

Глава 2

Классификация ветвей физики частиц

2.1 Физика элементарных частиц в целом.

В самом широком смысле, физика элементарных частиц призвана ответить на вопросы типа ”как устроен наш мир и почему он таков, каким мы его сегодня наблюдаем?”

Более конкретно – какова структура элементарных частиц, как они взаимодействуют друг с другом, почему они имеют ту или иную массу, что такое ”физический вакуум”, все ли типы частиц и их взаимодействий нам известны и т. п.?

Поиски ответов на эти, и многие другие вопросы, в зависимости от их характера идут в разных направлениях. Соответственно, используются разные (часто похожие) методы экспериментального и теоретического исследования.

Например, мы знаем о 4-х типах взаимодействий: **гравитационном, слабом, электромагнитном и сильном**. В физике элементарных частиц внимание концентрировалось, до недавнего времени, только на последних трех.

Наиболее понятным и изученным сегодня представляется элек-

ромагнитное взаимодействие. Здесь есть теория (квантовая электродинамика), позволяющая многое рассчитать. Но есть и нерешенные вопросы.

Довольно хорошо понято слабое взаимодействие. Уже понятно, что оно тесно связано с электромагнитным (теория электрослабого взаимодействия, основоположниками которой стали Стивен Вайнберг и Абдус Салам). Но нерешенных вопросов много и здесь.

Гораздо хуже понято сильное взаимодействие элементарных частиц. Здесь многого не удастся рассчитать "из первых принципов". Теоретическое описание явлений в сильной степени феноменологическое; количественные расчеты требуют знания большого количества параметров, извлекаемых из экспериментальных данных.

Эксперименты, в которых внимание концентрируется на выбранном отдельном типе взаимодействий, по своей методике и набору аппаратуры иногда отличаются весьма сильно. То же самое можно сказать и о теоретических методах.

Вместе с тем, экспериментальные и теоретические методы исследований можно подразделять на различные направления **по признаку характерных исследуемых расстояний** более или менее независимо от типа взаимодействия. Легче всего можно увидеть это на примере сравнения электромагнитных и сильных взаимодействий. Общим для них является то, что элементарные частицы являются квантовомеханическими объектами и по своей природе обладают волновыми свойствами. Соответственно, их дебройлевская длина волны определяет масштаб расстояний, которые могут быть существенны при их взаимодействии.

Но это не означает, что чем выше импульс частицы, тем меньшие расстояния будут "прощупываться". Правильнее было бы сказать, что тем меньшие расстояния **могут** "прощупываться": например, в экспериментах по рассеянию частиц определяющую роль играет не начальный импульс (или длина волны частиц в начальном состоянии) сам по себе, а величина его изменения при рассеянии. (Интуитивно это понятно, если вспомнить соотношение неопределенностей Гейзенберга.)

И опять, исследования процессов, происходящих на малых или больших (по сравнению с размерами частиц) расстояниях требуют разных экспериментальных и теоретических подходов и методов.

Наконец, поскольку в подавляющем большинстве экспериментов в физике элементарных частиц речь идет о рассеянии (упругом или же с рождением других частиц, т. е. неупругом), то полная энергия

в системе центра масс сталкивающихся частиц (или импульс одной из них (снаряда) в системе покоя другой (мишени), т. е. длина волны снаряда) является тем простым количественным параметром, по которому также разделяются методы и подходы, применяемые в теоретических и экспериментальных исследованиях.

На этой (энергетической) классификации стоит остановиться подробнее. Когда устраивается столкновение "снаряда" с 4-импульсом \mathcal{P}_{proj} и "мишени" с 4-импульсом \mathcal{P}_{targ} , полный 4-импульс \mathcal{P}_{tot} этой системы есть

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{tot} &= \mathcal{P}_{proj} + \mathcal{P}_{targ} , \text{ т. е.} \\ (E_{tot}, \mathbf{p}_{tot}) &= (E_{proj} + E_{targ}, \mathbf{p}_{proj} + \mathbf{p}_{targ}) , \end{aligned} \quad (2.1)$$

и взяв все величины в системе центра масс сталкивающихся частиц (чтобы подчеркнуть это, они помечены звездочкой), имеем:

$$\mathcal{P}_{tot} = (E_{tot}^*, \mathbf{p}_{tot}^*) = (E_{proj}^* + E_{targ}^*, (\mathbf{p}_{proj}^* + \mathbf{p}_{targ}^* = 0)) . \quad (2.2)$$

Поскольку квадрат 4-импульса есть релятивистский инвариант, то при покоящейся в лабораторной системе мишени ($\mathbf{p}_{targ} = 0$) имеем

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{tot}^2 &= (E_{tot}^*, \mathbf{p}_{tot}^*)^2 = (E_{proj} + E_{targ}, \mathbf{p}_{proj})^2 = \\ &= (E_{proj}^* + E_{targ}^*)^2 . \end{aligned} \quad (2.3)$$

Квадрат полного 4-импульса двух сталкивающихся частиц, имеющий физический смысл квадрата полной энергии в системе их центра масс, играет важную роль в кинематических расчетах и для него принято специальное обозначение s :

$$s \equiv \mathcal{P}_{tot}^2 = m_{proj}^2 + m_{targ}^2 + 2m_{targ} \cdot E_{proj} = (E_{proj}^* + E_{targ}^*)^2 . \quad (2.4)$$

Здесь раскрыта скобка $(E_{proj} + E_{targ}, \mathbf{p}_{proj})^2$ и учтено, что для свободной частицы $E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$ (буквой m обозначена масса частицы).

