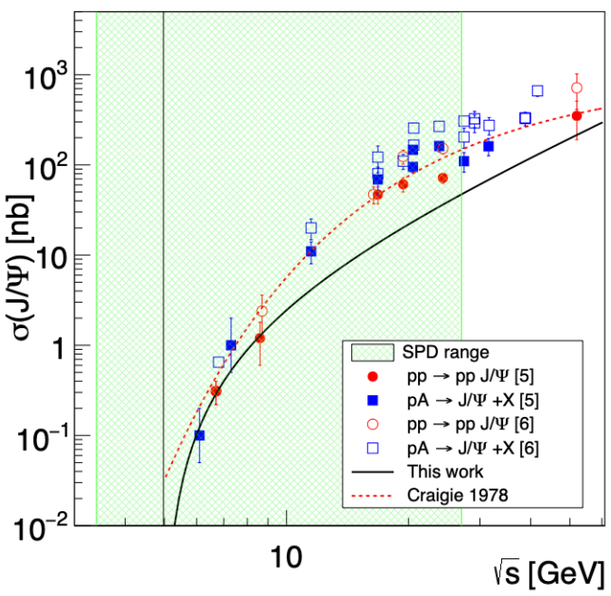
Физика первой фазы

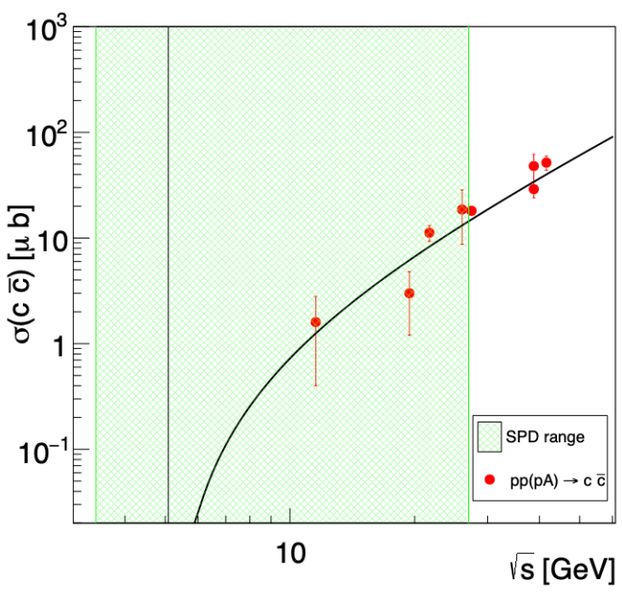
arXiv:2102.08477 Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 6, 1044-1119

Непертурбативный режим *Пертурбативный режим*

$\sqrt{s}$

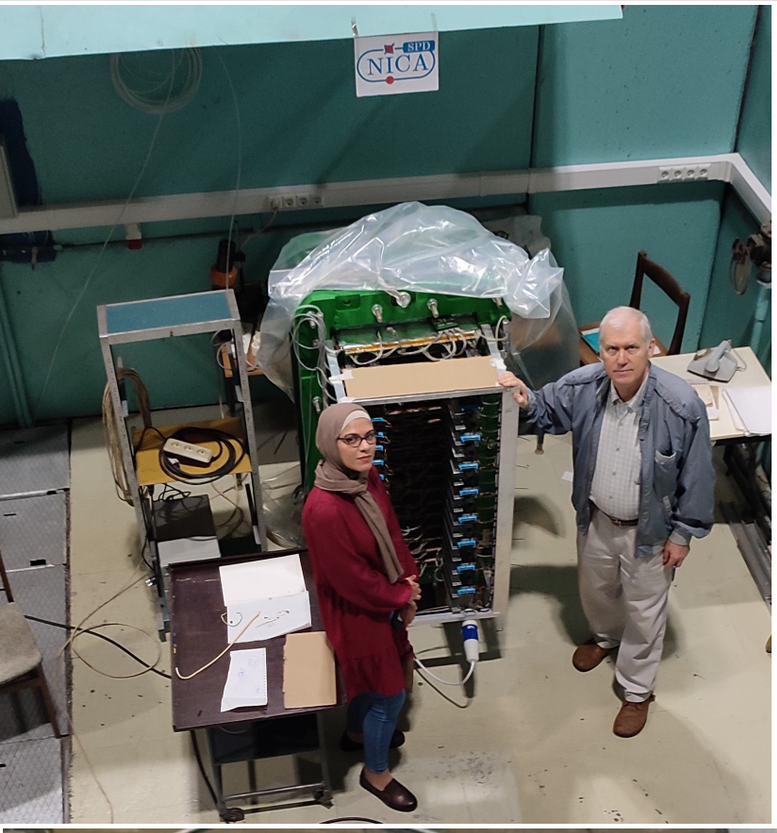
- Спиновые эффекты в упругом p-p и d-d рассеянии
- Спиновые эффекты в рождении гиперонов
- Мультикварковые корреляции
- Дибарионные резонансы $pp \to (6q)^* \to N\,N\,Mesons,$
- Физика столкновений лёгких и промежуточных ядер
- Спиновые эффкты в эксклюзивных процессах
- Гиперядра $dd \to K^+\,K^+\,{}^{4}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{n},$
- Рождение открытого чарма и чармониев у порога





