

О ПРОБЛЕМЕ ПРОИСХОЖДЕНИЯ МАССЫ НУКЛОНА

В. И. Комаров

ЛЯП ОИЯИ

ABOUT THE PROBLEM OF THE ORIGIN OF THE NUCLEON MASS

V. I. KOMAROV
DLNP

Предмет обсуждения

Очевидная преамбула - значимость проблемы

Статус исследований

Возможный подход

Ближайшие цели

Удалённые цели

Заключение

Происхождение массы нуклона - одна из наиболее значительных проблем современной физики.

Масса элементарной частицы один из её основных атрибутов ,

значимость-→ прямая связь с энергетикой всех взаимодействий частицы.

Поэтому экспериментальное определение массы частицы всегда было первоочередной задачей.

Значимость массы именно нуклона -→ структурная единица большей части реально наблюдаемого мира

Вопрос происхождения массы частиц обострился в середине прошлого века: прогресс в изучении фундаментальных свойств элементарных частиц и понимание роли спонтанного нарушения непрерывных симметрий и свойств калибровочных полей.

Y. Nambu, Phys. Rev. Lett. 4,380 (1960) J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg, Phys. Rev. 127, 965 (1962))
инициировали P.W. Higgs, Phys. Lett. 12,132 (1964); F. Englert @ R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964))

Предложена калибровочная теория спонтанного нарушения электрослабой симметрии, описывающая происхождение масс в электрослабом секторе.

Механизм Энглерта-Браута-Хиггса предсказывал существование массивного нейтрального скалярного бозона положительной чётности, поиски которого начались в 1993 г. и завершились его открытием в 2012г.

Феерическое событие с волной энтузиазма . Леон Ледерман назвал новую частицу «Частицей Бога».

Феноменальная значимость результата.

Вскоре, общее понимание → найденный механизм происхождения массы элементарных частиц не является универсальным, а относится только к участникам электрослабых процессов .

Для процессов сильного взаимодействия служит только исходной точкой, обеспечивая происхождение масс токовых кварков. Потому не может претендовать на механизм происхождения массы нуклонов - основных структурных элементов наблюдаемого мира.

Следовательно, в физике осталась проблема, близкая по своей значимости к проблеме происхождения массы частиц электрослабого взаимодействия - **проблема происхождения массы нуклона.**

Однако, интенсивность исследований происхождения массы нуклонов в настоящее время несоизмеримо мала по сравнению с упомянутой интенсивностью в области электрослабых взаимодействий.

Одна из очевидных причин -> в определённых кругах физиков возникло представление о том, что проблема уже решена.

Действительно, ещё в 60е годы была предложена в общем виде теория возникновения массы сильновзаимодействующих частиц, → модель Намбу-Лазинио ([Y. Nambu, J.Lasinio, Phys. Rev. 122 , 345 \(1961\)](#)). Показано → Взаимодействие четырёх дираковских фермионов в системе из двух безмассовых квазичастиц с противоположной спиральностью приводит к возникновению массивных квазифермионов (нуклонов), взаимодействующих путём обмена безмассовыми калибровочными бозонами псевдоскалярного типа (голдстоуновские “пионы”).

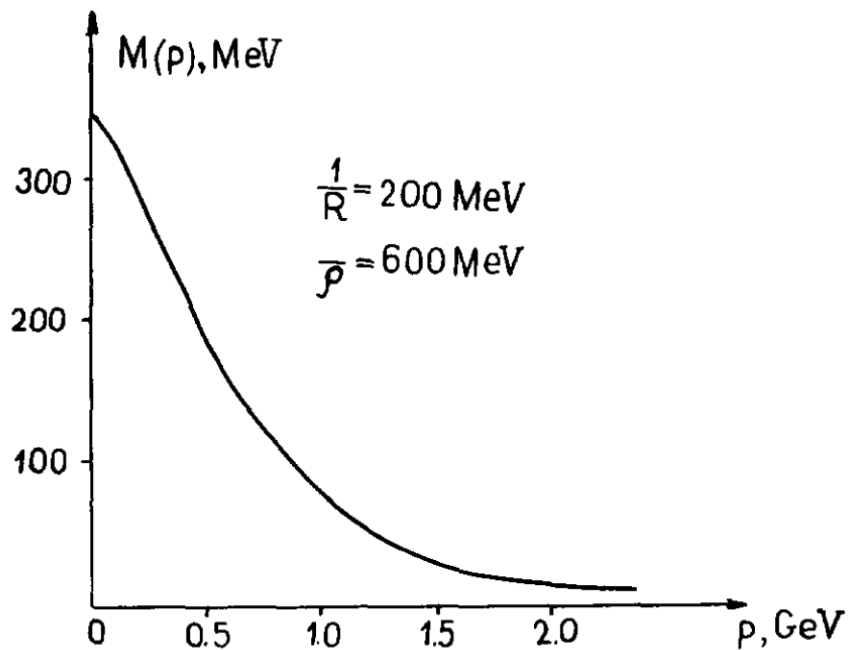
Кардинальным является спонтанное нарушение киральной симметрии.

Сильнейшее влияние модели на развитие теории квантовых полей, в том числе в КХД.

Уже в 80 х годах осознано : Феномен Спонтанного Нарушения Киральной Симметрии (СНКС) – основной фактор динамики сильных взаимодействий при низких энергиях.

Физическая природа СНКС в рамках инстантонной теории вакуума ([D.I. Dyakonov @ V. Yu. Petrov.](#) "A theory of light quarks in the instanton vacuum", Nucl. Phys. B272, 457 (1986)).

Показано, что СНКС приводит в вакууме к возникновению у токового кварка массы, зависящей от величины импульса.



Токовый q + вакуумное поле
 ↓
 Нарушение киральной симметрии
 ↓
 Конституентный q

Таким образом решается ключевой вопрос перехода токового кварка в конституентный с массой покоя около 330 МэВ.

Это уже обеспечивает наличие массы нуклона 938.3 - 939.6 МэВ

Существующие представления о природе КХД вакуума использованы в различных подходах для описания происхождения адронных масс.

Важнейшие результаты \rightarrow в работах российских физиков: группа Новикова-Шифмана-Вайнштейна-Захарова. [V.A. Novikov et al, Nucl.Phys. B191,301 \(1981\)](#)

группа Симонова [H.G.Dosch@Yu. A.Simonov, Phys.Lett.B205,339\(1988\); Yu.A. Simonov, arXiv:2305.00558 \(2023\)](#)

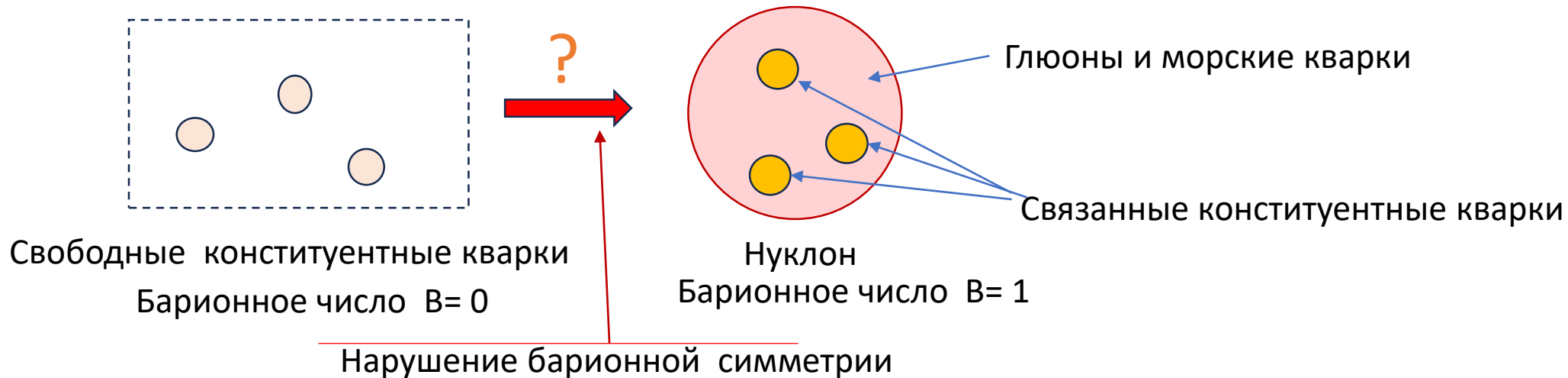
Воспроизведена иерархия шкалы мезонных масс, показана тесная связь конфайнмента и киральной динамики в адронах. В аспекте этих результатов можно утверждать:

Проблема происхождения адронных масс действительно решена на фундаментальном уровне КХД динамики взаимодействия вакуумных полей с полями глюонов и кварков при спонтанном нарушении киральной симметрии.

На этом фундаментальном уровне разработаны многие вопросы и методы. Одним из них является Метод Полевых Корреляторов Ю.А Симонова, позволивший исследовать динамику конфайнмента и её связь с нарушением киральной симметрии. (см. [Ю.А. Симонов.Phys.Rev. D99, 056012 \(2019\)](#); [arXiv: 2305.00558 \(2023\)](#).)

Однако, эти исследования ещё не является решением всей проблемы происхождения массы нуклонов.

Действительно, если даже имеется система свободных конституентных кварков, нужно найти ещё способ сформировать из трёх кварков собственно нуклон. При этом должно произойти нарушение барионной симметрии, а механизм такого нарушения неизвестен.



Остаются нерешёнными и многие другие вопросы детального механизма возникновения нуклона:

Динамика изменения массы конституентного кварка с изменением энергии

Состояние системы конституентных кварков, обеспечивающее переход в нуклонное состояние

Природа барионного числа и его сохранения в реакциях

Характеристика взаимодействия конституентных кварков

.....

Последовательное и полное описание механизма процесса отсутствует.

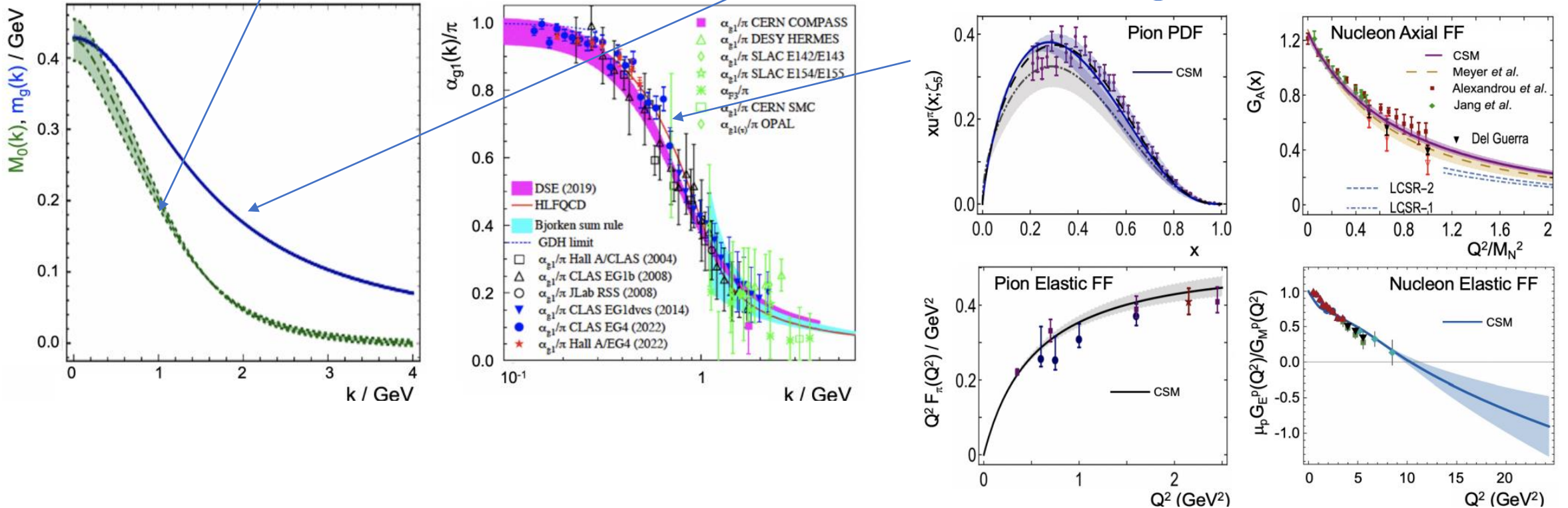
Поэтому исследование происхождения массы нуклона остаётся актуальной задачей современной физики в теоретическом и экспериментальном аспекте.

Исследования в настоящее время продолжаются.

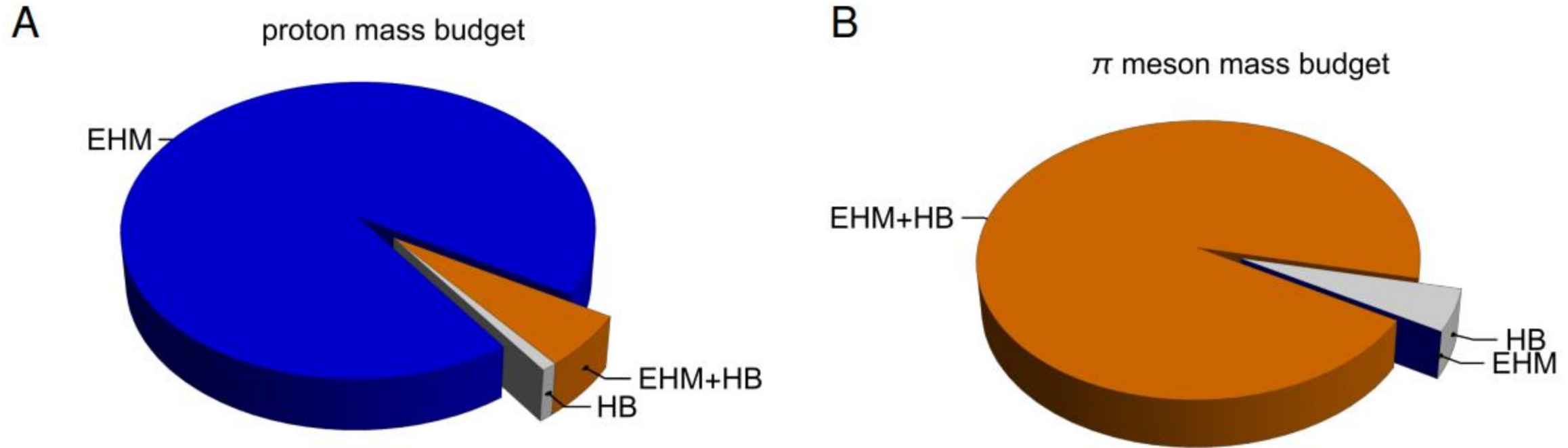
Одним из активно развиваемых подходов является теория, Возникающей Адронной Массы (Emergent Hadron Mass (EHM)). ([C.D. Roberts. arXiv: 2211.09905 \(2022\)](#)). Исходным пунктом EHM являются работы Швингера, в которых показано, что калибровочные бозоны могут динамически приобретать массу, не теряя при этом ни одного из существенных свойств калибровочных теорий. ([J.S. Schwinger. Phys. Rev. 128. 2425 \(1962\)](#)). Подход Швингера используется EHM теорией в рамках КХД, существенно учитывая рост и насыщение константы взаимодействия с уменьшением импульса. Киральная симметрия нарушается не спонтанно, а динамически.