Величина s входит в число весьма широко используемых в физике частиц релятивистски инвариантных переменных (называемых переменными Мандельштама).

Если вспомнить определение порога реакции (см. например [25]), то станет ясно, что величина s для гипотетической реакции типа $a + b \rightarrow X$ с рождением некоторой частицы X определяет максимально возможную массу такой частицы: она не может быть выше \sqrt{s} . (Как известно, на пороге неупругой реакции типа $a + b \rightarrow c + d + X$ все частицы в конечном состоянии *покоятся в системе центра масс*: вся полная энергия E_{tot}^* тратится на массы рожденных частиц).

2.2 Энергетические области: специфика.

Даже беглый взгляд на одну из важнейших характеристик взаимодействия частиц (полное сечение рассеяния) взятую в зависимости от энергии сталкивающихся частиц, позволяет заметить, что в области энергий снаряда выше порога неупругости (мишень считаем покоящейся в лабораторной системе отсчета), а именно – от нескольких сотен МэВ до десятка ГэВ, взаимодействия элементарных частиц за счет ”ядерных сил” имеют характер, отличный от того, который они имеют при меньших энергиях или при достаточно больших энергиях (где возможно рождение либо большого числа других частиц, либо рождение весьма тяжелых частиц).

2.2.1 Зависимость сечений рассеяния от энергии.

Действительно, из данных о полных сечениях рассеяния частиц (рис. 2.1-2.6), взятых либо в зависимости от импульса снаряда в лабораторной системе отсчета (л.с.), либо от \sqrt{s} – полной энергии в системе центра масс (с.ц.м.) видно, что при малых энергиях они плавно и довольно быстро уменьшаются с ее ростом, а при больших – наоборот, плавно растут, хотя и достаточно медленно.

В области промежуточных энергий (импульсы снаряда лежат в интервале 0.2-10 ГэВ/с) поведение полных сечений рассеяния совсем иное: видны хорошо заметные колебания величины сечений, похожие на резонансные кривые, причем величина, форма и число таких колебаний различны для различных пар сталкивающихся частиц. В целом, это напоминает эффект Рамзауэра в атомной физике, наводя на подозрение о сходстве причин этих эффектов. И действительно, довольно глубокое сходство в самом деле есть. Однако эти колебания величины сечений проявляются при разных энергиях снарядов, в зависимости от их типа (барионы, пионы, каоны). Поэтому границы области, где сечения рассеяния нерегулярны, единым образом определить на энергетической шкале трудно. Совсем иная ситуация возникает, если эти же сечения представлять в зависимости от быстроты снаряда, как это сделано в следующем параграфе.

