

Электрон-Ионный Коллайдер



В.А. Гузей



Петербургский Институт Ядерной Физики (ПИЯФ),
НИЦ “Курчатовский Институт”, Гатчина

План:

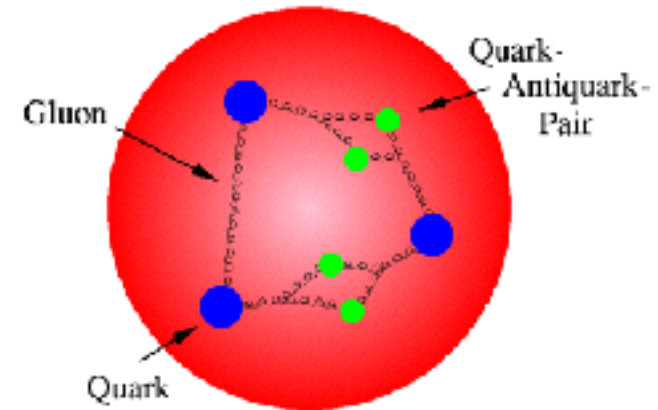
- Электрон-Ионный Коллайдер (ЭИК): цели, фундаментальные проблемы, основные параметры
- Ключевые эксперименты физической программы ЭИК
- Реализация ЭИК: eRHIC vs. JLEIC
- Статус проекта ЭИК

Электрон-Ионный Коллайдер: цели

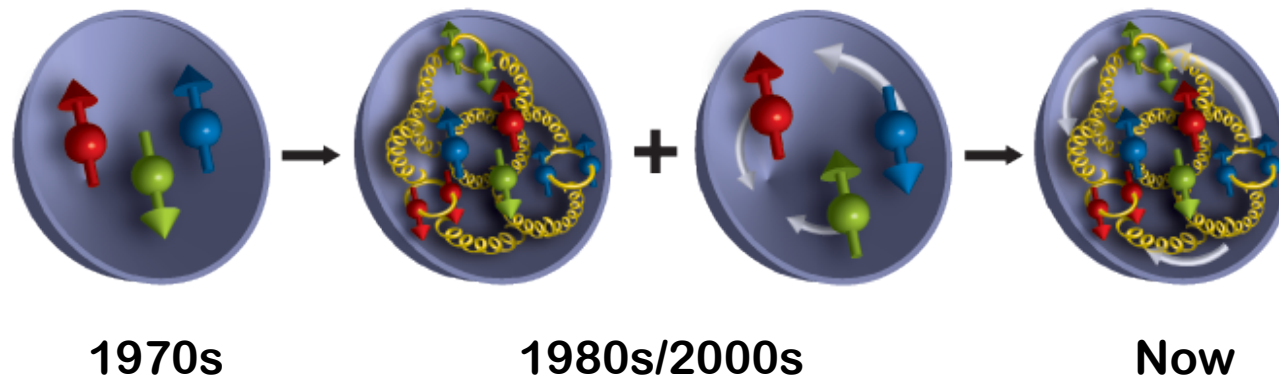
- **Электрон-Ионный Коллайдер** - проект нового коллайдера поляризованных электронов и ионов в США на базе RHIC (**eRHIC**) или JLab (**JLEIC**).
- Обеспечить преемственность программы ядерной физики на ускорителях после 2025 г., когда РИК (RHIC II) и Джефферсоновская лаборатория (JLab 12 GeV) исчерпают свои программы.
- Объединить пользователей RHIC, JLab, привлечь мировое сообщество.
- Установка для тестирования новых концепций и технологий в ускорительной технике.
- Ответить на центральный вопрос ядерной физики о природе наблюдаемой материи вокруг нас: **Как глюоны и кварки образуют нуклоны и ядра?**
- Расширить кинематические границы и точность измерений: ЭИК должен иметь потенциал для открытий и прецизионных измерений.
- ЭИК - мировой лидер по изучению **КХД**.

ЭИК: фундаментальные проблемы

- **Загадка массы протона:** токовые кварки несут ~10% массы протона. Какова роль квантовых кварк-антикварковых флуктуаций и глюонов?

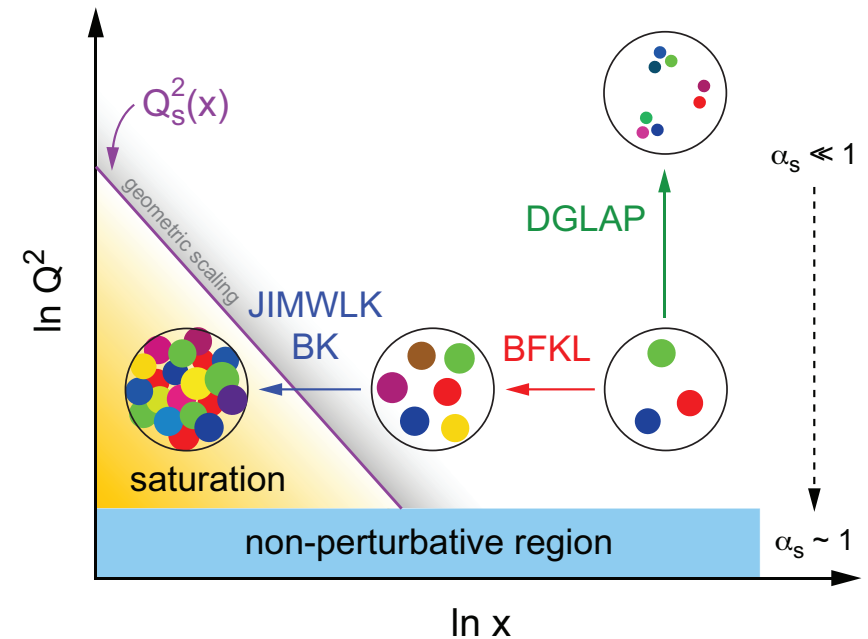


- **Загадка спина протона:** кварки несут ~30% спина протона. Какова роль глюонов и орбитального движения кварков и глюонов? Как кварки и глюоны распределены в координатном и импульсном пространствах?

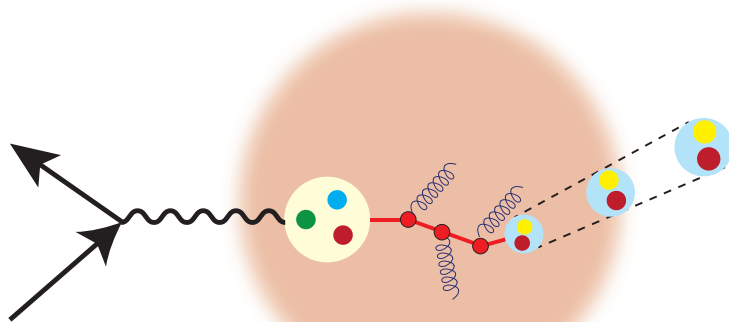


ЭИК: фундаментальные проблемы (2)

- **Глюонная плотность в ядрах при высоких энергиях:** Каково влияние ядерной среды? Происходит ли явление насыщения при высокой плотности глюонов и каковы его свойства?



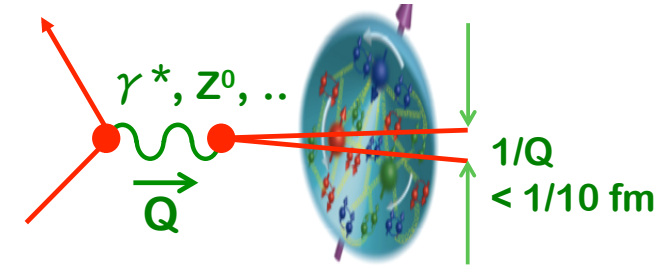
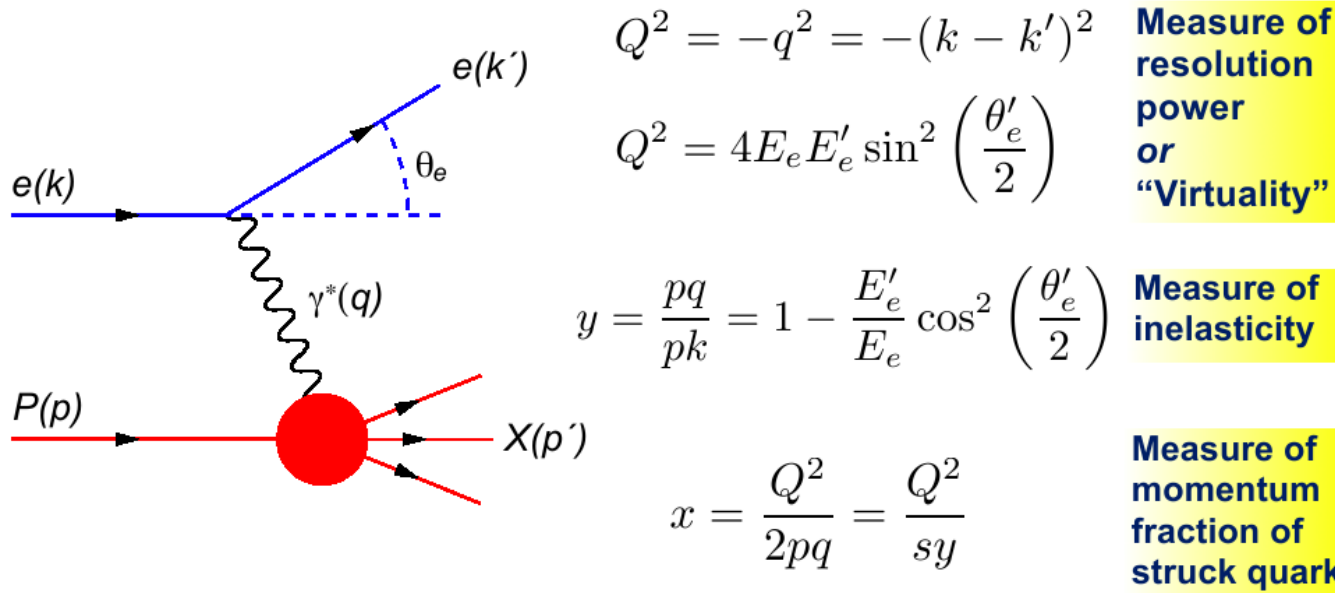
- **Природа адронизации и конфайнмента:** Как быстрые цветные заряды взаимодействуют с ядерной средой?



- важный вопрос в физике тяжелых ионов
- ЭИК позволяет контролировать энергию фотона и длину ядерной среды

ЭИК: “КХД микроскоп”

- Традиционно микроскопическая структура адронов изучается в **глубоконеупругом рассеянии (DIS)**

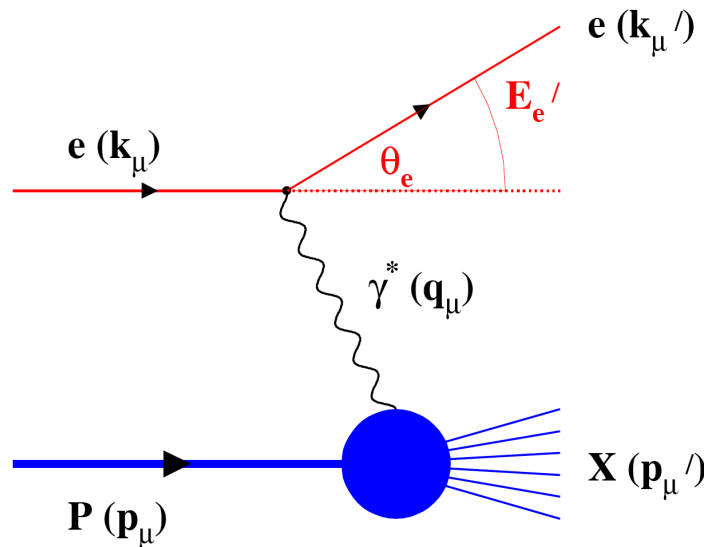


$$\frac{d^2\sigma^{ep \rightarrow eX}}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha_{e.m.}^2}{xQ^4} \left[\left(1 - y + \frac{y^2}{2} \right) F_2(x, Q^2) - \frac{y^2}{2} F_L(x, Q^2) \right]$$

Основные характеристики:

- точно-подобный пробник → чистое теоретическое описание и интерпретация
- контроль партонной кинематики
- возможность изучать также полуинклюзивные и упругие конечные состояния → 3х-мерная партонная структура

ЭИК: “КХД микроскоп” (2)



Q^2 → Measure of resolution

y → Measure of inelasticity

x → Measure of momentum fraction
of the struck quark in a proton

$$Q^2 = S x y$$

Inclusive events: $e+p/A \rightarrow e'+X$

Detect only the scattered lepton in the detector

Semi-Inclusive events: $e+p/A \rightarrow e'+h(\pi, K, p, \text{jet})+X$

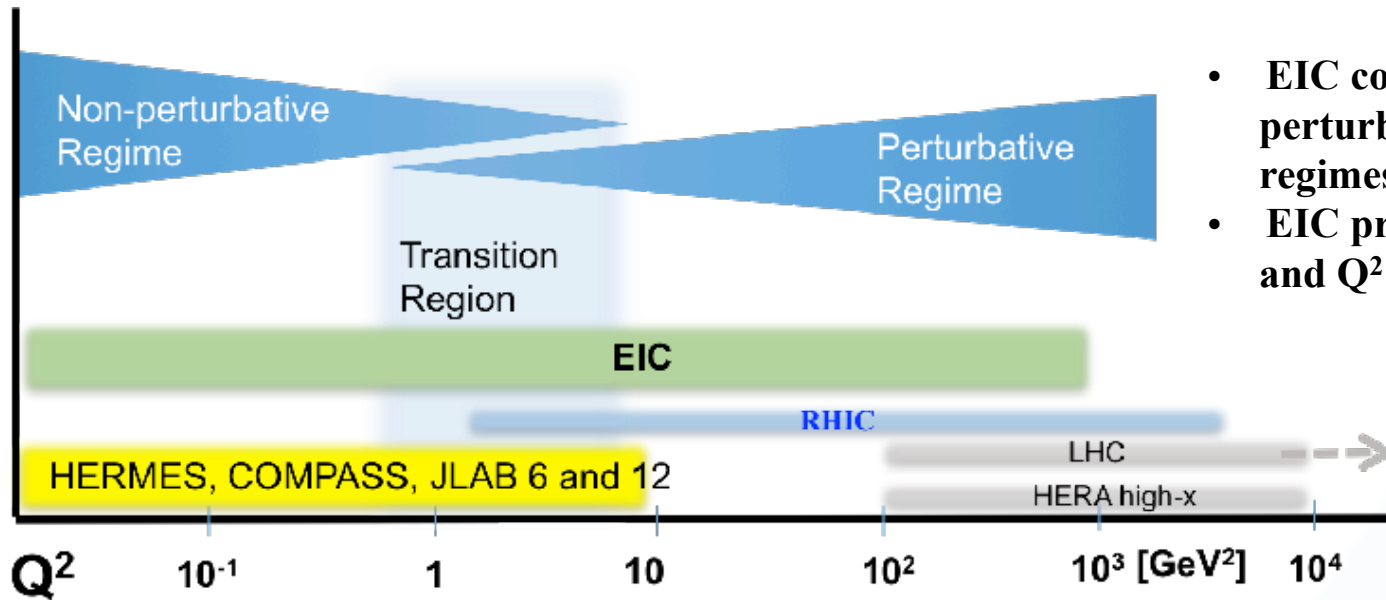
Detect the scattered lepton in coincidence with identified hadrons/jets

Exclusive events: $e+p/A \rightarrow e'+p'/A'+h(\pi, K, p, \text{jet})$

Detect every things including scattered proton/nucleus (or its fragments)

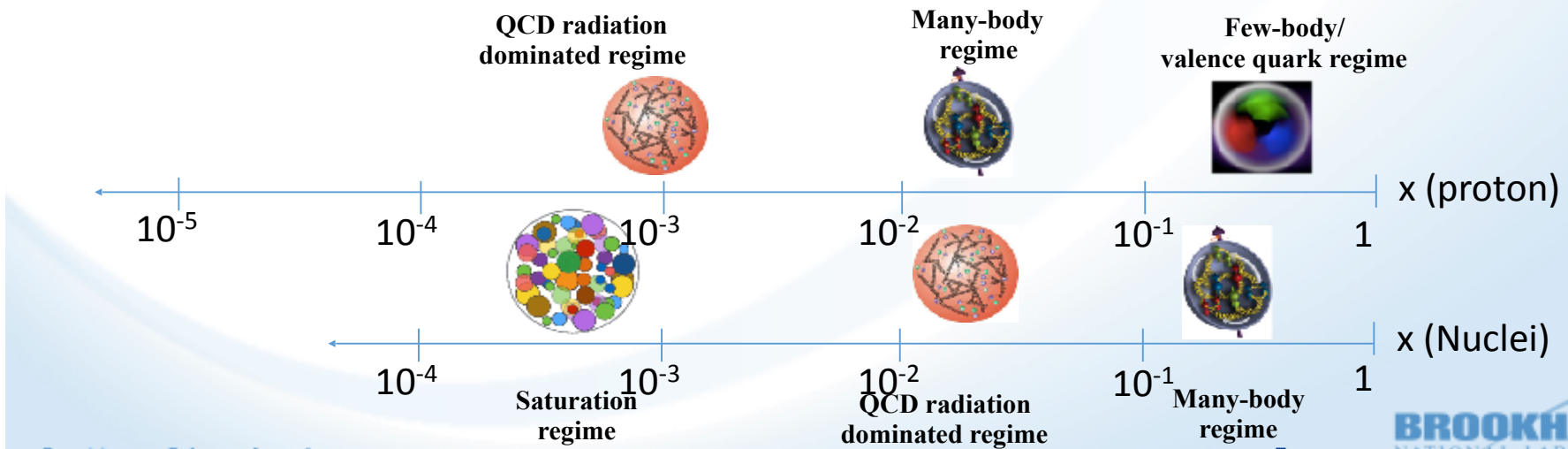
Основные параметры ЭИК: энергия

- Энергия в системе центра масс $\sim 20-100$ ГэВ, возможность увеличить до ~ 150 ГэВ \rightarrow широкая область Q^2 и x .



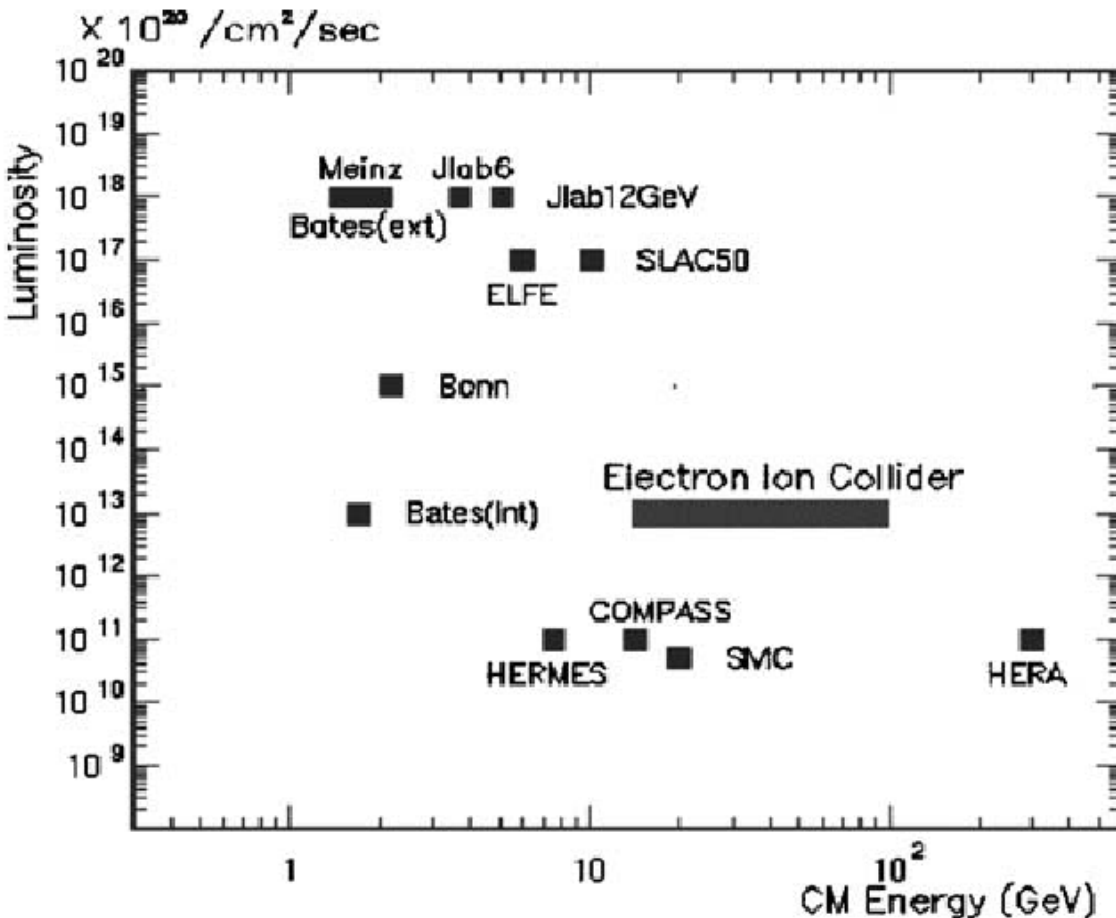
- EIC covers non-perturbative, perturbative and transition regimes
- EIC provides long evolution range and Q^2 up to ~ 1000 GeV^2 (0.01 fm)

Going from large to small x nucleons and nuclei reveal their full structure

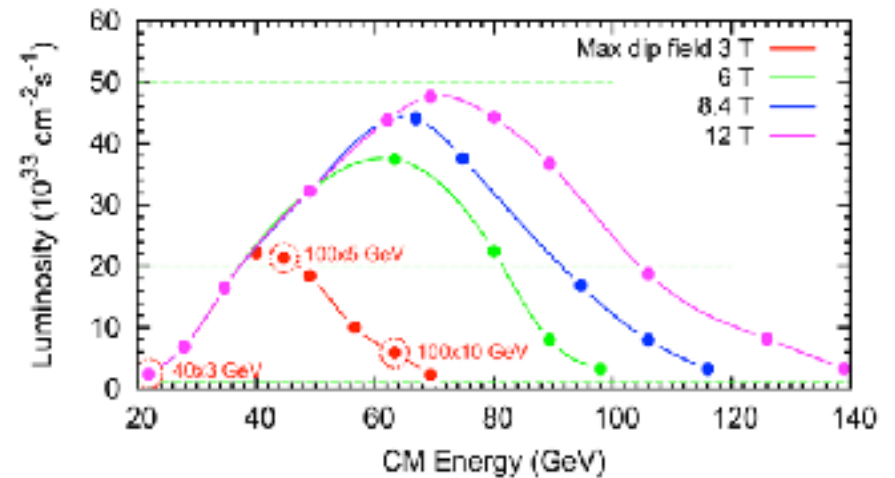


Основные параметры ЭИК: светимость

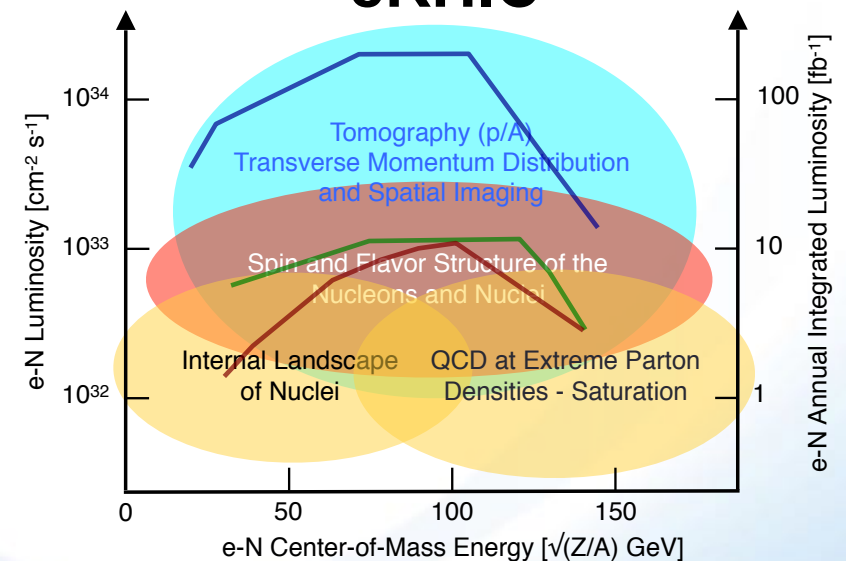
- Высокая светимость столкновений $10^{33-34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ → прецизионные измерения полуинклюзивных и эксклюзивных процессов.