Три основных положения EHM :

1. Масса одетого кварка, 2. Ненулевая переменная масса глюона, 3. Импульсно зависимый эффективный заряд. (

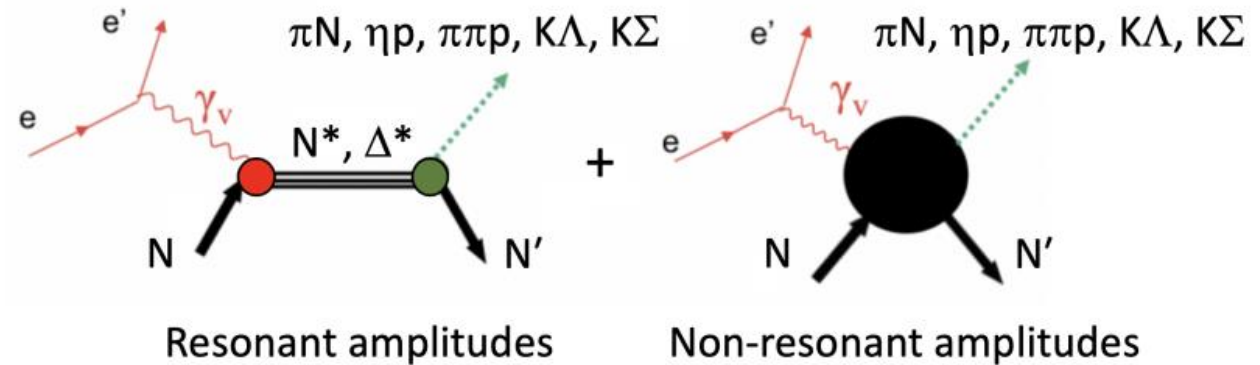


Сравнение предсказания EHM с характеристиками основного состояния адрона



Mass budgets: **A** – proton; **B** – pion. Each is drawn using a Poincaré invariant decomposition, HB – contribution owing solely to the Higgs boson; EHM – contribution from emergent hadron mass; EHM+HB – mass generated by constructive interference between these two sources of mass.

Аналогично, уравнения Швингера в ЕНМ позволяют получить амплитуды возбуждённых состояний нуклона для сравнения их с экспериментальными

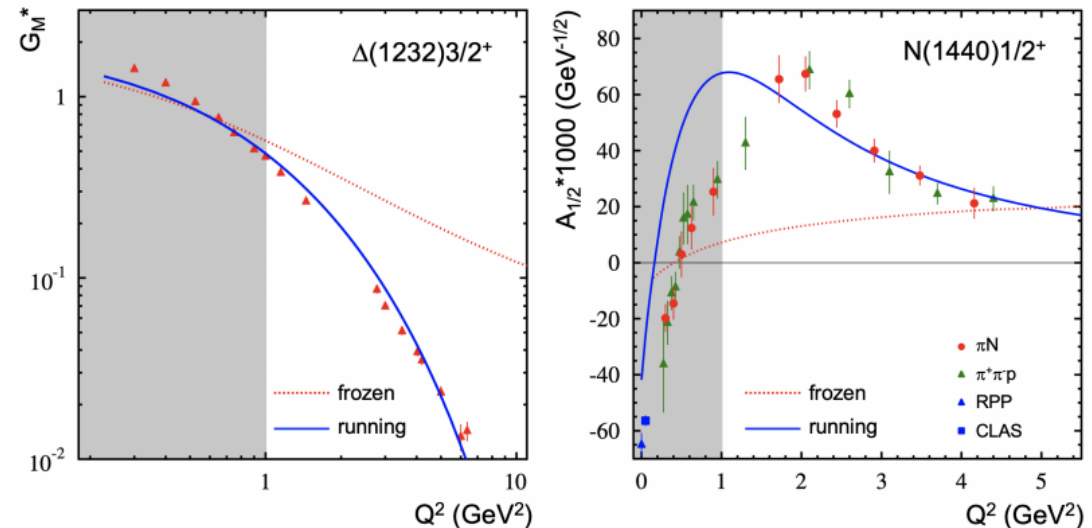


Для такого сравнения на ускорителе Jlab при 6 ГэВ проводятся измерения с поляризованной мишенью и поляризованными γ – квантами с целью определения амплитуд электровозбуждения резонансов Δ (1232) и N(1440).

Пример недавно полученного сравнения показан на рисунке:

(D.S. Carman et al . JLAB-PHY-23-3744 (2023))

Пример недавно полученного сравнения показан на рисунке:



В Jlab (CLAS) планируется обширная программа исследований: $6 \text{ GeV} \rightarrow 12 \text{ GeV} \rightarrow 20 \text{ GeV}$, следуя ЕНМ теории. Это показывает перспективность экспериментального изучения проблемы происхождения массы нуклона.

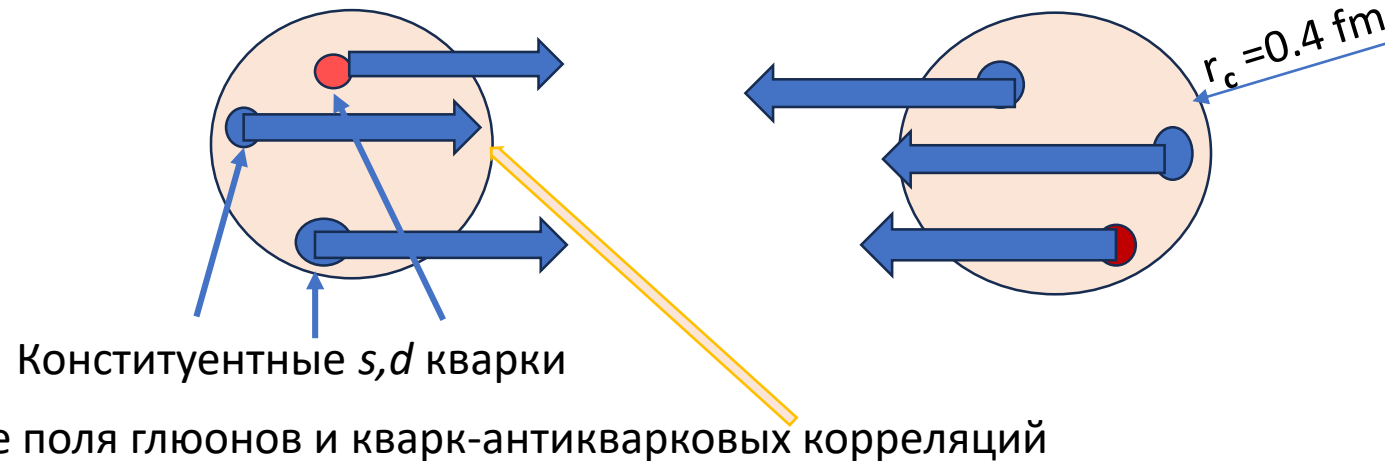
Принципиально слабой стороной исследований с γ -квантами и лептонами является то, что с ростом энергии теряется возможность получения критически важной информации о $(q_{\text{const}} q_{\text{const}})$ взаимодействии: высокое возбуждение начального нуклона требует высокой передачи импульса, исключающей когерентность возбуждения, и процесс идёт преимущественно взаимодействием γ -кванта/ лептона с одиноким кварком.