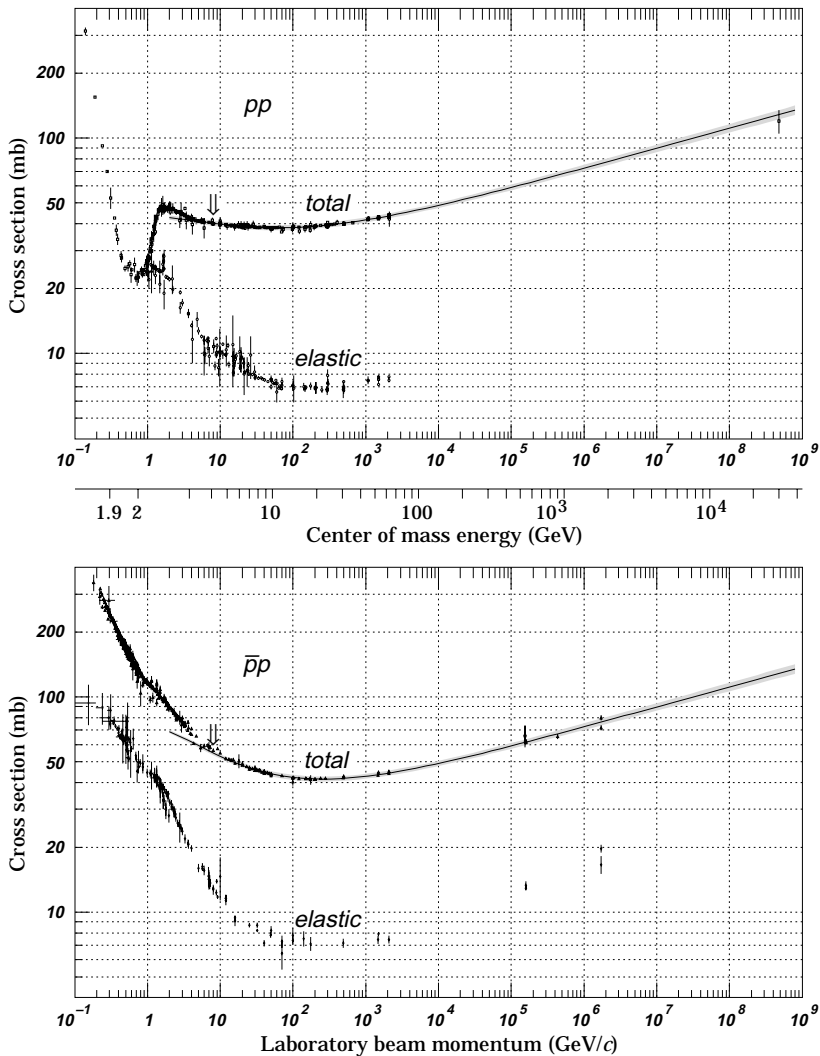


Рис. 2.1. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия протонов и антипротонов с протонами [29].

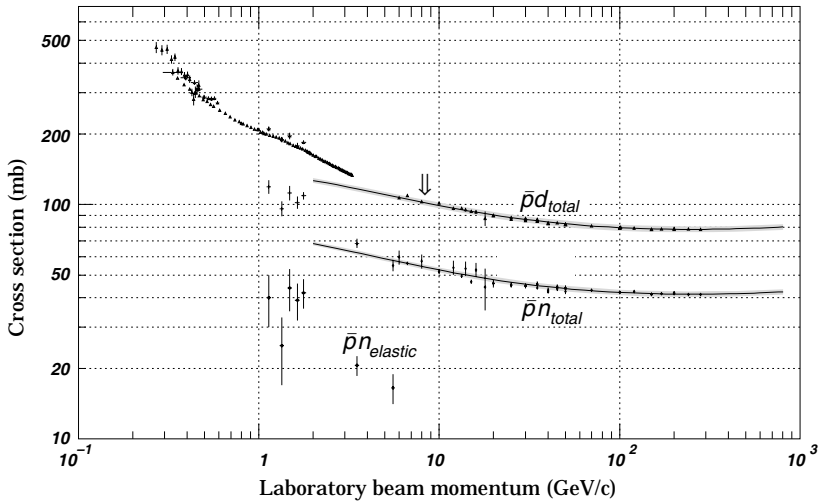
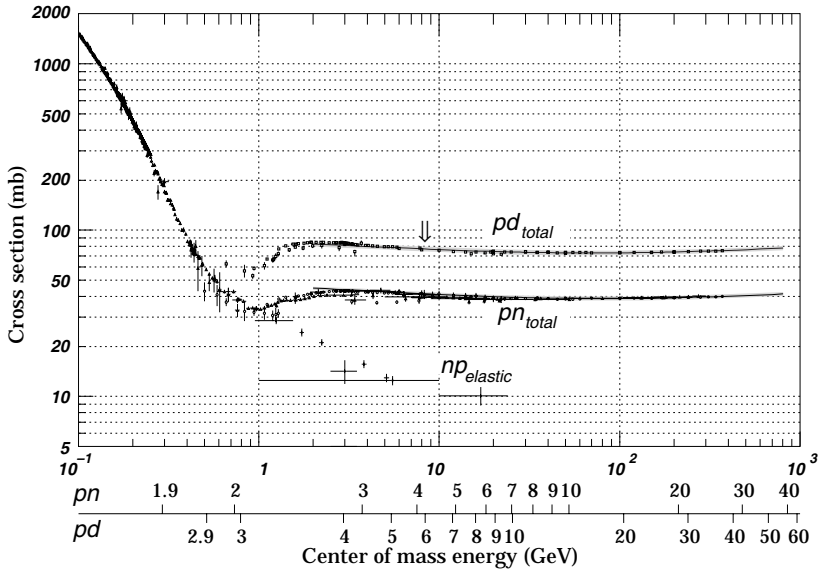


Рис. 2.2. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия протонов и антипротонов с дейтронами и нейтронами [29].