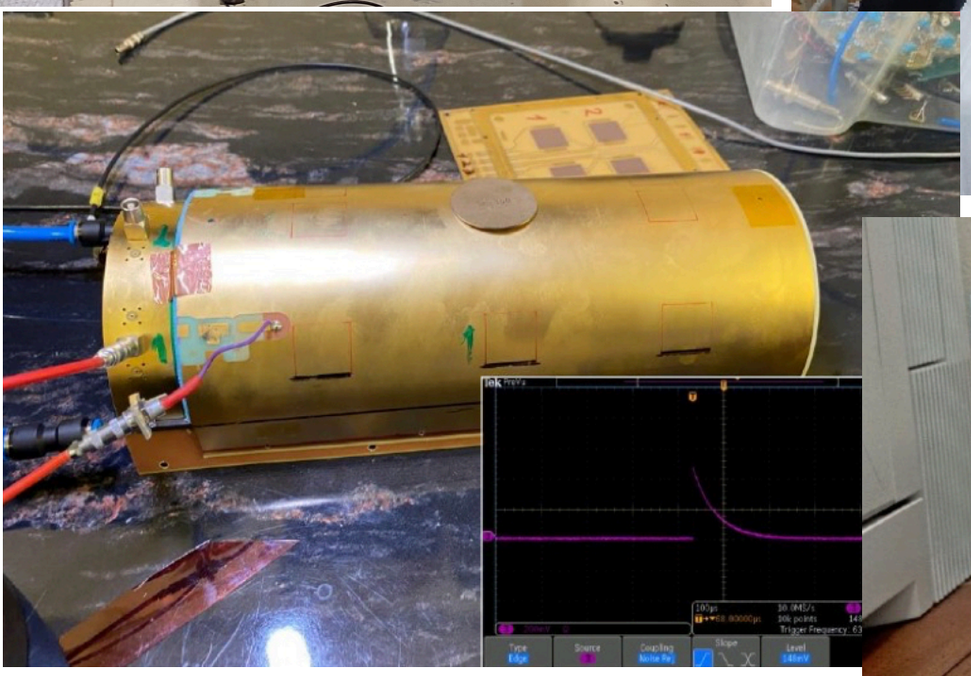
- Вспомогательные измерения для астрофизики
- ...