Для получения информации о парном взаимодействии конститuentных кварков следует создать систему, содержащую достаточно много конститuentных кварков в ограниченной области вакуума.

Это может быть достигнуто в

неупругом центральном соударении двух нуклонов при невысоких энергиях.

Наглядный сценарий центрального NN соударения при $\sqrt{s_{NN}} \approx 5 - 20$ ГэВ



При соударении кварки взаимно тормозятся, и энергия соударения сохраняется в области соударения с объёмом (пренебрегая Лоренцевским сокращением) $V = \frac{4}{3} \pi r_c^3 = 0.27 \text{ fm}^3$ и плотностью энергии $d = \sqrt{s_{NN}} / V$.

$d = 19 \text{ GeV/fm}^3$ при $\sqrt{s_{NN}} = 5$ ГэВ и 74 GeV/fm^3 при $\sqrt{s_{NN}} = 20$ ГэВ.

Эта плотность значительно выше чем в основном состоянии нуклона, $d_N = 0.41 \text{ GeV/fm}^3$

и выше плотности энергии в QGP, оцененной для Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$, $d_{\text{QGP}} = 15 - 20 \text{ GeV/fm}^3$.

Однако высокая энергетическая плотность не является обязательным условием возникновения QGP.

Упомянутые плотности относятся к совершенно разным условиям их создания:

В случае центрального соударения нуклонов плотность относится к начальному времени при перекрытии сердечников.

А в Au+Au - ко времени установившейся термализации и наличии сильных потоков материи, увеличивающих занимаемый ею объём. (см. [Collab. BRAHMS, Nucl.Phys. A 757,1 \(2005\).](#))

Но главная разница состоит в величине относительного импульса Q , с которым сталкиваются начальные конstituентные кварки при соударении:

$$\begin{array}{ll} \text{Au + Au и } \sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ} & q_{\text{КВКВ}} = 6.6 \text{ ГэВ/с} > Q_{\chi} \\ \text{N + N и } \sqrt{s_{NN}} = 20 \text{ ГэВ} & q_{\text{КВКВ}} = 2.2 \text{ ГэВ/с} \quad \text{При } \sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ ГэВ} & q_{\text{КВКВ}} = 0.85 \text{ ГэВ/с} < Q_{\chi} \end{array}$$

Q_{χ} - Импульс восстановления киральной симметрии: $Q_{\chi} \approx 1 \text{ ГэВ/с}$

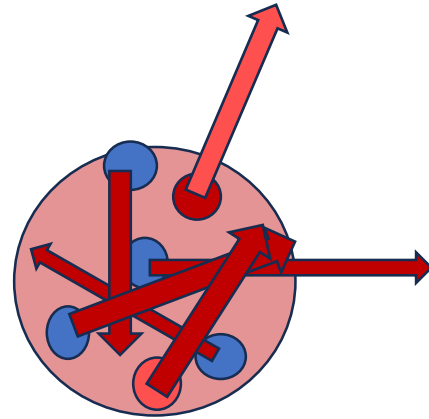
Поэтому в первом случае конституентные кварки заведомо разрушаются и переходят в токовые, а во втором конституентные кварки только входят в область восстановления киральной симметрии и не разрушаются.

Сохраняется локальный конфайнмент конституентного кварка.

С другой стороны, в NN соударениях при $\sqrt{s_{NN}} > 5 \text{ GeV}$ $Q > Q_{\text{QCD}}$ происходит дедронизация с разрушением конфайнмента отдельных нуклонов и возникновением общего конфайнмента bq системы.

Поэтому система, образующаяся при слиянии кварковых сердцевин нуклонов при ГэВных энергиях должна состоять из конституентных кварков, связанных общим конфайнментом.

Таким образом возникает новое состояние, которое следует назвать **конституент-кварковым состоянием**

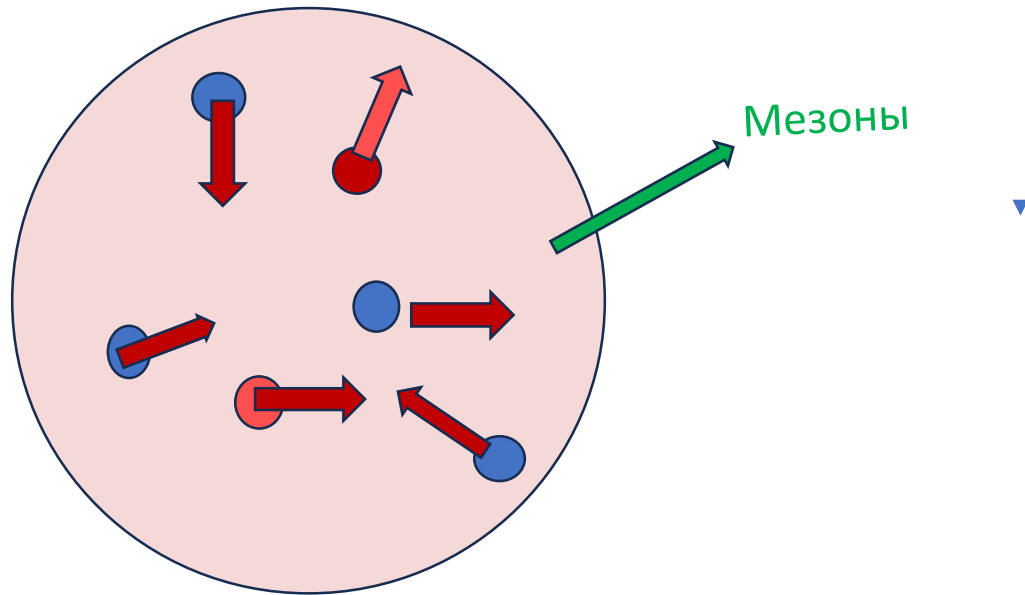


Возникновение системы в возбуждённом конститuent-кварковом состоянии

V.I. Komarov. On the possibility of revealing the transition of a baryon pair state to a six-quark confinement state. Phys. of Part. and Nucl. Letters. V.15, 69 (2018).

Стохастизация кварков с потерей их начального продольного импульса взаимной компенсацией и переходом соответствующей энергии в разогревание кварковой системы и вакуумного поля глюонов и кварк-антикварковых корреляций

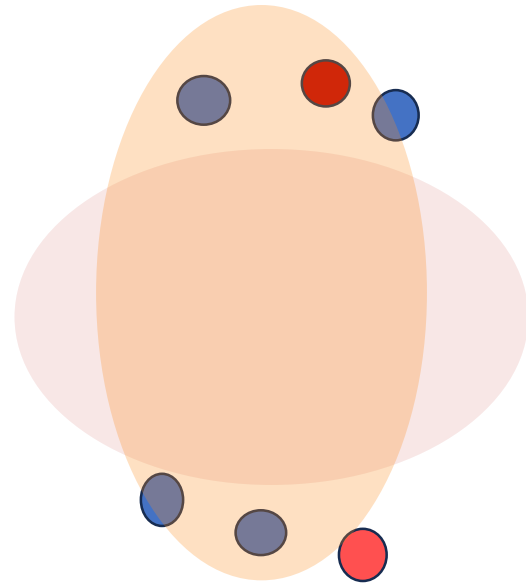
Кварковая система при центральном соударении имеет в СЦМ суммарный нулевой продольный импульс, и в ней отсутствуют трёх-кварковые группы с большим продольным импульсом (центральное соударение).