JLEIC

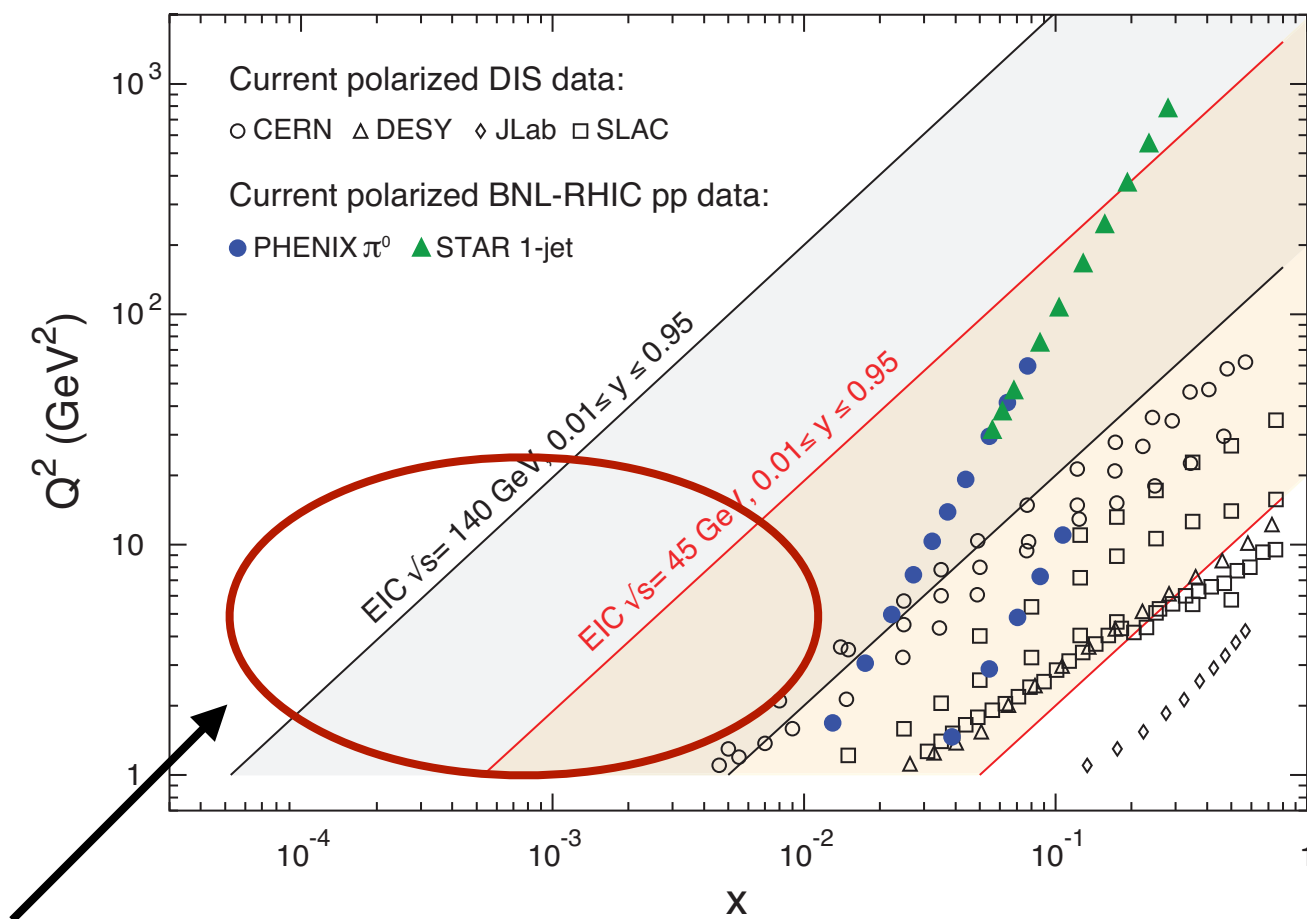


eRHIC



Основные параметры ЭИК: поляризация

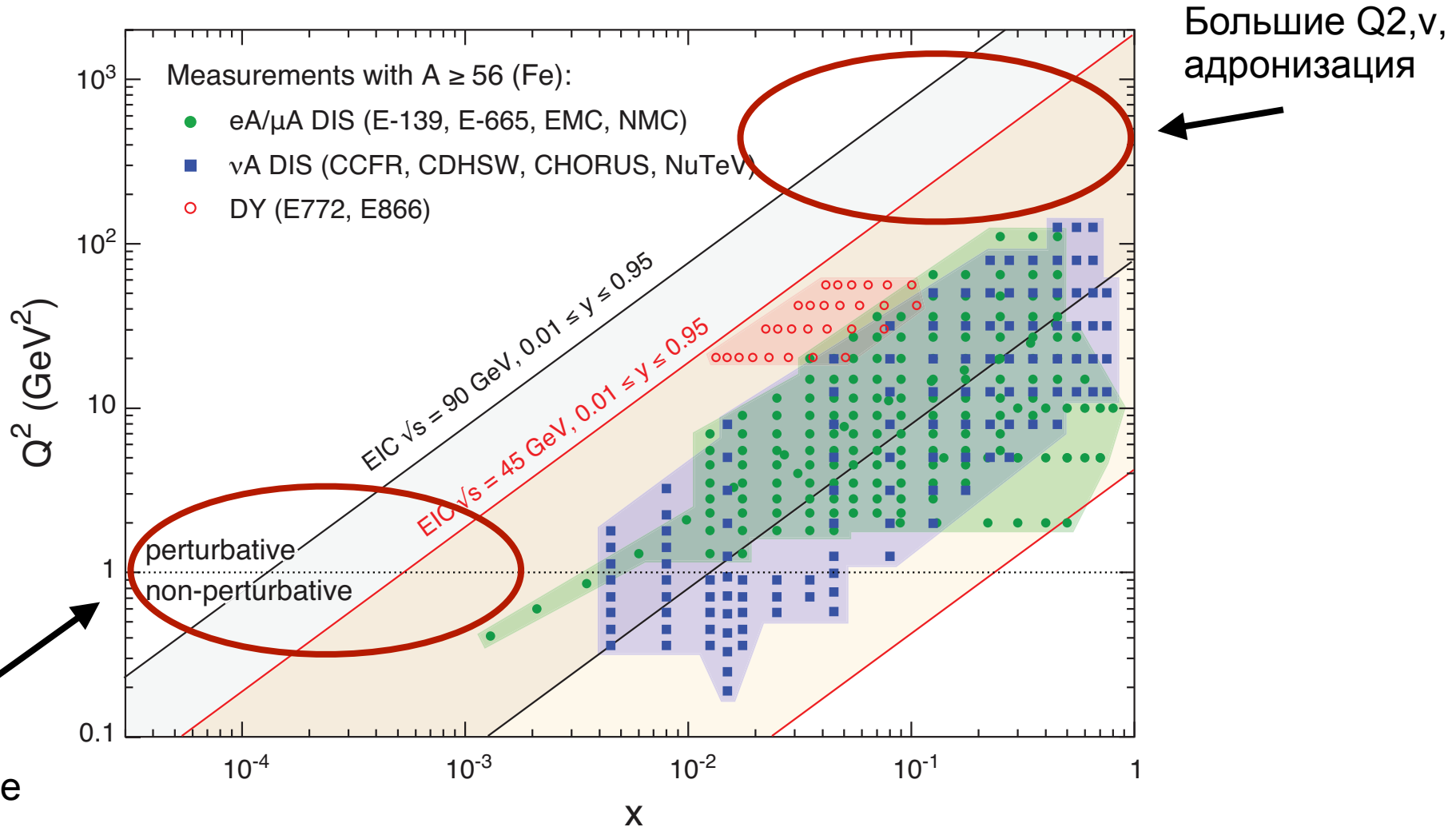
- Высокая поляризация $\sim 70\%$ пучков электронов, протонов, легких ядер (D, He-3) \rightarrow поляризованное DIS, 3х-мерные распределения из полуинклюзивных (TMDs) и эксклюзивных процессов (GPDs).



- Широкая область Q^2 и малых x в поляризованном DIS \rightarrow определение вклада глюонов ΔG в спин протона.

Основные параметры ЭИК: ядра

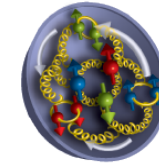
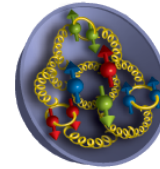
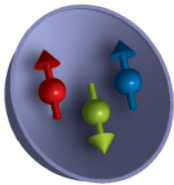
- Ускорение легких (**D, He-3**) и тяжелых (**U, Pb**) ядер → впервые DIS на ядрах, кварковые и глюонные ядерные плотности при малых x , насыщение ядерной глюонной плотности.



Ключевые эксперименты: поляризация ГЛЮОНОВ

- Спин протона в КХД:

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



Орбитальный угловой момент партонов:
неизвестен, через измерения GPDs и КХД на решетке

Кварковая поляризация:

хорошо измерена на фиксированных мишенях

$$\frac{1}{2} \sum_{q=u,d,d} \int dx (\Delta q + \Delta \bar{q}) \sim 30\%$$

→ “спиновый кризис”.

Глюонная поляризация:

спиновая программа РИК, большие неопределенности особенно за счет области малых x .

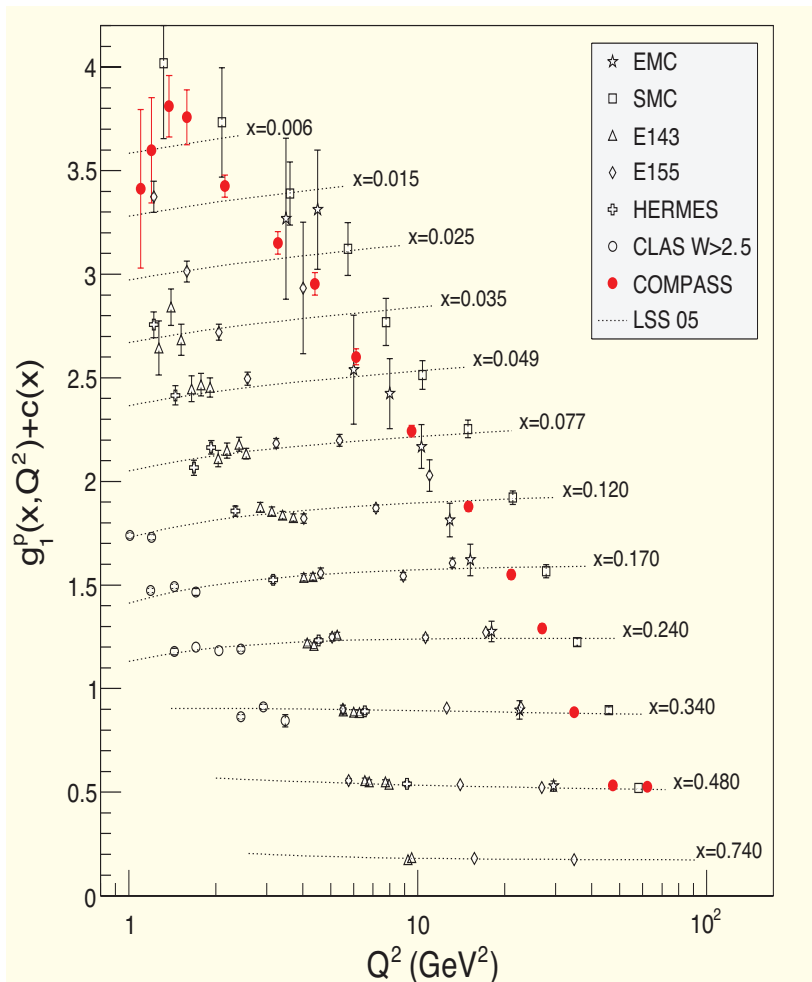
$$\Delta G = \int_{x_{min}}^{x_{max}} dx \Delta g(x) \sim 0 \pm 20\%$$