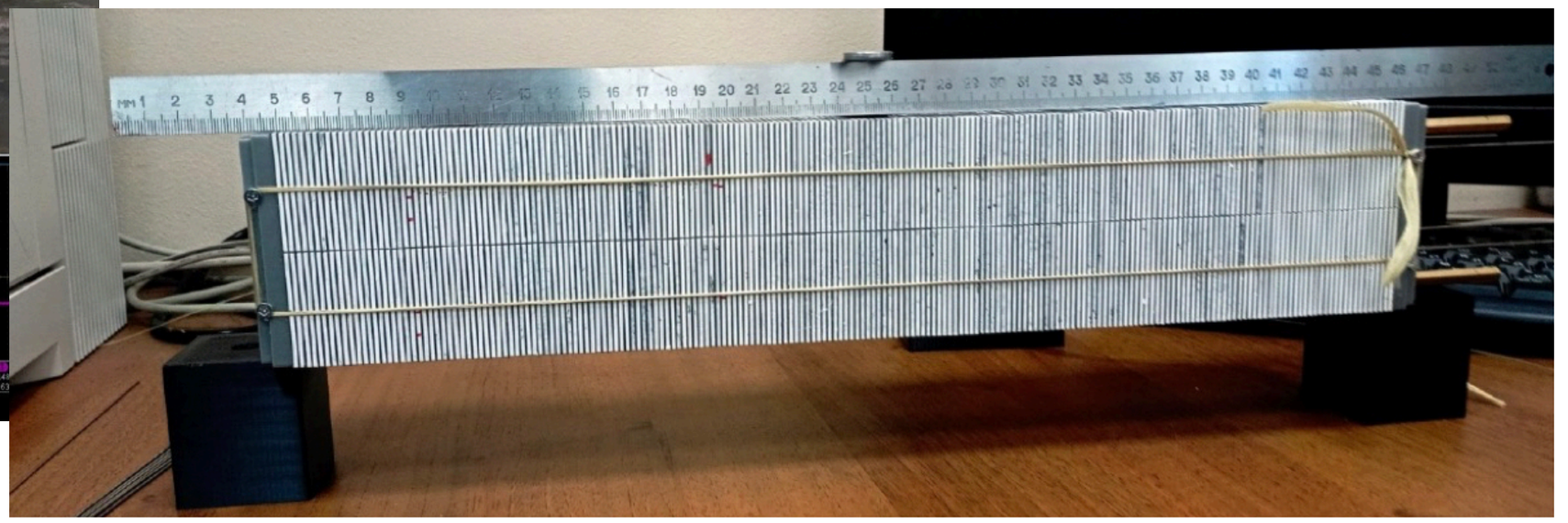
Прототипы подсистем





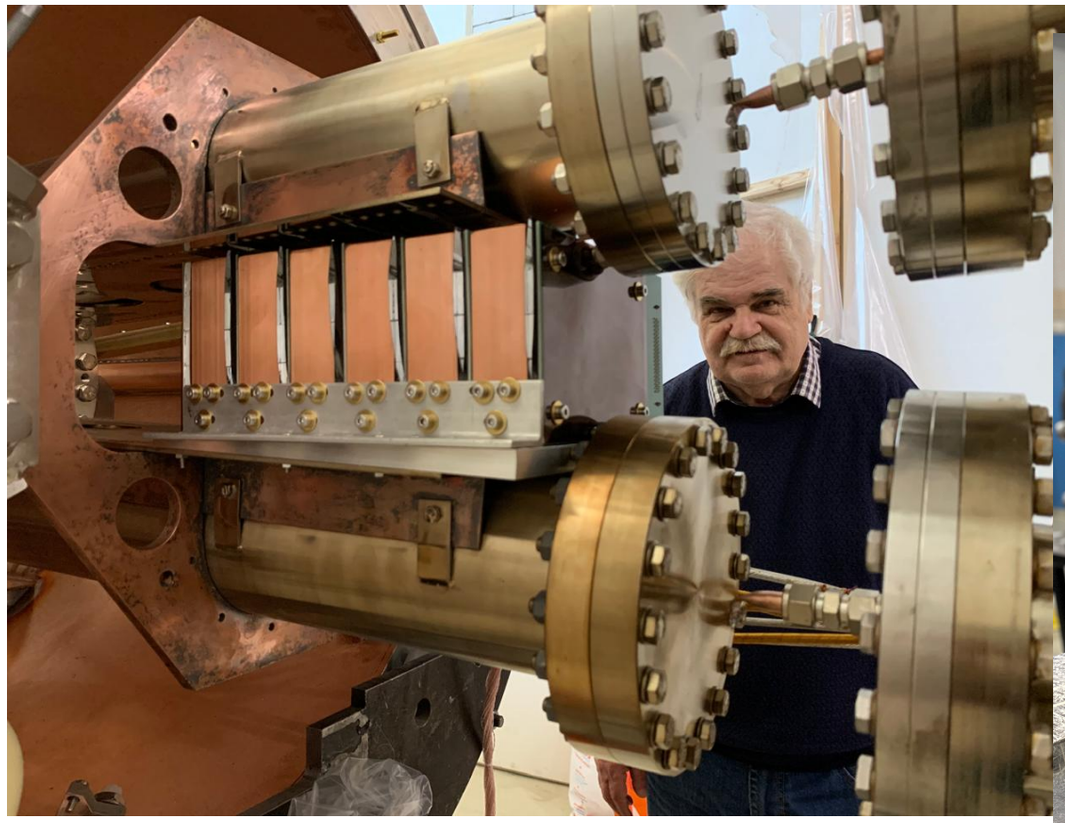






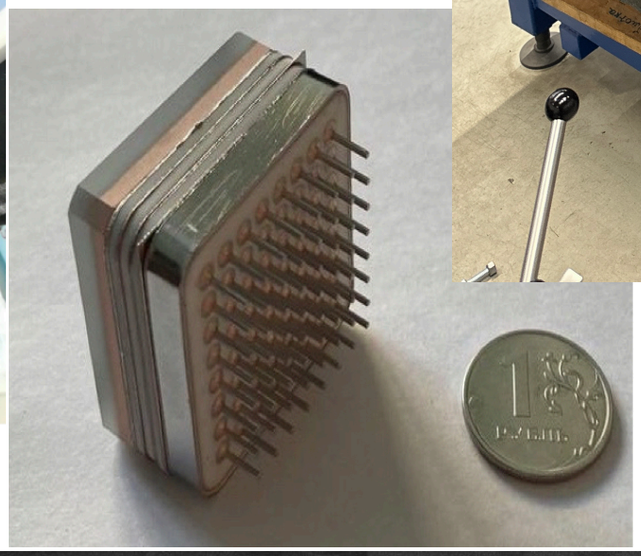
Прототипы подсистем











Экспериментальный зал SPD









Статус проекта

Технический проект SPD прошёл независимую международную экспертизу и опубликован:
Natural Sci. Rev. 1 1 (2024)
https://arxiv.org/abs/2404.08317

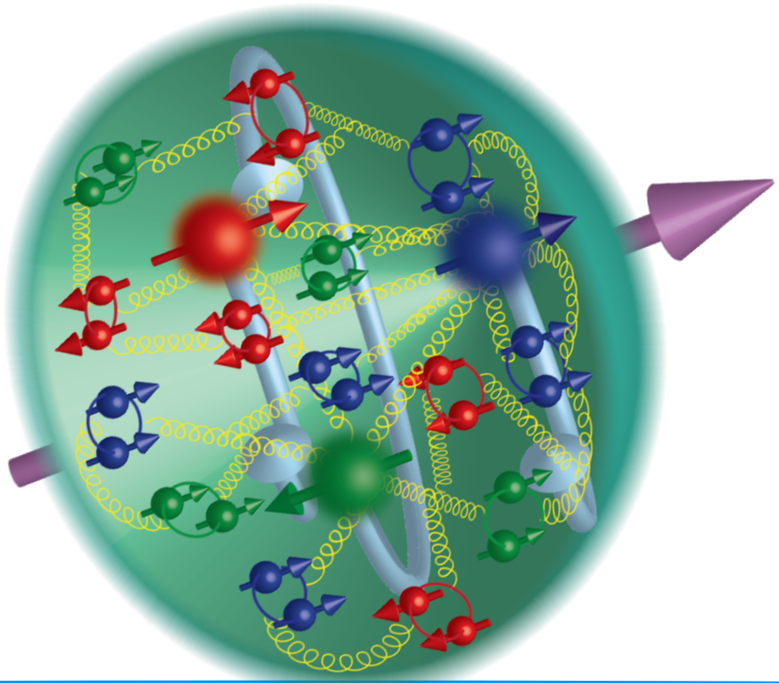


Создание **первой фазы** установки включено в 7-летний план развития ОИЯИ(2024-2030)

Международная коллаборация SPD состоит из почти 400 участников из 36 институтов 15 стран.