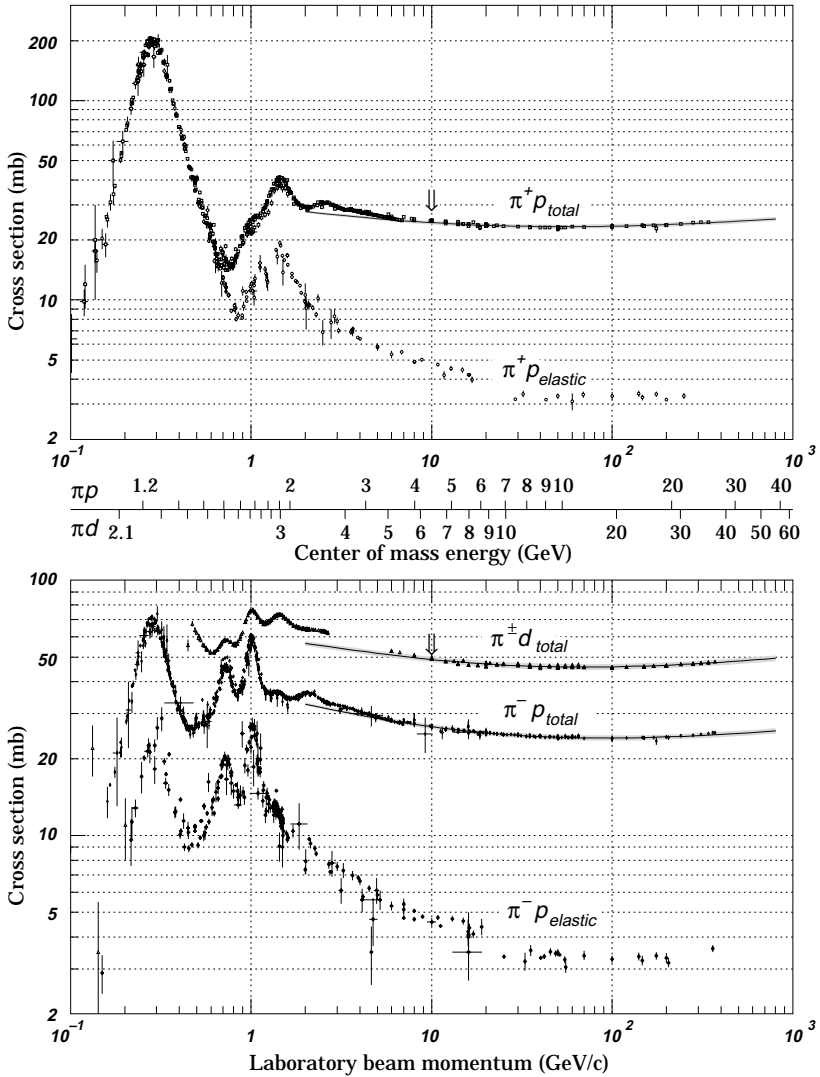


Рис. 2.3. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия пионов с протонами и дейтронами [29].

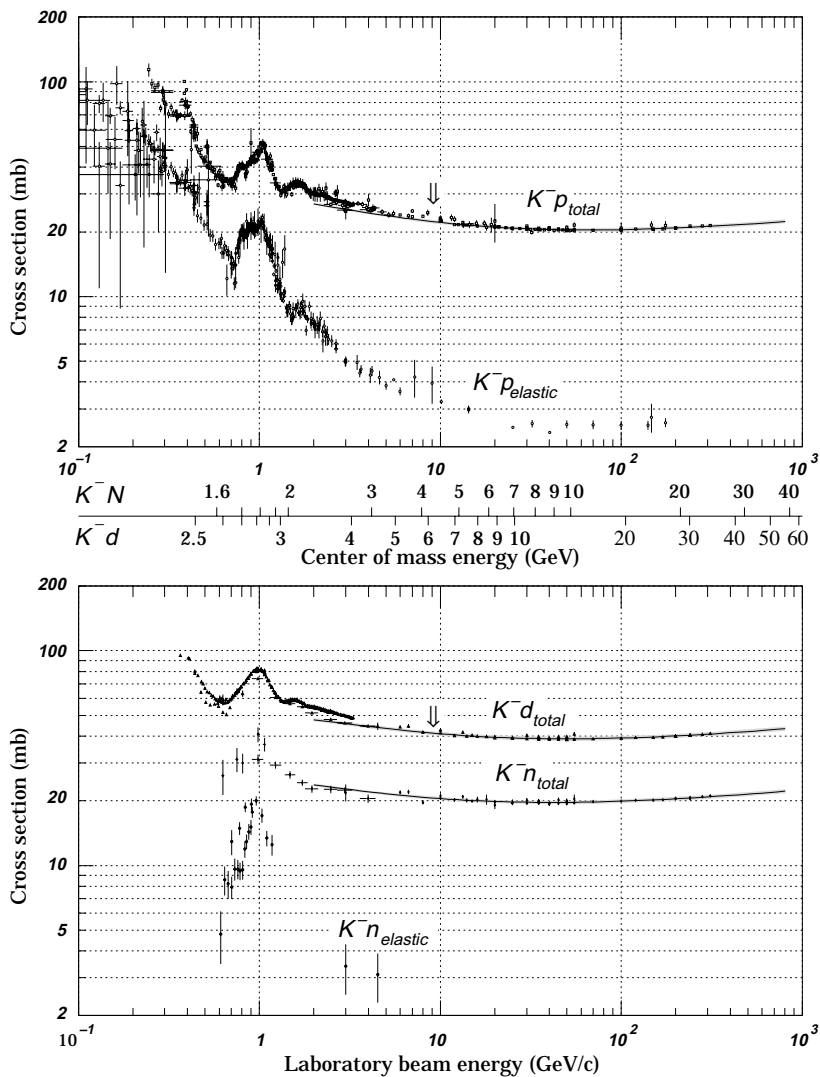


Рис. 2.4. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия отрицательных каонов с протонами, нейтронами и дейтронами [29].