Ключевые эксперименты: поляризация глюонов (2)

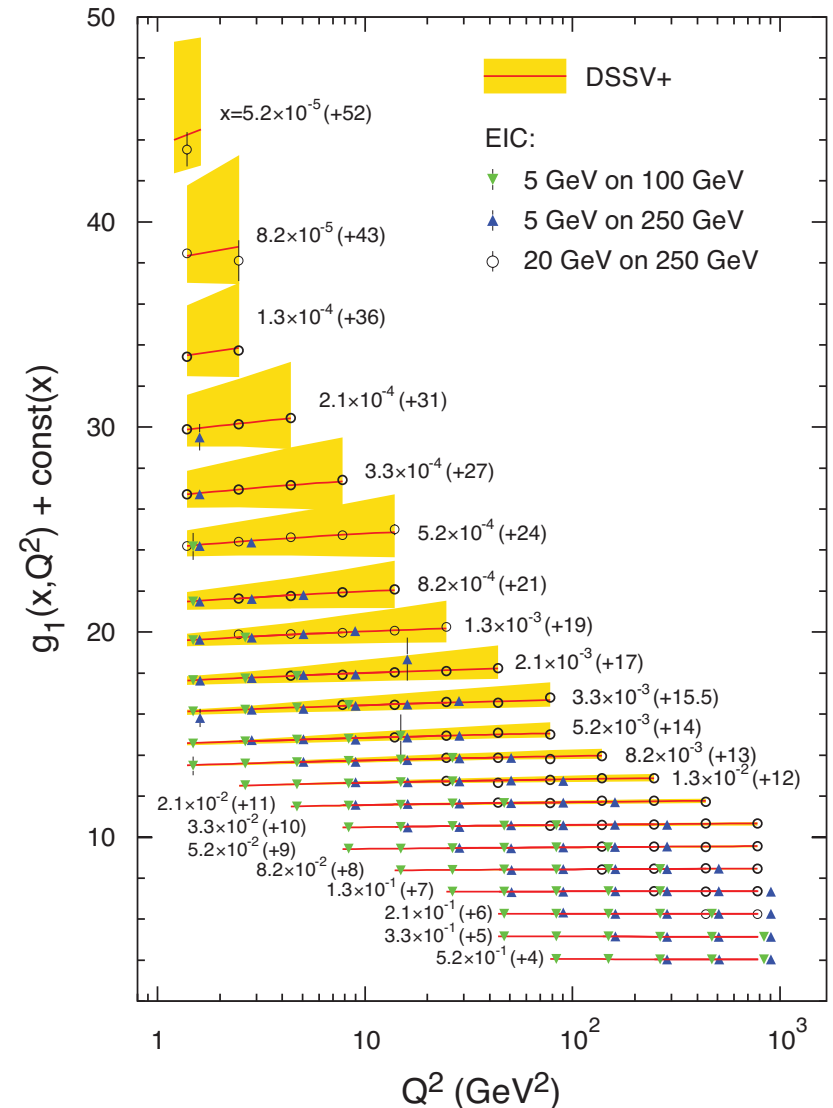
- Измерение структурной функции протона $g_1^p(x, Q^2)$ на ЭИК и извлечение $\Delta g(x)$ из нарушения скейлинга:

$$\frac{dg_1^p(x, Q^2)}{d \log Q^2} \propto -\Delta g(x, Q^2)$$

Мировые данные



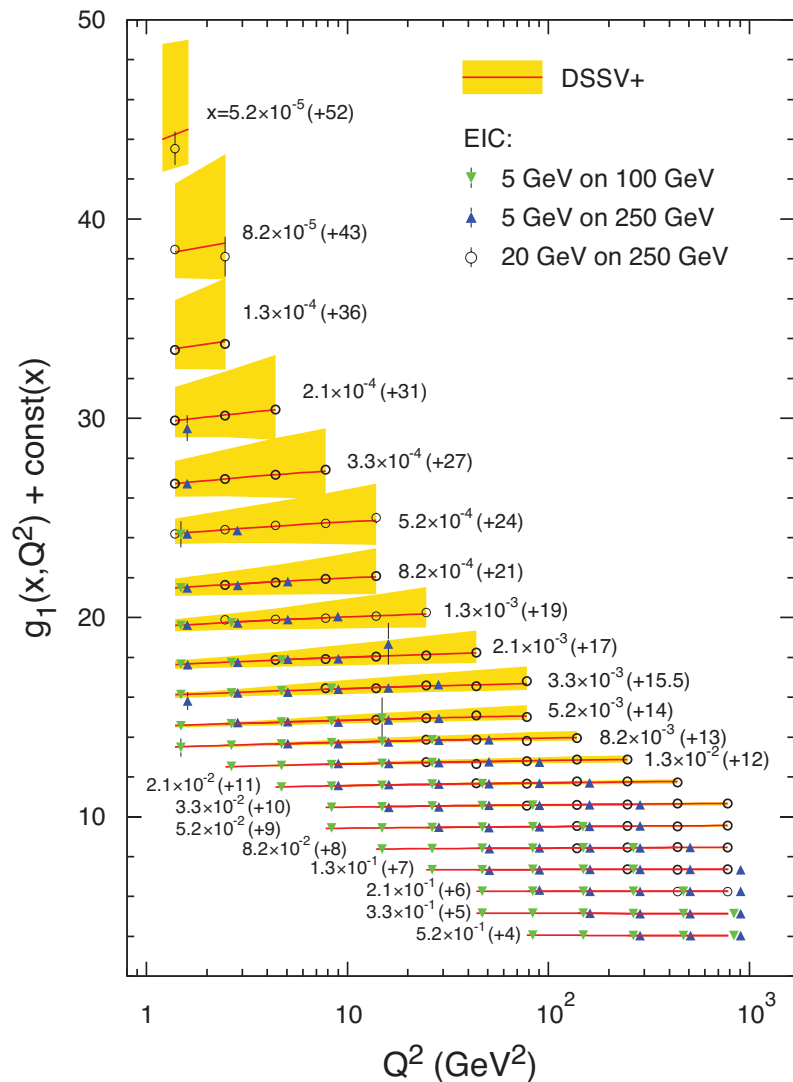
ЭИК



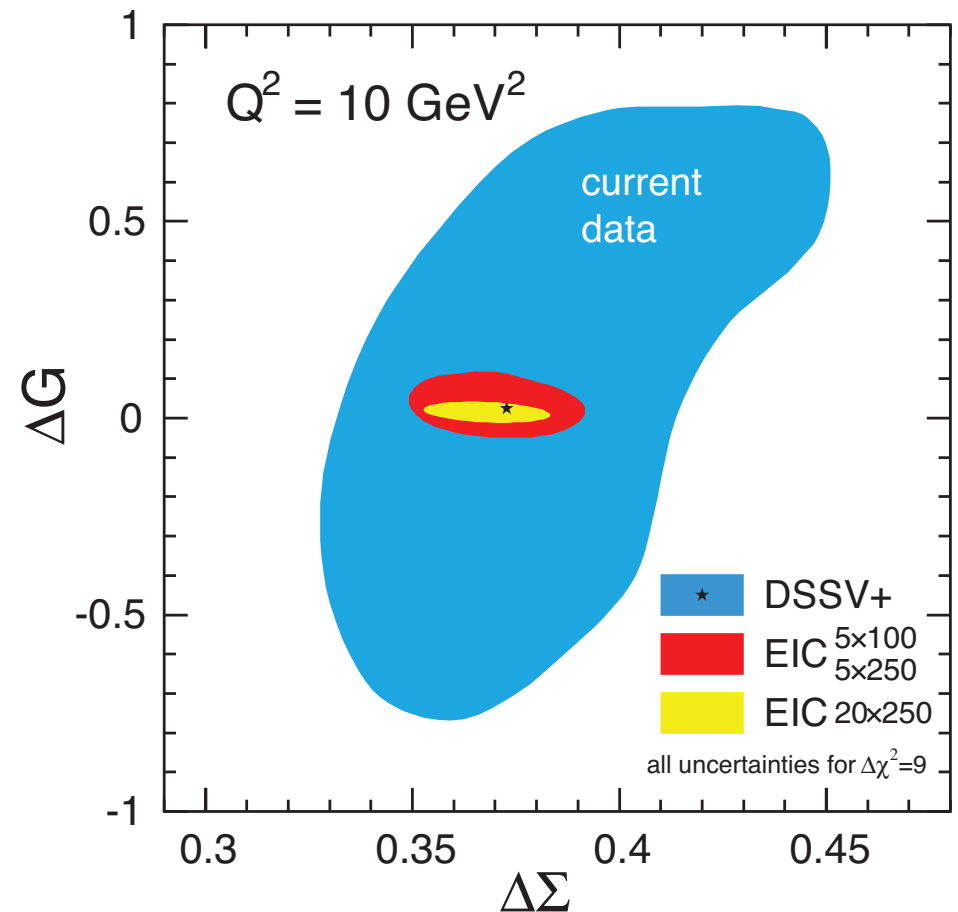
Ключевые эксперименты: поляризация глюонов (3)

- Измерение структурной функции протона $g_1^p(x, Q^2)$ на ЭИК и извлечение $\Delta g(x)$ из нарушения скейлинга:

$$\frac{dg_1^p(x, Q^2)}{d \log Q^2} \propto -\Delta g(x, Q^2)$$



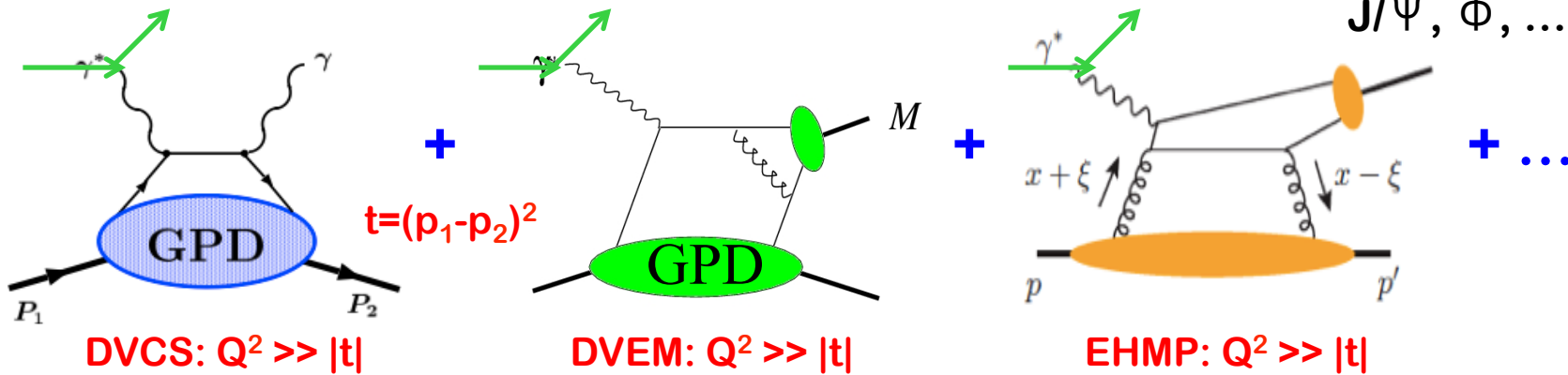
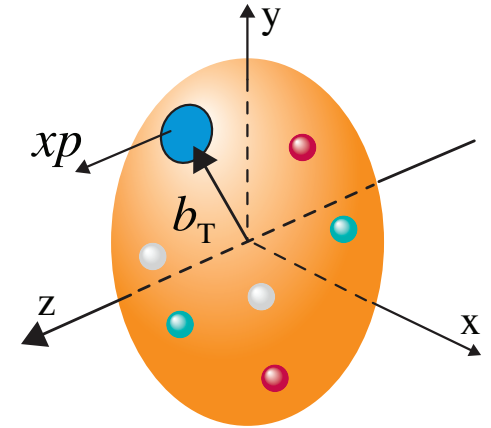
ЭИК
→



Ключевые эксперименты:

пространственные распределения партонов

- Определение 3х-мерных партонных распределений требует наличие 2х масштабов: **жесткого** Q^2 для локализации и **мягкого** (t, k_T) для масштабов \sim фм.
- Пример: жесткие эксклюзивные процессы, не разваливающие мишень, гибрид между упругим и инклюзивным рассеянием



Глубоко виртуальное
комптоновское рассеяние

Глубоко виртуальное рождение векторных мезонов

- Преобразование Фурье t -зависимости дает b_T -зависимость.