Десятилетие 2030+





ГНР: Электрон-ионные коллайдеры EIC, EicC + JLAb

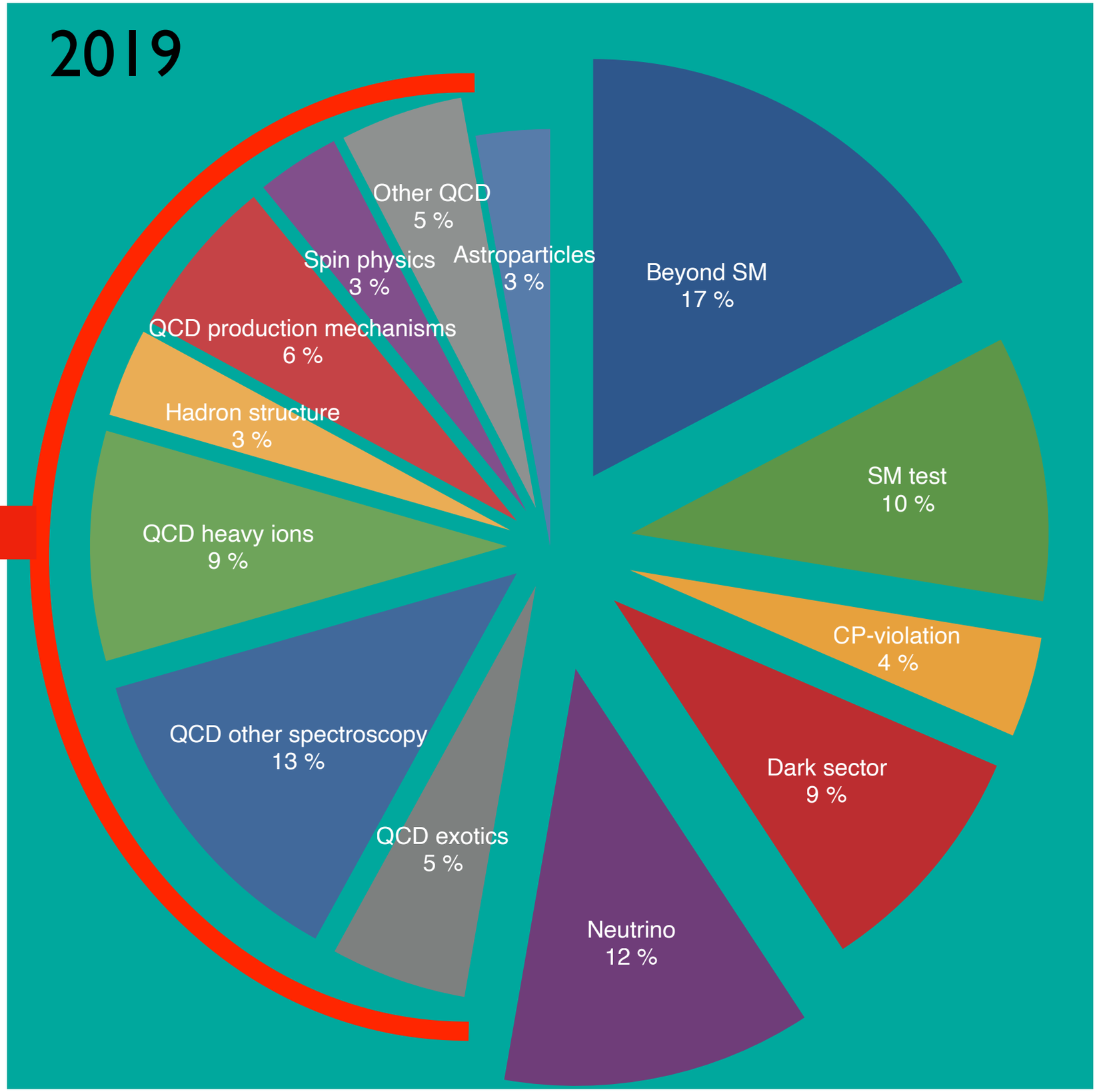
Эксперименты с неподвижной мишенью: LHCspin, DY, etc.