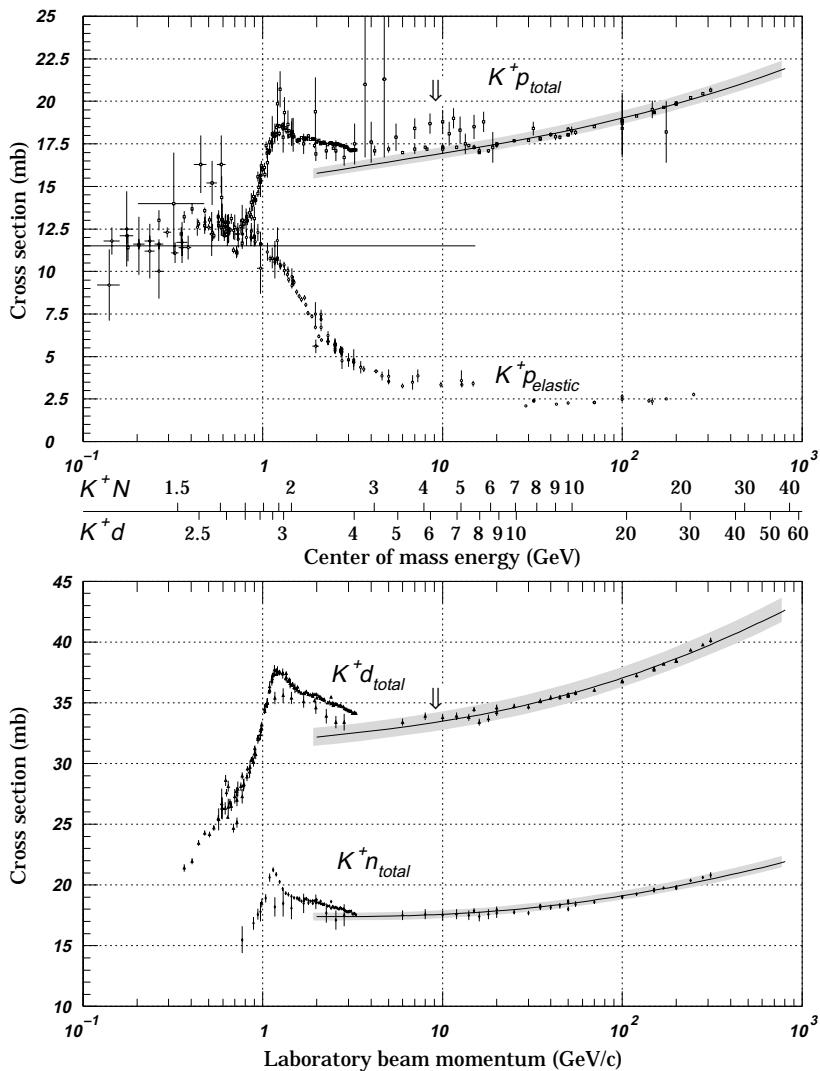


Рис. 2.5. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия положительных каонов с протонами, нейтронами и дейтронами [29].