Ключевые эксперименты: пространственные распределения (2)

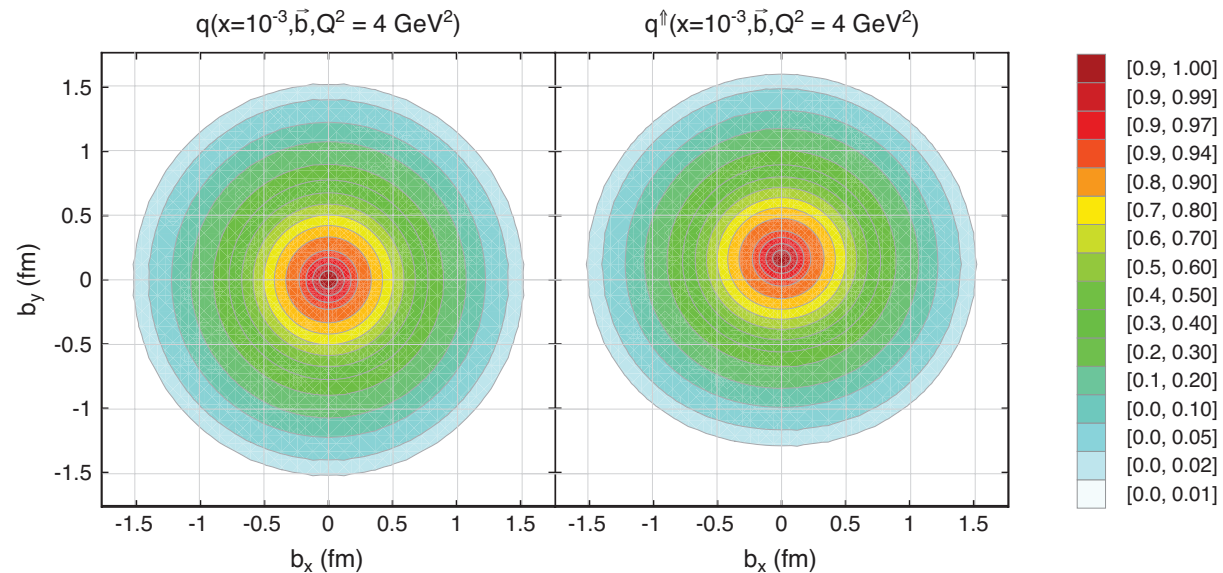
- Сечения выражаются через обобщенные партонные распределения (GPDs), описывающими томографию мишени.
- GPDs важны для понимания “спинового кризиса”:

$$J^q = \frac{1}{2} \int dx x [H^q(x, \xi, t = 0) + E^q(x, \xi, t = 0)] = \frac{1}{2} \Delta q + L_q$$

- GPDs содержат информацию о **касательных силах** на партоны в нуклоне/ядре и возможных **ненуклонных степенях** свободы в ядрах.

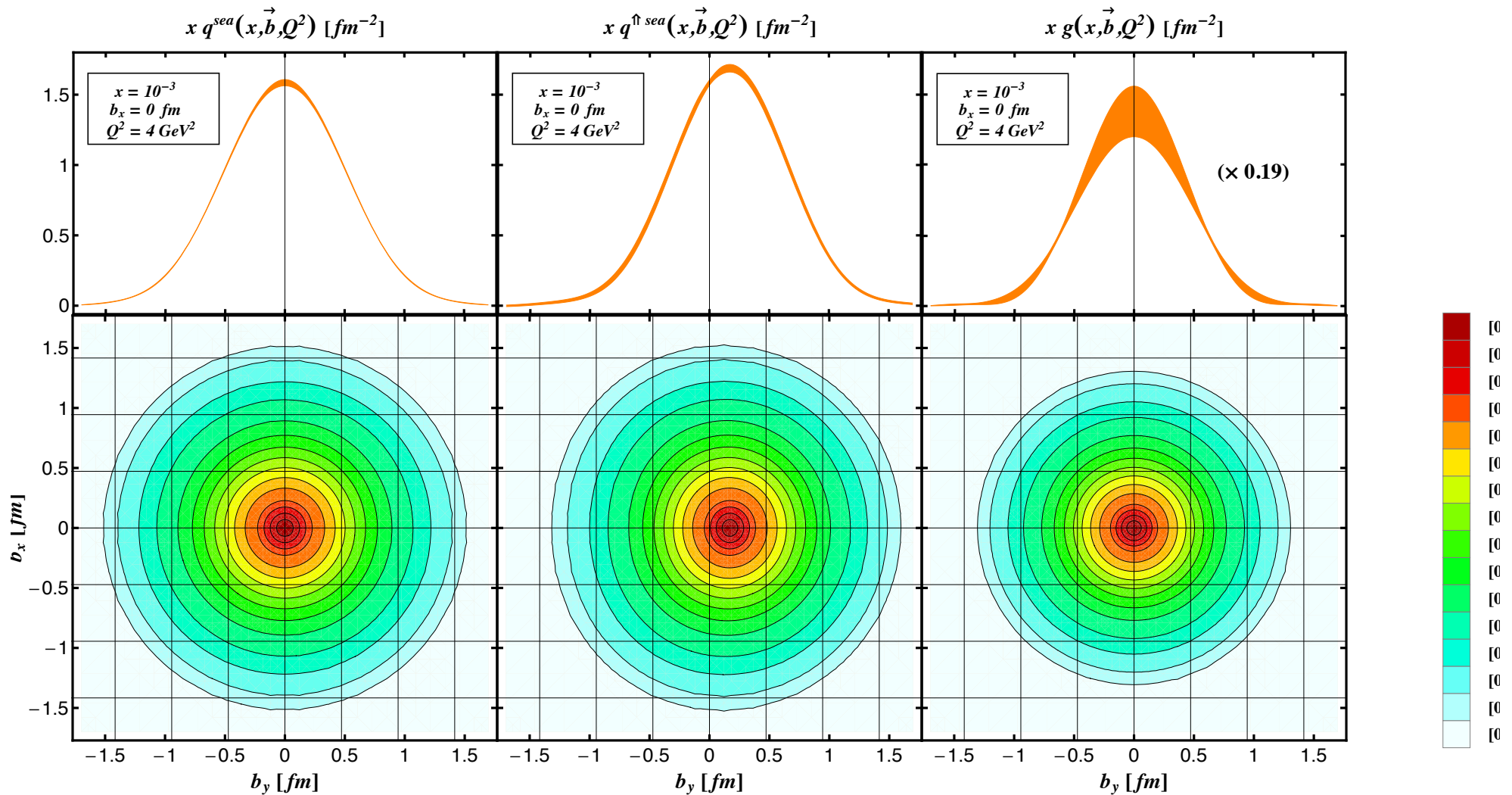
- В случае поперечно-поляризованной мишени деформация b_T -зависимости GPDs зависит от **спин-орбитальных корреляций** (как для Сиверса):

$$f^{\uparrow}(x, \mathbf{b}_T) = f(x, \mathbf{b}_T^2) + \frac{(\mathbf{S}_T \times \mathbf{b}_T)^z}{M} \frac{\partial}{\partial \mathbf{b}_T^2} e(x, \mathbf{b}_T^2)$$



Ключевые эксперименты: пространственные распределения (3)

- Преобразование Фурье параметризации GPDs, описывающей данные HERA по $\gamma^*p \rightarrow \gamma p$ и $\gamma^*p \rightarrow \nu p$ и псевдоданные ЭИК \rightarrow **радиус партонных распределений**



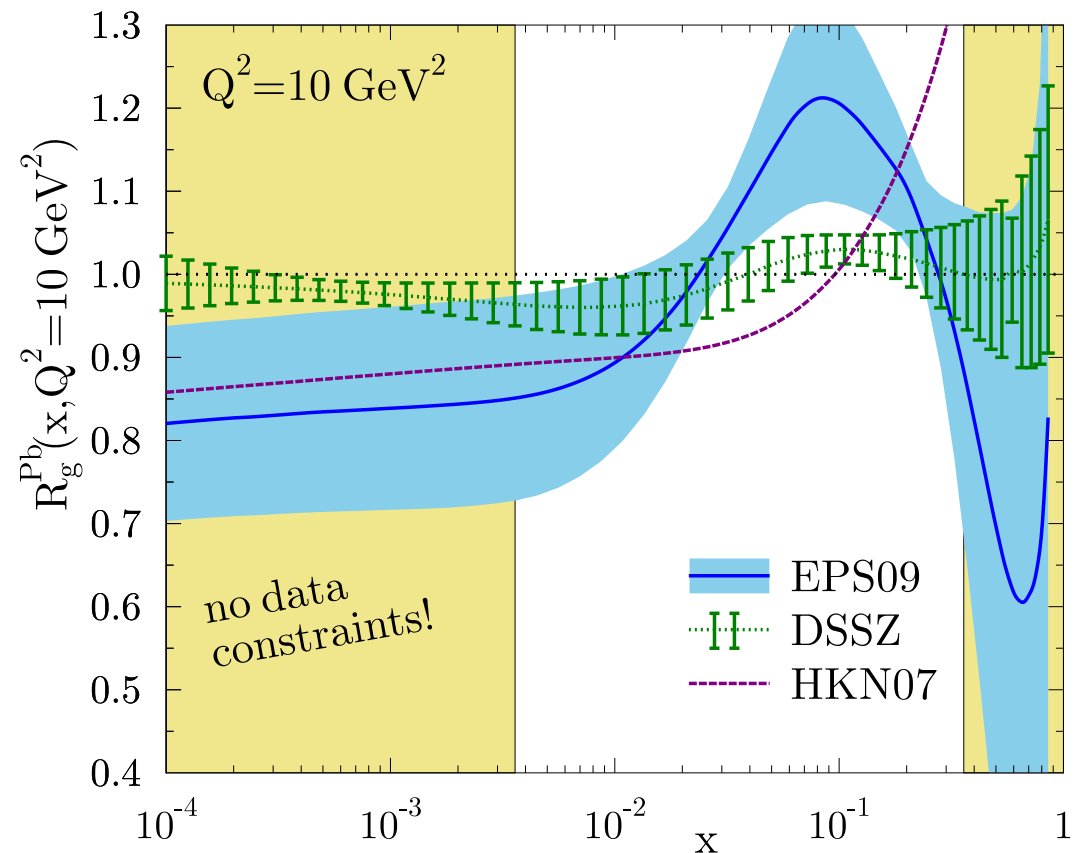
Ключевые эксперименты: ядерные глюонные распределения

• Ядерное глюонное распределение $g_A(x, \mu^2)$ - плотность глюонов в ядре, необходимый элемент феноменологии жестких процессов с ядрами при высоких энергиях (РИК, БАК).

$$R_g(x, Q^2) = \frac{g_A(x, Q^2)}{Ag_p(x, Q^2)}$$

• $g_A(x, \mu^2)$ известно с большой неопределенностью из данных (DIS на фикс. мишенях, dA@РИК, pA@БАК) из-за:

- ограниченной энергии
- непрямому определению их нарушения скейлинга $F_{2A}(x, Q^2)$