Охлаждение возбуждённой конститuent-кварковой системы расширением и испусканием мезонов

Кварковая система сохраняет суммарный нулевой продольный импульс

Система находится в **конститuent-кварковом состоянии, обеспечивающем интенсивное кварк-кварковое взаимодействие**



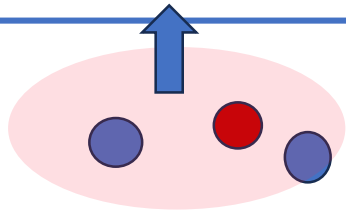
Разделение кварковых и полевых глюон-кварк-антикварковых компонент.

Образующиеся квазинуклонные компоненты сохраняют нулевой продольный импульс.

Система переходит из **конституент-кваркового состояния в адронное состояние** при двух кинематических возможностях образования пары нуклонов:

Возможный подход

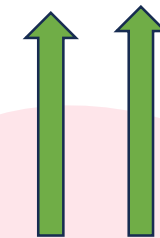
Нуклон $N(90^\circ)$



Мезоны

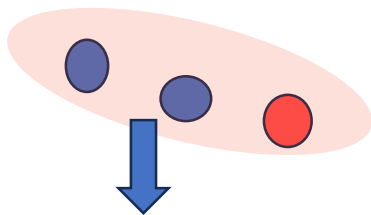


ИЛИ

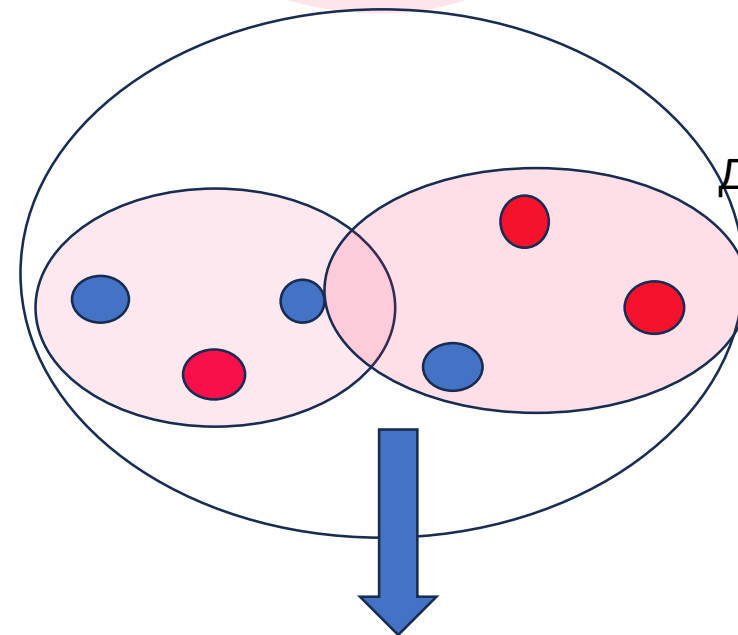


Мезоны

Нуклон $N(90^\circ)$



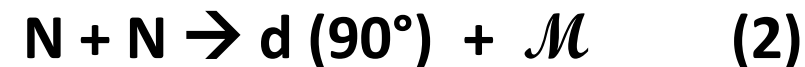
Дейтрон $d(90^\circ)$



Разделение нуклонов и мезонов

Кварковые подсистемы сохраняют нулевой продольный импульс .

Поэтому образующиеся нуклоны или дейтрон испускаются под углами, близкими к 90° .



Один из конкретных вариантов реакции (2) $N + N \rightarrow d(90^\circ) + \mathcal{M}$:

$$p + p \rightarrow d(90^\circ) + \pi,$$

$$d(90^\circ) + 2\pi,$$

$$d(90^\circ) + 3\pi$$

$$d(90^\circ) + n_{max}\pi.$$

$$d(90^\circ) + \rho,$$

$$d(90^\circ) + K^+ + K^-,$$

$$d(90^\circ) + \gamma$$

$$d(90^\circ) + e+e-$$

$$\Theta_d > \arccos(0.25/\sqrt{2} p_d)$$

□

Реакция представляет для экспериментов широкий набор наблюдаемых величин:

Импульсное распределение дейтрона,
 Импульсные распределения мезонов, γ , $e+e-$
 Корреляции дейтрон + мезон
 Корреляции в парах мезонов
 Множественность частиц в отдельных каналах
 Парциальные дифференциальные сечения каналов
 Суммарное дифференциальное сечение
 Поляризационные наблюдаемые

Наблюдаемые, в конечном счёте, зависят от характеристик промежуточного конститuent-кваркового состояния, и ближайшая задача - разработка феноменологических моделей для описания процесса.

В частности, для описания стадии перехода трёх-кварковых состояний в нуклонные состояния, что имеет принципиальное значение для понимания процесса формирования массы нуклона.

Оценки показывают: полная интенсивность реакций (1), (2) достаточно высока для современной экспериментальной техники. В частности, светимости, ожидаемые на планируемой установке SPD (NICA), могут обеспечить экспериментальное изучение предлагаемых реакций.

Неупругие центральные соударения нуклонов при энергиях до десятков ГэВ в настоящее время - Терра Инкогнита: мировое содержание данных о таких соударениях близко к нулю, и их исследование открывает новую область ядерной физики.

Чтобы стать пионерами этой области, следует использовать уникальную возможность начала измерений на уже действующей в настоящее время установке БМН (BM@N), вполне адекватной такой задаче.

Первые эксперименты будут иметь характер обзорных для получения данных, нужных для разработки феноменологических моделей, включающих динамику взаимодействия конститuentных кварков.

В настоящее время космологические исследования изучают два состояния Природы: современного состояния с основным содержанием материи в нуклонной фазе и состояния в прошедший период времени, близкий к моменту Большого Взрыва, когда сильнодействующая материя находилась в кварк-глюонной фазе. Эта фаза в настоящее время моделируется в экспериментах соударением тяжёлых ионов при энергиях в сотни ГэВ и ТэВ ы.

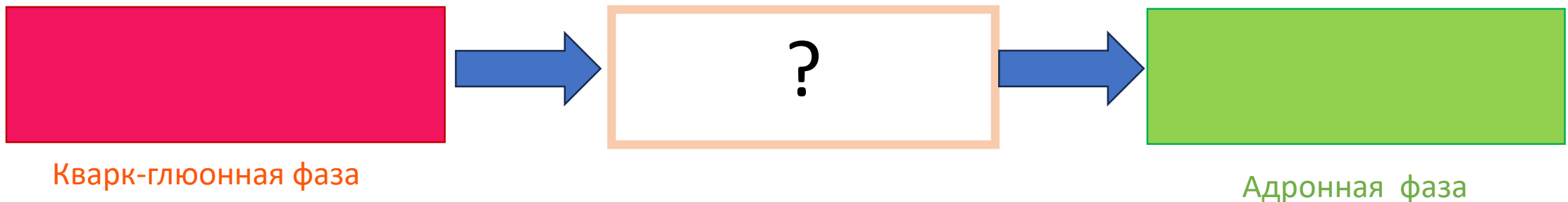


В настоящее время космологические исследования изучают два состояния Природы: современного состояния с основным содержанием материи в нуклонной фазе и состояния в прошедший период времени, близкий к моменту Большого Взрыва, когда сильнодействующая материя находилась в кварк-глюонной фазе. Эта фаза в настоящее время моделируется в экспериментах соударением тяжёлых ионов при энергиях в сотни ГэВ и ТэВ ы.



Между тем, эти два крайних состояния с необходимостью разделены переходной стадией, в которой кварк-глюонная материя переходит в адронную стадию нуклонов.