Адронные коллайдеры: ***NICA SPD***

Физика частиц по разделам

КХД

44%

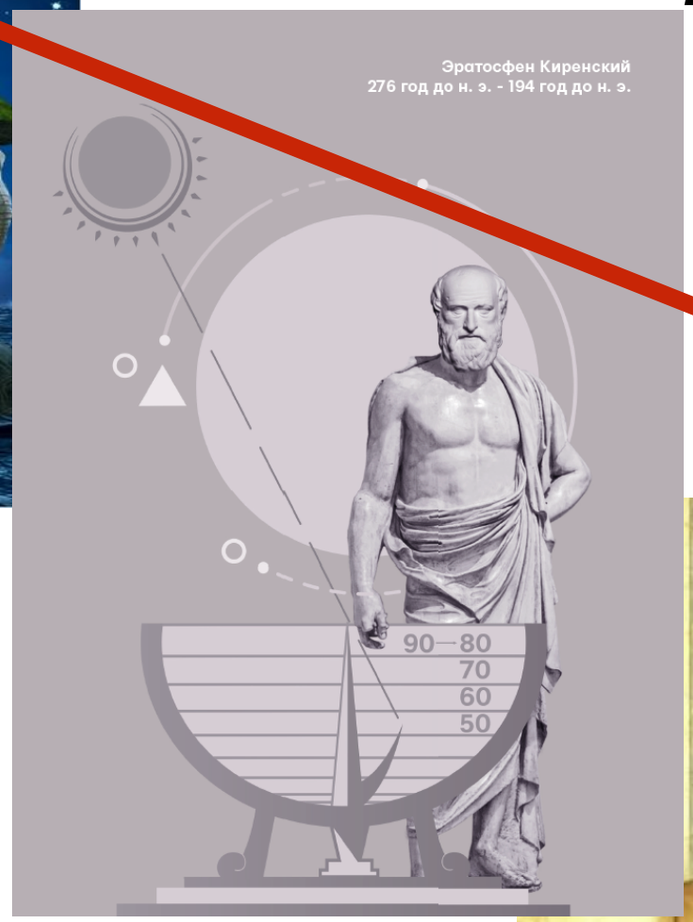


На основе публикаций в arXive

Рост знаний

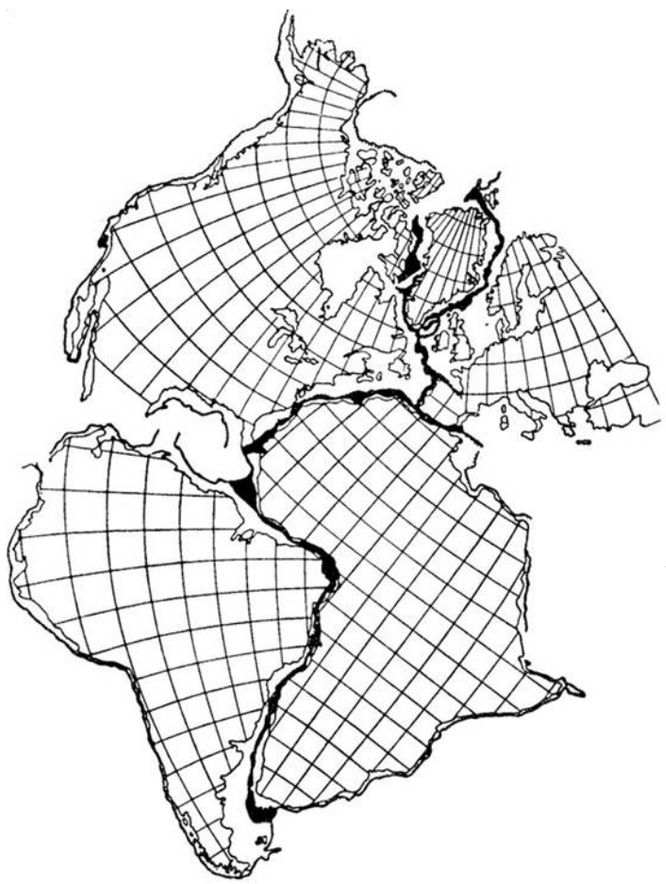


Наивные представления



Земля - шар!
II век до н. э.





Дрейф материков, 1912 г

Великие географические открытия, XV-XIX век