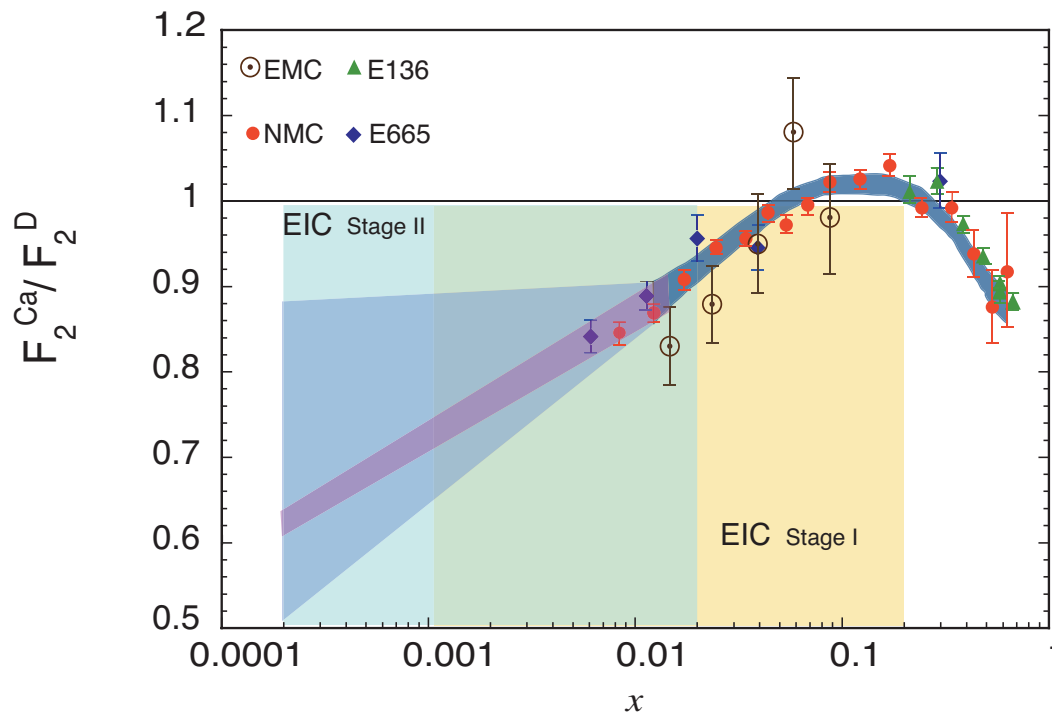
Ключевые эксперименты: ядерные глюонные распределения (2)

- Высокая и варьируемая энергия ЭИК позволит измерить ядерные структурные функции $F_{2A}(x, Q^2)$ и $F_{LA}(x, Q^2)$ в широкой области x , Q^2 - “измерение первого дня”

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \left[\left(1 - y + \frac{y^2}{2}\right) F_2(x, Q^2) - \frac{y^2}{2} F_L(x, Q^2) \right]$$

- Продольная $F_{LA}(x, Q^2)$ напрямую мерит $g_A(x, \mu^2)$.

$$F_L(x, Q^2) = \frac{2\alpha_s(Q^2)}{\pi} \int_x^1 \frac{dy}{y} \left(\frac{x}{y}\right)^2 \sum_q^{n_f} e_q^2 \left[\left(1 - \frac{x}{y}\right) yg(y, Q^2) + \frac{2}{3} (q(x, Q^2) + \bar{q}(x, Q^2)) \right]$$



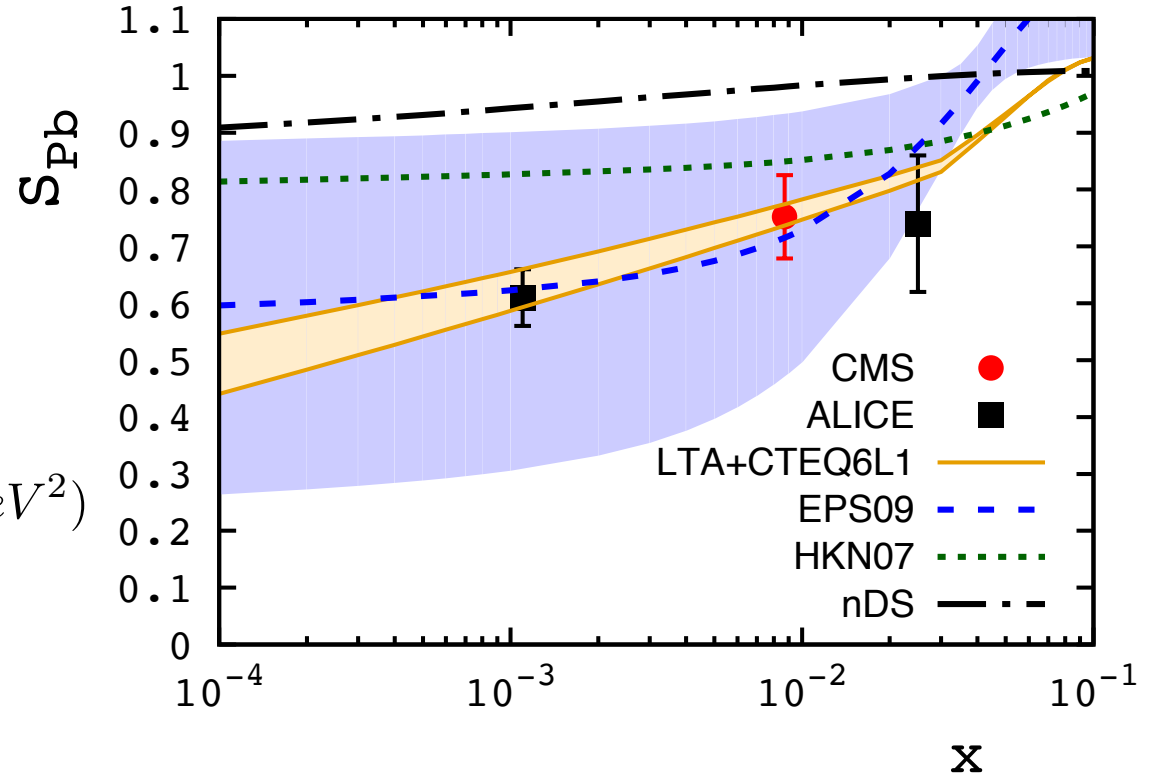
Ядерные глюонные распределения из фоторождения J/ψ на ядрах на БАК

- До начала работы ЭИК, новые ограничения на $g_A(x, \mu^2)$ при малых x можно получить из анализа данных по когерентному фоторождению J/ψ на ядрах в Pb-Pb УПС, [Гузей, Жалов, Крышень, Стрикман, 2012-2017](#)
- Сечение пропорционально глюонной плотности мишени в квадрате. Отношение сечений на ядре и нуклоне, масштабированному фактором ядерной когерентности (как R_{AA}):

$$S(W_{\gamma p}) \equiv \left[\frac{\sigma_{\gamma Pb \rightarrow J/\psi Pb}^{\text{exp}}(W_{\gamma p})}{\sigma_{\gamma Pb \rightarrow J/\psi Pb}^{\text{IA}}(W_{\gamma p})} \right]^{1/2}$$

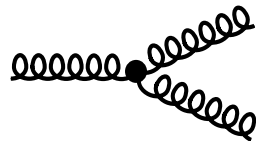


$$S_{Pb}(W_{\gamma p}) = R_g(x = \frac{M_{J/\psi}^2}{W_{\gamma p}^2}, Q^2 = 3 \text{ GeV}^2)$$

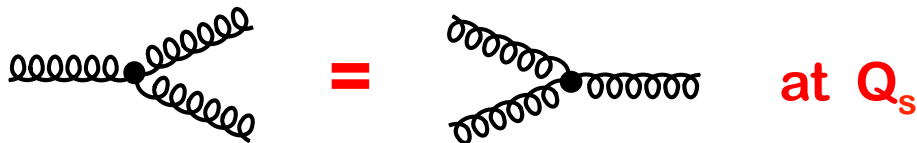


Ключевые эксперименты: насыщение ядерной глюонной плотности

- При увеличении энергии (уменьшении x) глюонная плотность растет за счет излучения (DGLAP, BFKL):

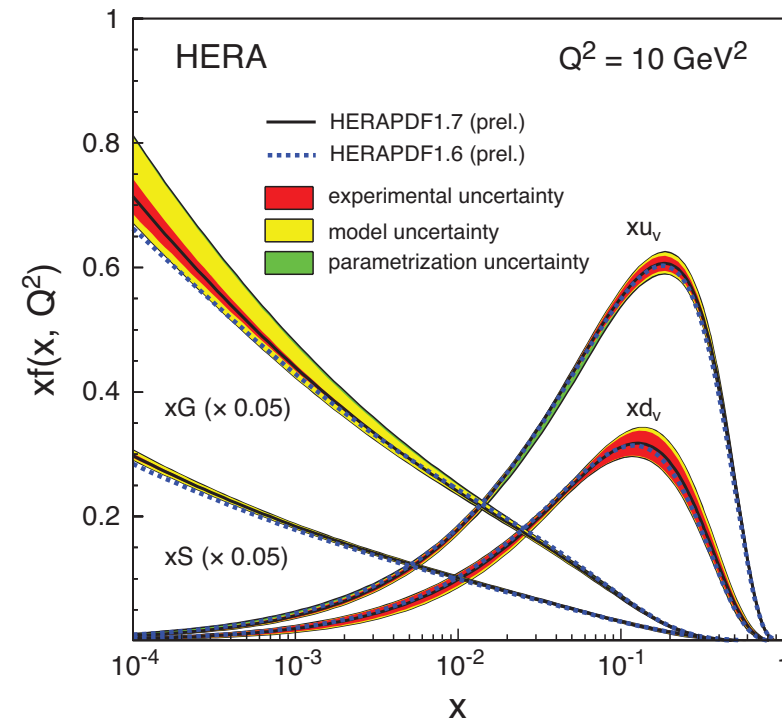


- При дальнейшем увеличении энергии излучение компенсируется рекомбинацией → насыщение



- Возникает динамическая шкала насыщения Q_s из оценки $\rho \times \sigma_{gg \rightarrow g} \sim 1$

$$Q_s^2 \sim \frac{\alpha_s x G_A(x, Q_s^2)}{\pi R_A^2} \sim A^{1/3} \frac{1}{x^{0.3}}$$

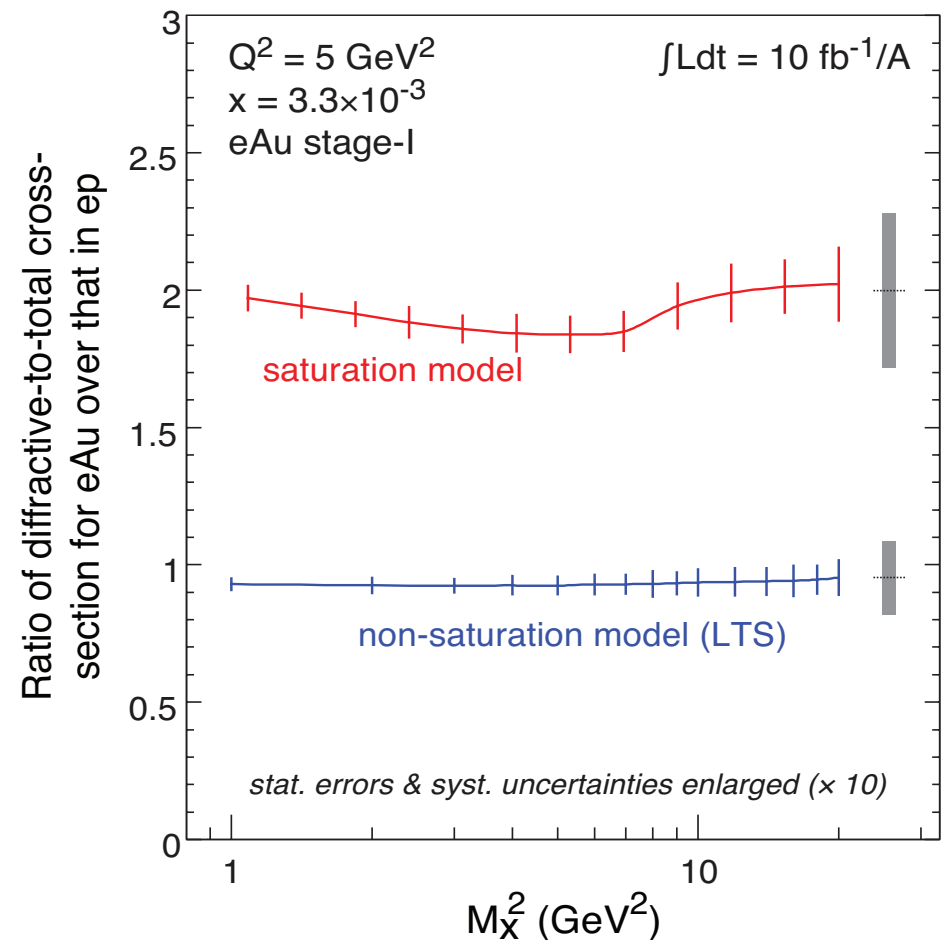
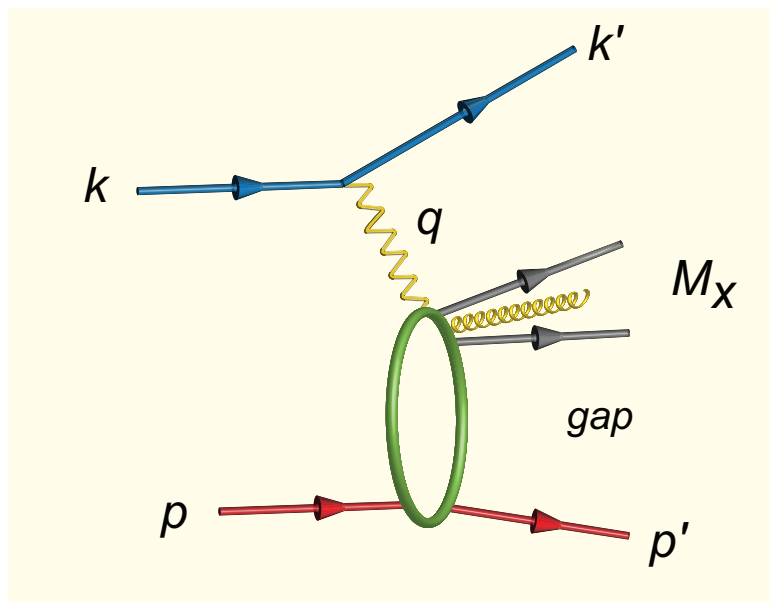