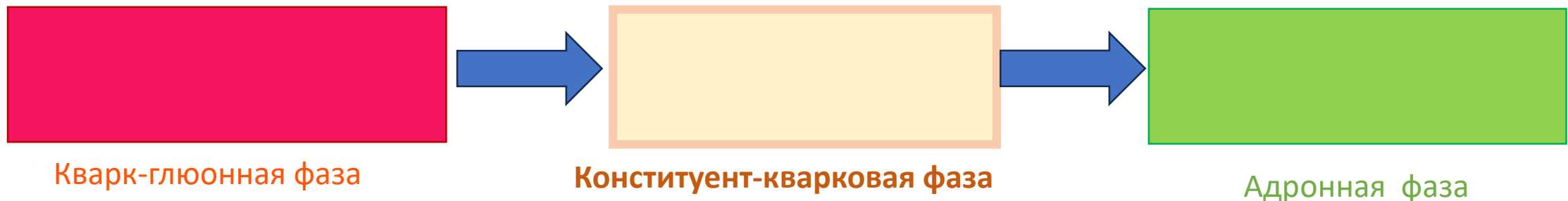
Возникает неизбежный, но де-факто избегаемый, вопрос - как выглядела эта промежуточная фаза ?



Очевидный сценарий предполагает охлаждение кварк-глюонной материи до состояния кварков с импульсами порядка импульса Q_χ нарушения киральной симметрии. Взаимодействие токовых кварков с вакуумом усиливается ростом КХД константы до такой степени, что приводит к конденсации флуктуаций в виде массивной оболочки токового кварка глюон-кварк-антикварковым конденсатом, то есть, к образованию конститuentных кварков, взаимодействующих обменом калибровочными бозонами.



Пространство заполняется конститuentными кварками, и эту фазу следует назвать конститuent-кварковой фазой.



Столкновение кварков приводит к возникновению дикварков. Последующие соударения кварка с дикварком приводят при нарушении барионной симметрии к образованию нуклонов.

В этом сценарии та же последовательность взаимодействий, что и в неупругом центральном соударении нуклонов - конституент-кварковая фаза, переходящую при охлаждении в нуклонную фазу.

Это означает, что изучая неупругие центральные соударения нуклонов при ГэВных энергиях, мы можем моделировать Космологическую стадию генерации нуклонных масс.

При анализе необходимо иметь связь между промежуточным конституент-кварковым состоянием и конечным наблюдаемым адронным состоянием в виде той или иной феноменологической модели.

Это вполне аналогично ситуации с действующим сейчас моделированием кварк-глюонной фазы соударением тяжёлых ионов при высоких энергиях. Такое моделирование успешно осуществляется с помощью созданных для этого моделей, описывающих как стадию формирования кварк-глюонной фазы так и её переход в адронную фазу с определённым конечным состоянием

Необходимые теор. модели в случае неупругих центральных NN соударений могут быть созданы лишь на основе предлагаемых сейчас экспериментов первой стадии. Поэтому моделирование космологической стадии создания нуклонов может служить именно как отдалённая цель.

1. Проблема возникновения нуклонной массы - **одна из важнейших проблем современной физики.**
2. **Концептуальное решение проблемы найдено** ещё примерно в середине XX века :
непертурбативное КХД взаимодействие токовых кварков с вакуумными флуктуациями ведёт при нарушении киральной симметрии к одеванию токового кварка массивным глюон-кварк-антикварковым конденсатом, то есть к **переходу лёгкого токового кварка в массивный конституентный кварк.**
3. В отличие от нарушения электрослабой симметрии механизмом Энглера- Браута-Хиггса, для нарушения киральной симметрии в КХД **аналогичный механизм ещё не создан**, и проблема возникновения нуклонной массы требует решения, более детального чем только концептуальное решение. Так, остаётся неизвестной природа образования нуклона из трёх конституентных кварков.
4. Детальное решение проблемы требует экспериментального исследования взаимодействия конституентных кварков. Таким исследованием может быть **изучение неупругих центральных соударений нуклонов при ГэВных энергиях**, которое открывает **новую область ядерной физики.**
5. Конкретной формой такого изучения может быть **измерение характеристик конечного состояния из двух нуклонов, испускаемых под углами, близкими к 90° , и мезонов.**

6. Оценки показывают, что дифференциальное **сечение таких реакций достаточно велико** для их изучения на установках, имеющих современный уровень светимости.

7. Необходимый уровень светимости ожидается на планируемой установке SPD(NICA) и имеется на уже действующей установке BM@N. Это обеспечивает **ОИЯИ возможность стать пионером** в исследованиях непертурбативной КХД структуры нуклонов и нуклон-нуклонного взаимодействия в NN реакциях.

1. The problem of the nucleon mass emergency is **one of the most important issues** of the modern physics,
2. A **conceptual solving** has been found already in the middle of the XX century:
The nonperturbative QCD interaction of the current quarks with the vacuum fluctuations leads at the chiral symmetry violation to the current quark dressing with the massive gluon-quark-antiquark condensate, that is
to the transition of a light current quark to a massive constituent quark.
3. As opposed to violation of the electroweak symmetry with the Englert-Brout-Higgs mechanism,
a similar mechanism for the chiral symmetry breaking in the QCD **is not yet developed.**
So, the problem of the nucleon mass emergency requires a solution, more detailed than a conceptual decision.
In particular, a **nature of the nucleon formation from the three constituent quarks is not known at present.**
4. A detailed solution to the problem requires the experimental investigation of the constituent quarks interaction.
Such investigation may be a study of the **inelastic central collisions of nucleons at the GeV energy range**, that opens up a **new field of nuclear physics.**
5. A specific form of such study could be measurement of the characteristics of the final state of two nucleons, emitted at the angles close to 90 degrees, and the accompanying mesons.

6. The estimates show that the **differential cross sections for such reactions are quite large** for their study at facilities with the modern luminosity levels.

7. The required luminosity level is expected at the projected SPD (NICA) installation and is available at the already operating BM@N (NICA) installation.