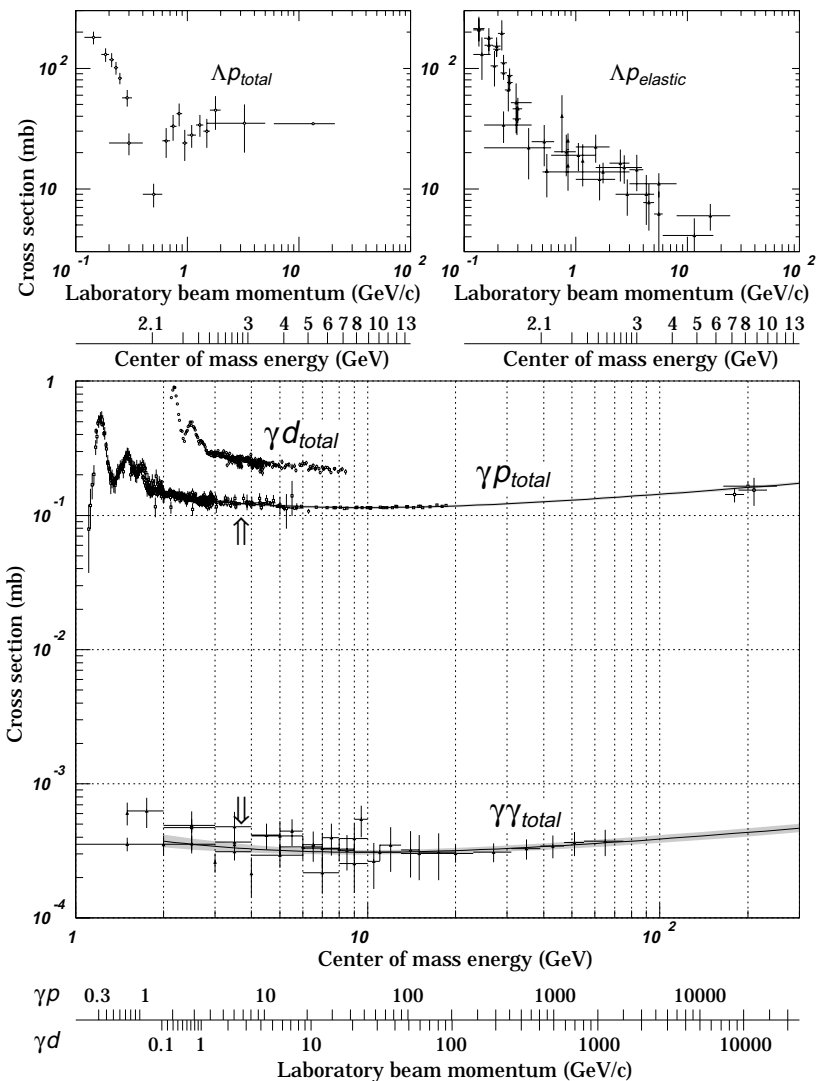


Рис. 2.6. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия гиперонов и фотонов с протонами и дейтронами. Приведены также данные о фотон-фотонных сечениях [29].

2.2.2 Полные сечения в зависимости от быстроты.

Рассмотрим сечения взаимодействия частиц, представленные на рисунках 2.1–2.5 в зависимости от быстроты снаряда (считая, что мишень находится в покое относительно лабораторной системы отсчета). Полученные результаты показаны на рис. 2.7.

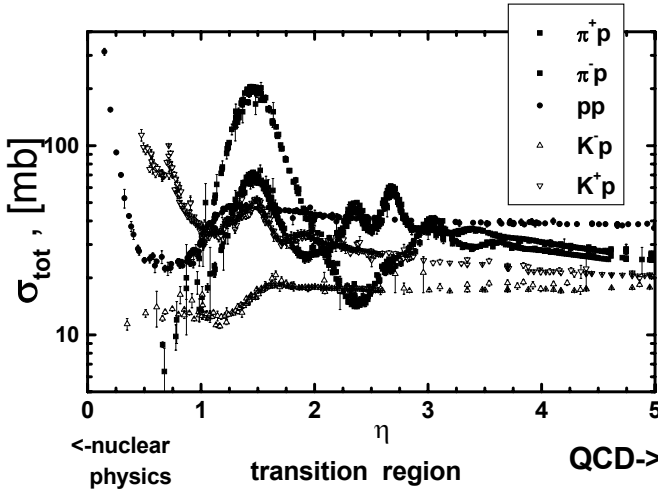


Рис. 2.7. Зависимость полных сечений от быстроты η снаряда (по А.А.Балдину).

Из этого рисунка видно, что сильная, резонансно-подобная зависимость сечений взаимодействия разных частиц имеет место только при быстроте соответствующих снарядов, лежащей **в одном и том же интервале от 1 до 3 единиц** независимо от сорта снаряда. При более высоких быстротах сечения меняются плавно и медленно, при быстротах менее 1 – плавно, но довольно быстро. Сходство поведения сечений рассеяния различных частиц здесь видно много лучше, чем на рисунках 2.1–2.6, где они были показаны в зависимости от полной энергии в системе центра масс или импульса снаряда в лабораторной системе.

Другая безразмерная, релятивистски инвариантная переменная, близко связанная с быстротой, была предложена А.М.Балдиным при изучении явления ”кумулятивного” рождения частиц. Для пары час-

тиц 1 и 2 он ввел переменную $b_{12} = -(u_1 - u_2)^2$, где u_i —4-скорость¹. Считая частицу 1 снарядом, а частицу 2 мишенью, можно вычислить квадрат разности 4-скоростей снаряда (*projectile*) и мишени (*target*), т. е. b_{tp} , и увидеть, что в системе покоя мишени $\gamma_p = 1 + b_{tp}/2$. Переменную b_{tp} можно также связать с быстротой снаряда (см. (1.16)).

2.3 Особенности разных энергетических областей.

Итак, говоря о физике элементарных частиц, можно выделить три характерных области энергий, в которых как предмет, так и экспериментальные и теоретические методы исследования заметно различаются. Именно:

- низкие энергии (ниже порога рождения пионов, как легчайших адронов), где разность быстрот снаряда и мишени заметно меньше 1; это более-менее хорошо определенная граница;
- промежуточные (переходные, или резонансные) энергии: выше порога образования мезонов (пионов, прежде всего), но ниже порога рождения частиц, содержащих тяжелые кварки второго и третьего поколений; эта (верхняя) граница довольно условна, но в терминах быстроты это область тех энергий, где разность быстрот снаряда и мишени лежит в интервале от 1 до (3-4).
- высокие энергии: все, что выше верхней границы переходной области. Здесь разность быстрот снаряда и мишени более (3-4) и может быть заметно выше. (Может быть, в недалеком будущем в этой области появится новый разделительный "маяк", которым может стать, например, порог рождения бозона Хиггса.)

2.3.1 Физика низких энергий.