- Ядерное усиление Q_s - ключевое для ЭИК!

Ключевые эксперименты: насыщение ядерной глюонной плотности (2)

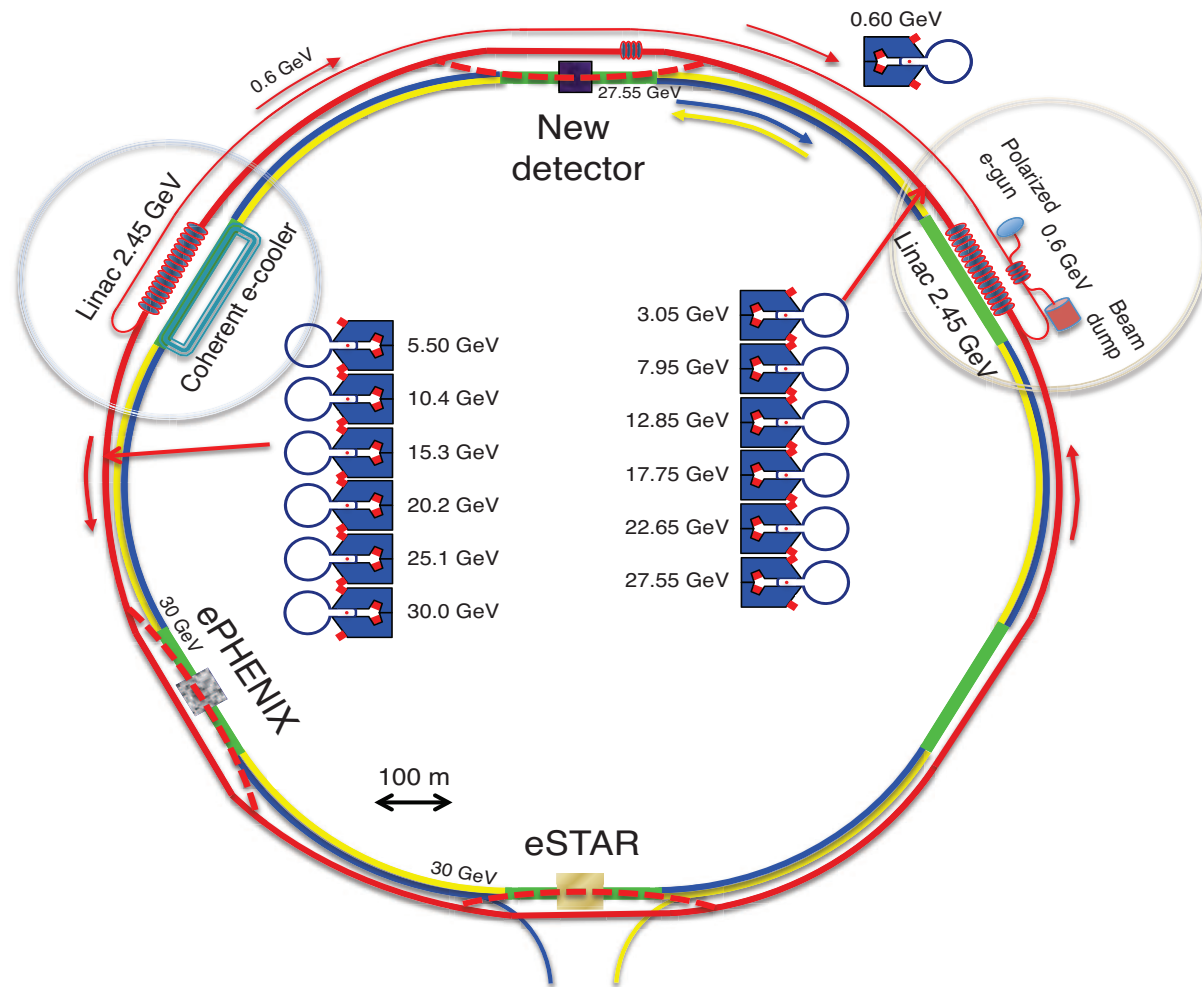
- Режим насыщения теоретически предсказан в рамках эффективной теории конденсата цветового стекла (Color Glass Condensate)
- Экспериментальное обнаружение - под вопросом/неоднозначно
- На ЭИК предлагается исследовать насыщение в инклюзивном, дифракционном и эксклюзивном DIS.

Дифракционное DIS



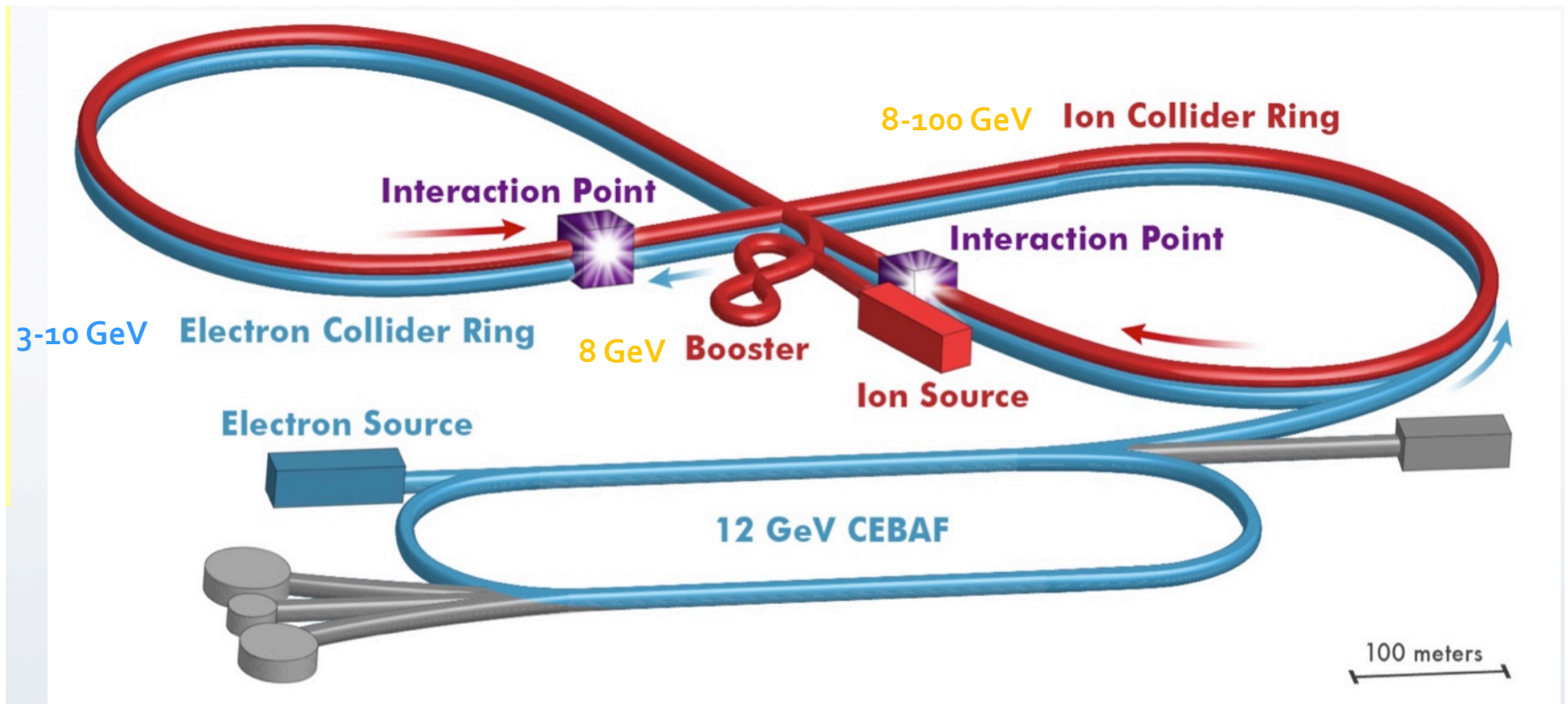
Реализация ЭИК: eRHIC

- На базе РИК: добавить energy-recovering linac (Linar-Ring) или Ring-Ring, разработать coherent electron cooling, конверсия существующих детекторов
- Упор на максимально высокую инвариантную энергию, светимость $\sim 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$



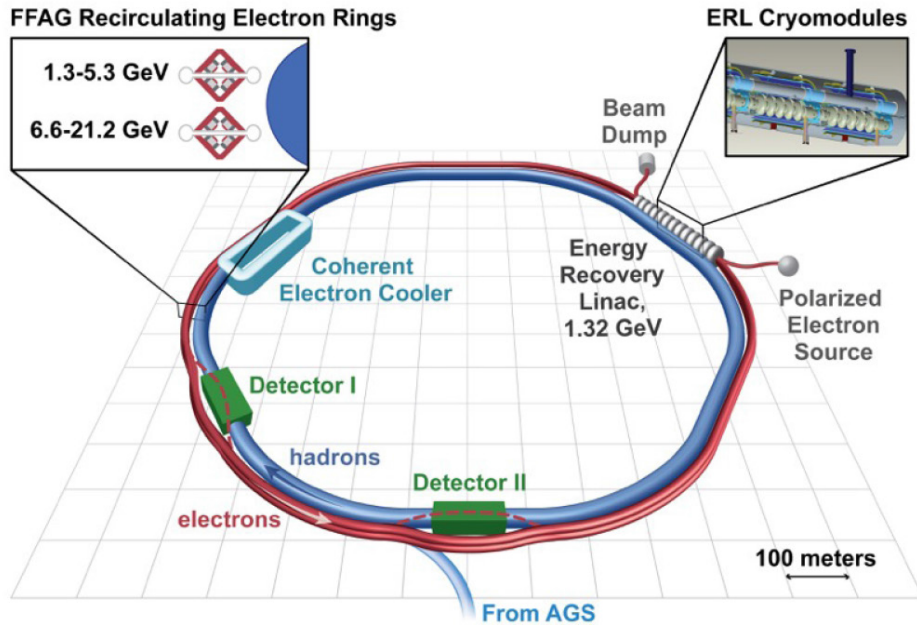
Реализация ЭИК: JLEIC

- На базе JLab: добавить ионный комплекс, детекторы. Дороже, чем eRHIC, но технологии менее рискованные.
- Упор на высокую светимость $> 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, энергия в среднем меньше, чем на eRHIC.