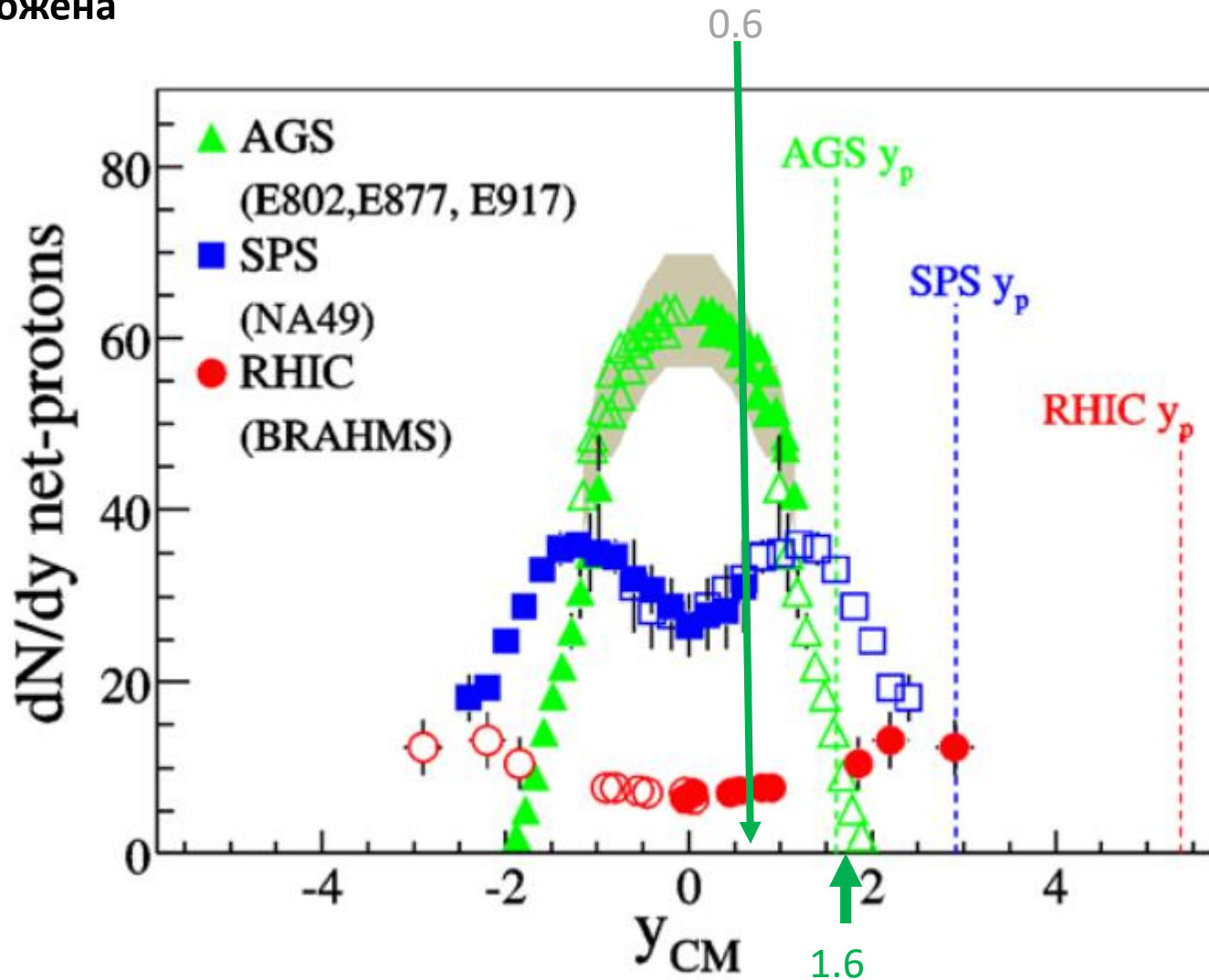
This **provides JINR with the opportunity to become a pioneer** in studies of the non-perturbative QCD structure of nucleons and nucleon-nucleon interaction in NN reactions.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

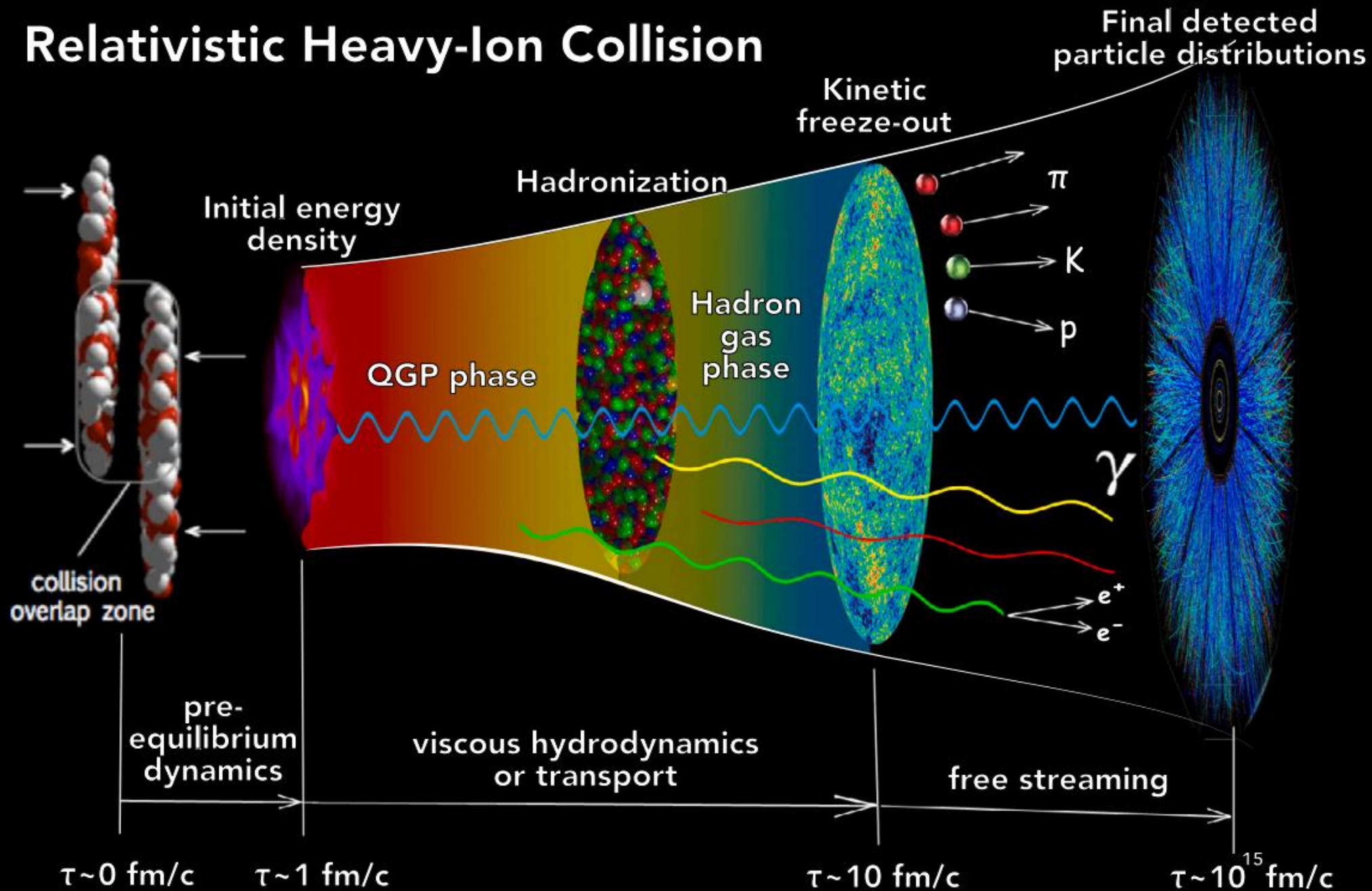
THANKS FOR YOUR ATTENTION!

Распределение быстроты вторичных частиц при различных быстротах пучка.