В этой области физики частиц хорошо определено понятие потенциала взаимодействия, релятивистские эффекты имеют характер поправок, существует множество феноменологических констант но

¹ Понятие 4-скорости будет подробнее обсуждено позже.

разработаны достаточно точные (в ряде случаев) методы расчетов. Машинные вычисления, необходимые для теоретических расчетов, нередко долгие и сложные.

Экспериментальные установки для измерений в этой области энергий обычно достаточно простые; жизненный цикл экспериментов (идея→установка→измерения→результат) относительно короткий (его характерная длительность исчисляется месяцами). Именно поэтому в этой области многое делается в университетах или исследовательских институтах при университетах.

2.3.2 Физика высоких энергий.

Характерные особенности физики высоких энергий: преобладает феноменологическое или даже качественное описание явлений, число каналов неупругих реакций очень велико, реакции отличаются высокой множественностью частиц в конечном состоянии.

Существует множество теоретических моделей одних и тех же явлений, степень разброса надежности теоретических предсказаний очень велика (от точных до совсем неопределенных). Теория постоянно нуждается в "подсказках" (зачастую качественного характера) от эксперимента для снятия неопределенностей и отбора жизнеспособных моделей. К счастью, уже создана единая схема описания и систематизации наблюдаемых фактов и явлений (электрослабая теория, Стандартная модель). *Кварк-партонная картина* сильных взаимодействий дает основу для анализа и интерпретации экспериментальных данных. В этой картине при рассмотрении внутренней структуры элементарных частиц вместо их волновой функции используется понятие *структурных функций*.

Благодаря свойству асимптотической свободы квантовой хромодинамики (КХД), ряд явлений, происходящих при больших переданных импульсах, допускает количественный анализ и интерпретацию наблюдений методами теории возмущений.

Вместе с тем, эксперименты в этой области требуют больших затрат как времени, так и материальных ресурсов и поэтому тоже нуждаются в "подсказках" от теории для выбора перспективных и актуальных направлений исследований. Экспериментальные установки обычно сложные и дорогие, имеют длинный (десяток лет или более) жизненный цикл, создаются и обслуживаются большими коллективами. И экспериментаторы, и теоретики предпочитают получать качественные результаты, особенно – не укладывающиеся в

сложившуюся картину.

Характерными чертами исследований в этой области в последние десятилетия является то, что наиболее яркие экспериментальные результаты имеют, как правило, высокую статистическую и систематическую точность, а разработанные для экспериментов в физике высоких энергий методы и устройства довольно быстро находят широкое применение в самых разных областях человеческой деятельности, (причем не только в науке, технике и промышленности).

2.3.3 Физика переходной области энергий.

В переходной области энергий сталкиваются и сосуществуют два основных типа теоретических подходов и два языка:

- Язык потенциалов, представление о потенциальном рассеянии и волновых функциях составных объектов (ядер или элементарных частиц). Такой подход характерен при экстраполяции из области низких энергий в область промежуточных энергий вблизи ее нижней границы. При этом понятие потенциала теряет строгость и "размывается".
- Язык диаграмм Фейнмана, эффективные мезон-нуклонные полевые теории с феноменологическими формфакторами и эмпирическими константами. При экстраполяции из области высоких энергий в переходную область вблизи ее верхней границы структурными элементами при анализе элементарных частиц являются "конституентные" кварки, отличные от "токовых" кварков и глюонов кварк-партоновой картины процессов при высоких энергиях.

Такая двойственность обусловлена тем, что при промежуточных (переходных) энергиях нельзя проводить КХД расчеты методами теории возмущений: характерные константы связи в квантовой хромодинамике растут с ростом характерных расстояний. Это свойство КХД называют свойством *конфайнмента*; оно отражает тот экспериментальный факт, что в свободном состоянии кварки не наблюдаются. Именно причины и механизм конфайнмента в настоящее время являются основными проблемами физики частиц и ядер в переходной области энергий.

Дополнительная трудность при теоретическом анализе явлений в рассматриваемой области энергий связана с тем, что здесь реляти-

вистские эффекты уже существенны, но в кинематических расчетах, даже в приближенных, нельзя пренебрегать массами и (порой) даже энергиями связи частиц в ядерных системах.

Эксперименты в переходной области не так сложны и длительны, как в области высоких энергий, но все же требуют заметно больших затрат как времени, так и материальных ресурсов, чем при низких энергиях и поэтому тоже нуждаются в "подсказках" от теории для выбора перспективных и актуальных направлений исследований. Соответствующие экспериментальные установки умеренно сложные и дорогие, но их жизненный цикл все же измеряется годами (а не десятками лет). Слишком большие коллективы специалистов для создания и обслуживания этих установок не требуются.

2.4 Предмет современной физики промежуточных энергий.