Реализация ЭИК: eRHIC vs. JLEIC

BNL design



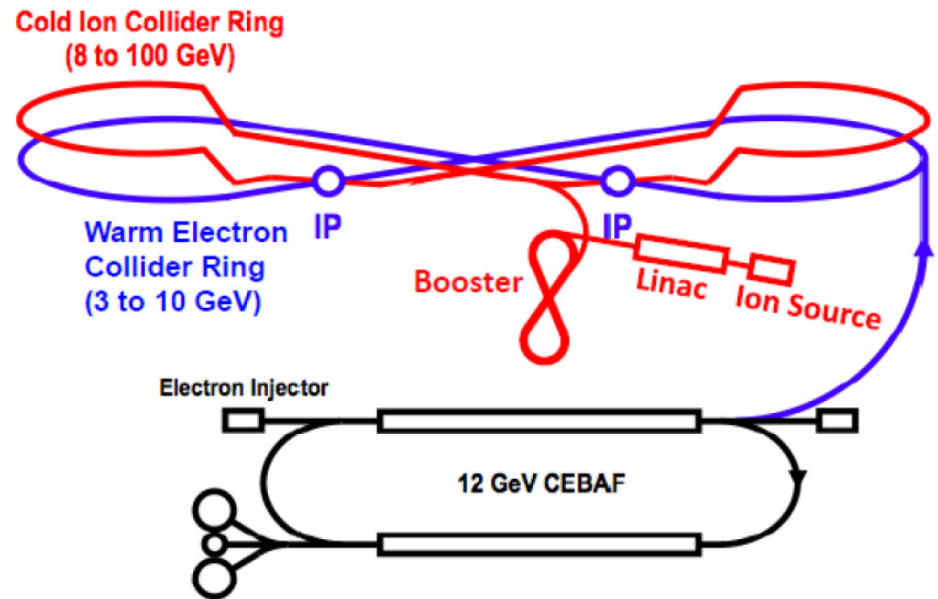
- 5-10 GeV electron ring (upgradable to 20-30 GeV)
- 50-250 GeV proton/ion

$$Q^2 = x \cdot y \cdot s$$

NSAC long range plan (2015)

Упор на максимально высокую энергию.

JLab design



- 3-10 GeV electron ring
- 10-100 GeV proton/ion

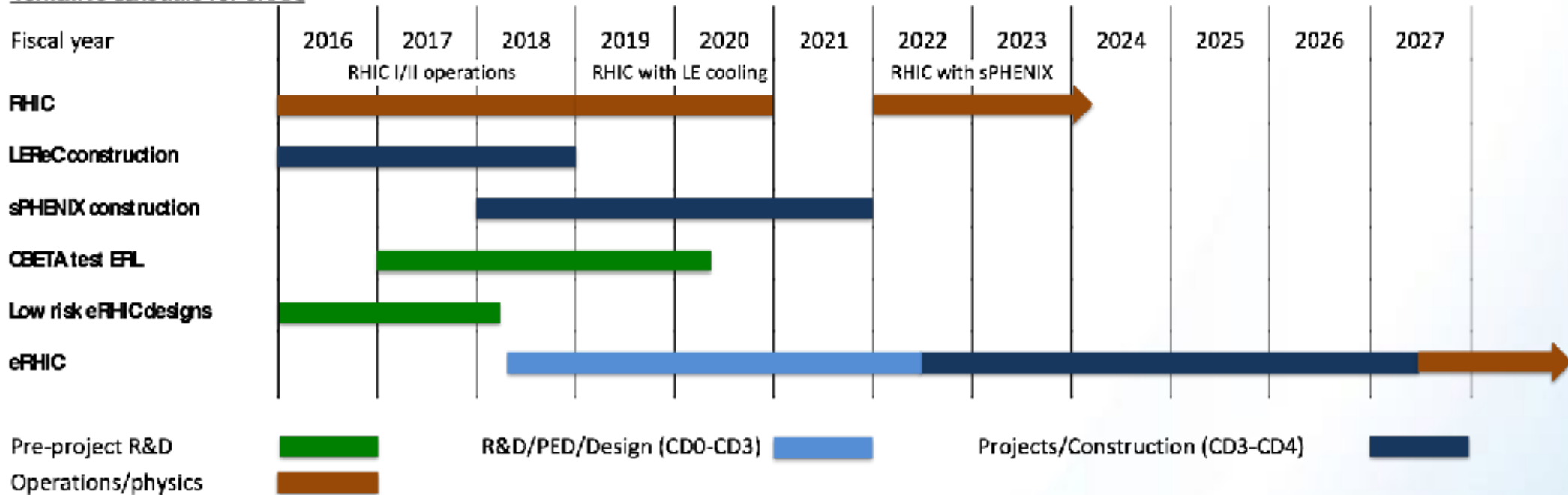
Various CM energies possible.

Example: 10 GeV e on 100 GeV p - CM energy of ~60 GeV

Упор на максимально высокую светимость.

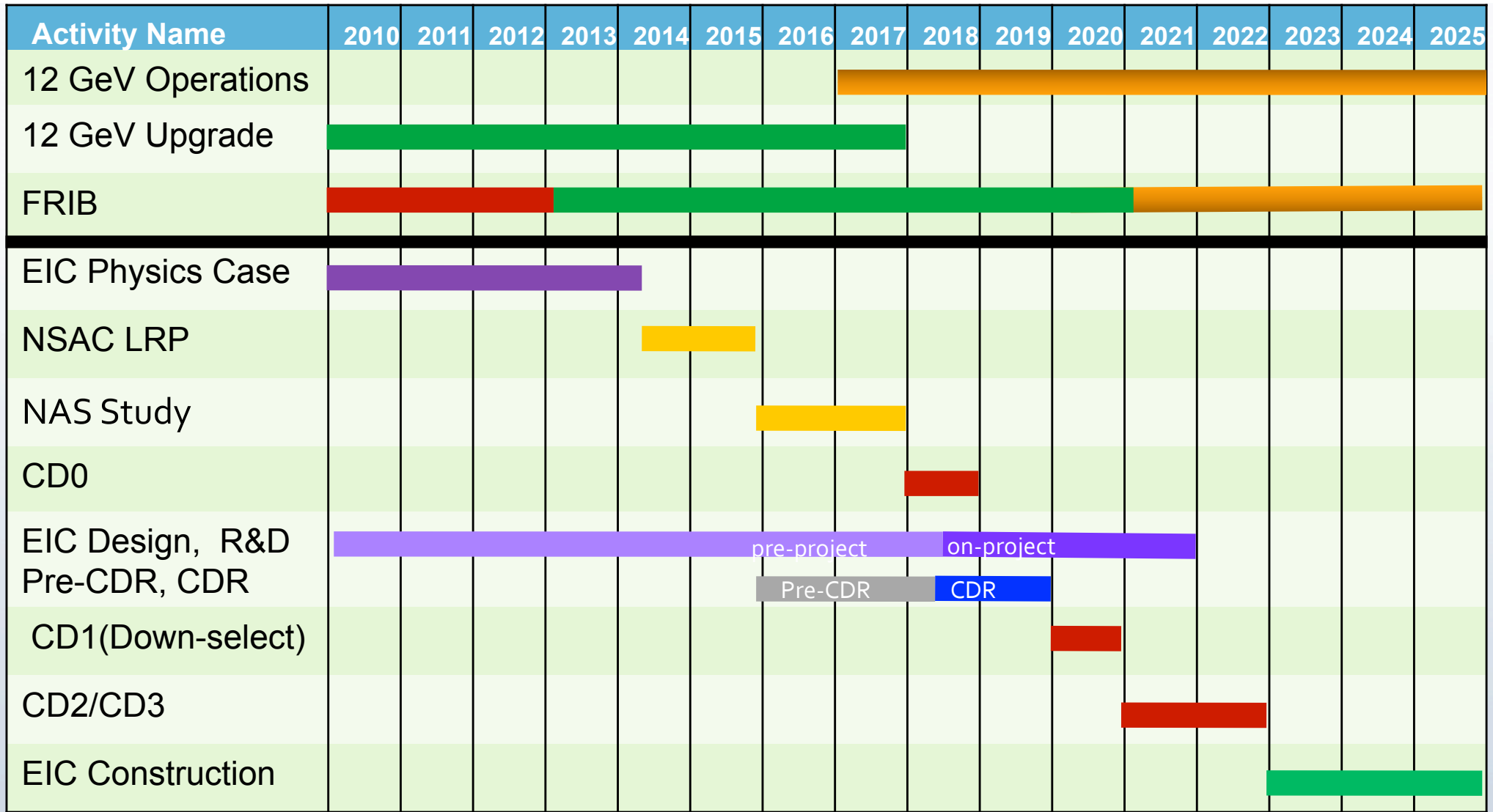
Реализация ЭИК: eRHIC

Tentative schedule for eRHIC



- ◆ Low Energy RHC electron Cooling installation in 2018 for RHC Beam Energy Scan II
- ◆ sPHENIX construction complete in 2021
- ◆ Low risk design (pCDR) complete by 2018
- ◆ High priority eRHIC R&D items complete by 2019
- ◆ eRHIC: Mission need (CD-0 in 2018?), alternative selection (CD-1 in 2019?), project baseline (CD-2 in 2020?), construction start (CD-3 in 2022?), installation (2024 – 2026?) and start of operation (CD-4 in 2027?)

Реализация ЭИК: JLEIC



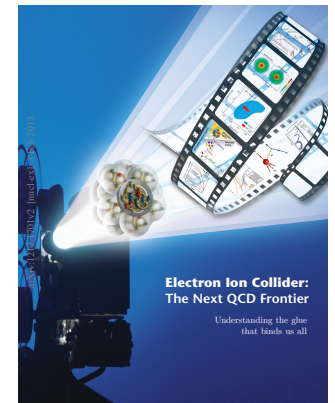
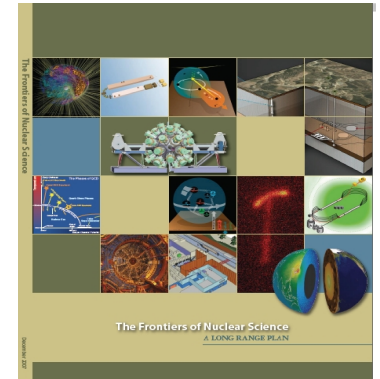
CD₀ = DOE "Mission Need" statement; CD₁ = design choice and site selection
 CD₂/CD₃ = establish project baseline cost and schedule

Электрон-Ионный Коллайдер: статус

- 2007 NSAC Long Range Plan: рекомендация RHIC и JLab разработать концептуальный дизайн ускорителя, детектора на основе физической программы
- 2010: 10-недельная программа в INT, Seattle “Gluons and quark sea at high energies”, [arXiv:1108.1713](https://arxiv.org/abs/1108.1713)
- 2013: EIC White Paper, [arXiv:1212.1701](https://arxiv.org/abs/1212.1701), EPJ A52 (2016) 268
- 2015 NSAC Long Range Plan:

“Мы рекомендуем строительство поляризованного ЭИК при высокой энергии и светимости как новую установку самого высокого приоритета после строительства FRIB.”

- 2017: обзор проекта ЭИК национальной академией наук США.



The 2015
LONG RANGE PLAN
for NUCLEAR SCIENCE

ЭИК: организация

- Рабочая группа в BNL, постоянные позиции в BNL и RIKEN@BNL, <https://wiki.bnl.gov/eic/>
- Рабочая группа в JLab, ЭИК позиции, https://eic.jlab.org/wiki/index.php/Main_Page
- 2016: Международная группа пользователей ЭИК (Electron-Ion Collider User Group): 600 ученых из 100 институтов, <http://www.eicug.org/web/>
- Ежегодная конференция POETIC (Physics Opportunities at an Electron-Ion Collider). Последняя из серии в 2016 г. в Филадельфии. <https://phys.cst.temple.edu/poetic-cteq-2016/>

Заключение

- Поляризованный ЭИК, обладающий большой энергией столкновений и светимостью, рассматривается как ключевая установка для изучения фундаментальных вопросов КХД.
- Основу физической программы ЭИК составляет попытка понять микроскопическую природу видимой материи на языке кварков и глюонов.
- В частности, планируется изучать спиновую и трехмерную структуру протона, влияние ядерной среды на распределения партонов и распространение цветных зарядов (адронизация), а также режим сверхплотной глюонной материи.