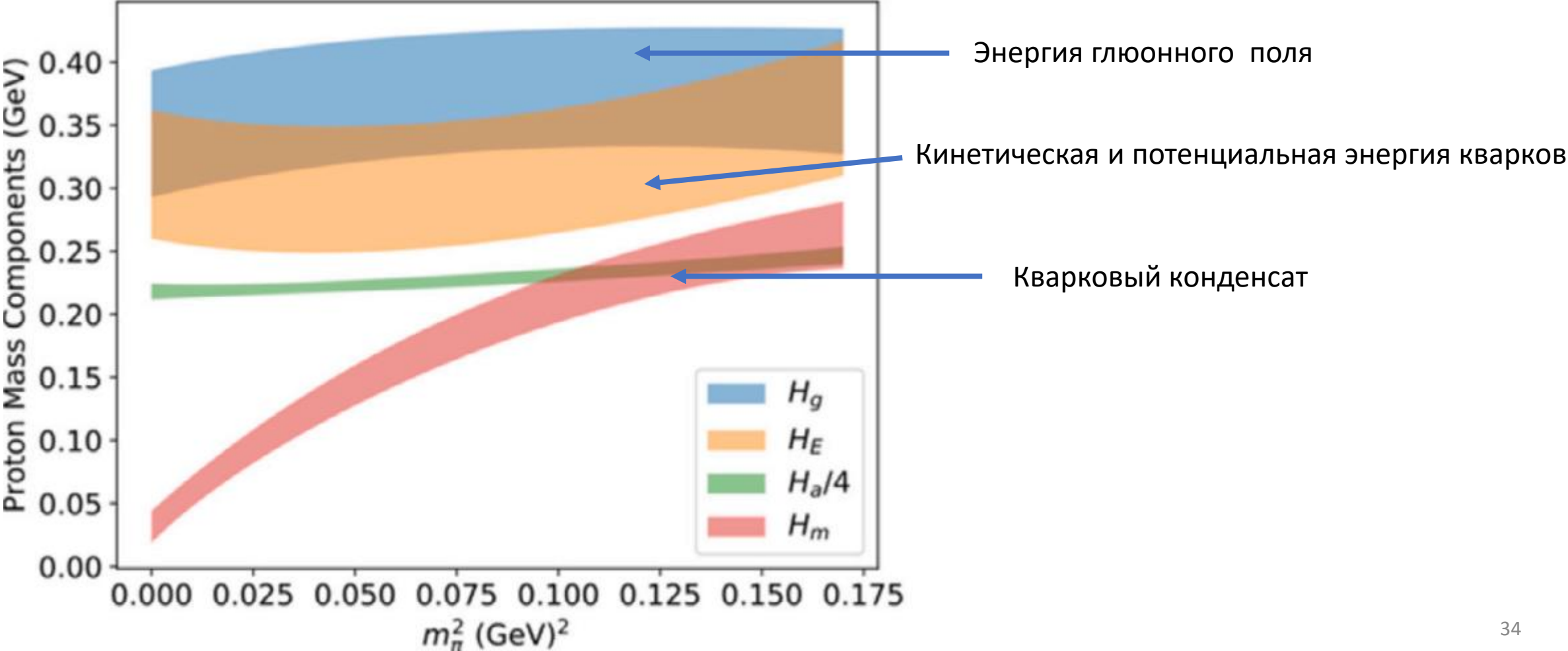
При энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5$ ГэВ быстрота пучка 1.6, а Средняя быстрота вторичных = 0.6, то есть основная часть протонов заторможена



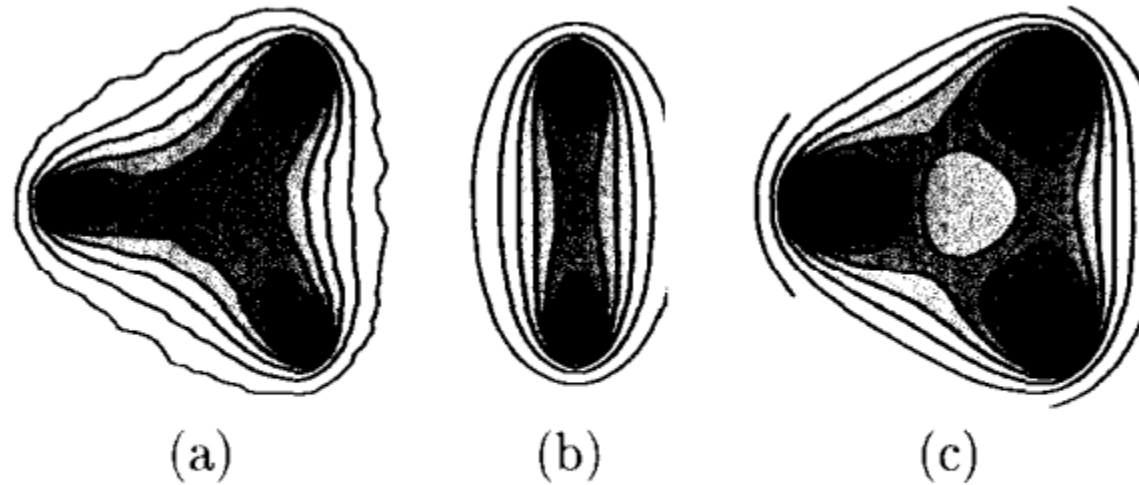
Relativistic Heavy-Ion Collision



Состав массы протона согласно расчётам на КХД решётке

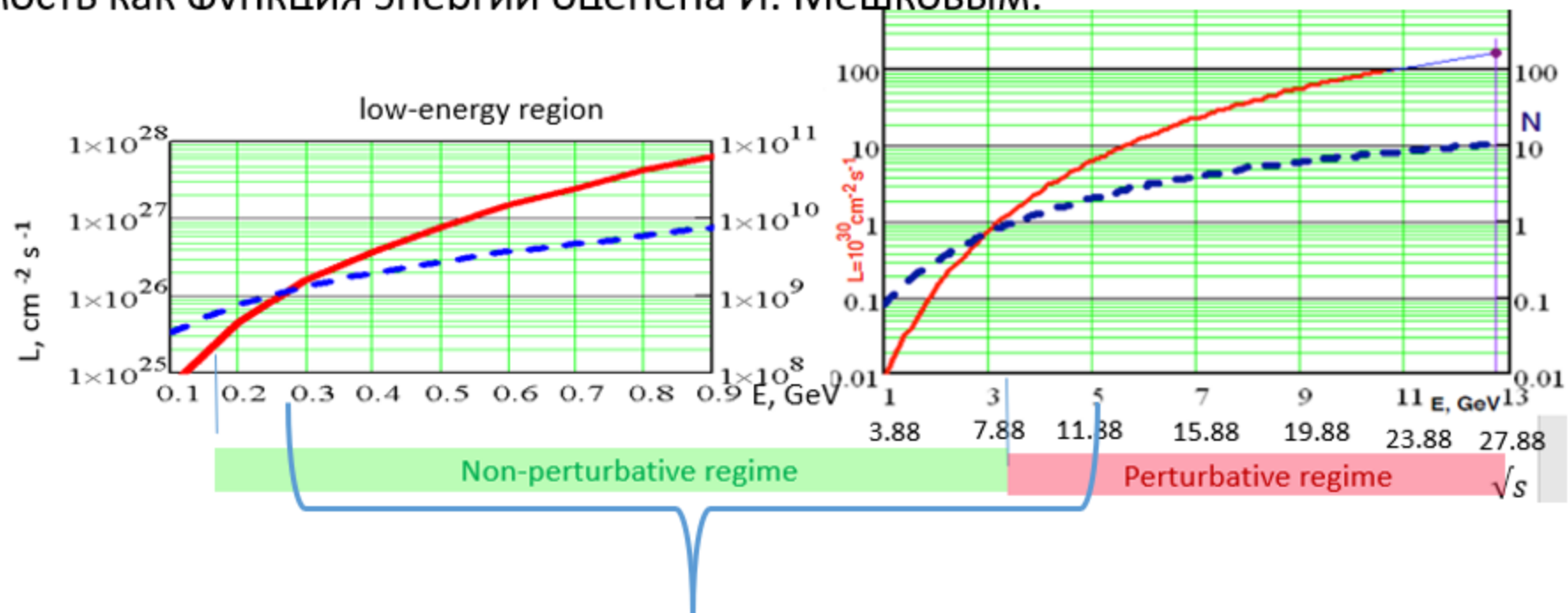


КХД на решётке: С. Alexandrou et al. The ground state of three quarks. Nucl. Phys B (Proc. Suppl.) 119 , 667 (2003)



Action densities in the $2d$ Potts model:
(a) $q\bar{q}q$, (b) $q\bar{q}$; (c) Δ prediction,

Светимость как функция энергии оценена И. Мещковым:



Интересующая нас область