В последние 2-3 десятилетия происходила постепенная смена тематики исследований в области физики промежуточных энергий, в результате чего сменился ее предмет. Вместо "охоты за резонансами", актуальной в 60–70-е годы, когда основная масса экспериментальных и теоретических работ была посвящена взаимодействиям элементарных частиц (нуклонов с нуклонами, мезонов с нуклонами), внимание физиков переместилось на проблемы взаимодействия частиц с ядрами и проблемы проявления кварковых степеней свободы в ядрах. Произошло сближение тем, считавшихся "чистой физикой элементарных частиц" и "чистой ядерной физикой"; ядерная физика "вошла" в область промежуточных энергий и стало возможным говорить о ядерной физике промежуточных энергий или релятивистской ядерной физике (правда, последний термин после ускорения ядер в ЦЕРН и запуска коллайдера RHIC в Брукхейвене включает в себя и ядерную физику высоких энергий).

Проблематика ядерной физики промежуточных энергий сформировалась как при движении из области низких энергий к более высоким при решении проблем традиционной ядерной физики, так и при движении от физики взаимодействия элементарных частиц друг с другом к рассмотрению их взаимодействия с ядрами. Большую роль здесь сыграл успех теории Глаубера-Ситенко в описании

взаимодействия частиц с ядрами.

Основные направления (предмет) современных исследований по физике промежуточных энергий можно представить следующим образом (двигаясь от проблем традиционной ядерной физики к проблемам физики частиц в узком смысле).

- Структура ядер и ядерная материя (нуклонная):
 - Распределение вещества в ядрах (протонов, нейтронов); распределение электрического заряда; распределение электрических токов.
 - Механизмы возбуждения ядерных уровней. Функции отклика на разные типы возбуждений разными пробниками (селективное возбуждение ядерных уровней).
 - Свойства ядерной материи при высоких плотностях вещества, высоких температурах и т. д. Создание условий для образования и исследования свойств барионной (не обязательно нуклонной) материи (обогащенной мезонами и адронными резонансами в том числе). Уравнение состояния барионной материи, ее фазы и фазовые переходы.
- "Экзотические" ядра, в том числе – ядра с протяженной нуклонной оболочкой; гипер-ядра; ядра с возбужденными нуклонами (например, ядра с Δ -возбуждениями) или мезонами (η -ядра); системы, пограничные между атомами и ядрами: глубоко связанные K -кластеры и т. п.
- Проявления ненуклонных степеней свободы ядерной материи, в т. ч. кварк-глюонных. Отклик ядерного вещества на высокие возбуждения, проявления внутренней структуры частиц при малых расстояниях между ними.
- Ядерные силы при "средних" и "малых" расстояниях между нуклонами. Многонуклонные силы и их природа.
- Релятивистские составные системы и проблема их теоретического описания. Экспериментальные методы и подходы к изучению структуры ядер при малых, по сравнению с размером нуклона (~ 0.8 Фм), расстояниях между ними.
- Свойства частиц и резонансов в ядерной среде.

- Механизмы рождения частиц (мезонов, барионов) на связанных нуклонах; коллективные (в широком и узком смысле) явления.
- Механизмы рождения частиц вблизи их порогов.
- Изучение взаимодействия нестабильных частиц при малых относительных энергиях с другими (стабильными) частицами и ядрами путем анализа взаимодействия в конечном состоянии вблизи порогов их рождения.
- Спектроскопия элементарных частиц; экзотические частицы.
- Задачи метрологического характера (определение численных значений феноменологических констант, необходимых как для традиционной ядерной физики, так и для физики высоких энергий).

2.4.1 Зачем ускорять ядра?

Ответ на этот вопрос неоднозначен. Он зависит от того, из какой области энергий начинается движение в переходную область. Если входить в нее из области высоких энергий, то можно сказать, что ускорение ядер дает возможность поставить и решать такие вопросы, которые ранее вообще не рассматривались. Некоторые из них обсуждаются в разделе 2.4.2.

Если же искать ответ на этот вопрос, отталкиваясь от проблематики, характерной для области низких энергий и проблем традиционной ядерной физики, т. е. двигаясь из области низких энергий, то этом случае бросаются в глаза новые инструментальные возможности, которые ускорение ядер дает для решения традиционных проблем. Эти возможности возникают благодаря следующим обстоятельствам.

Во-первых, благодаря релятивистскому эффекту "растяжения" времени, процессы внутреннего движения конstituентов в ядрах и распада релятивистских нестабильных ядер (в частности, гипер-ядер), наблюдаемые из лабораторной системы отсчета, "замедляются". В частности, за время жизни нестабильного ядра τ_0 в собственной системе отсчета, в установке оно пролетает путь порядка $\gamma\beta c\tau_0$, вполне макроскопический и достаточно легко измеримый. Иными словами, время жизни конвертируется в пройден-

ный путь. В сущности, этот же эффект лежит как в основе кварк-партонной картины взаимодействия частиц, так и в основе фрагментационного метода изучения структуры легких ядер, краткое обсуждение которого будет дано позже.

Во-вторых, те частицы, которые появились при взаимодействии релятивистского ядра A с мишенью b и были "медленными" в системе покоя этого ядра, оказываются вполне релятивистскими в лабораторной системе, что в ряде случаев существенно облегчает их экспериментальное наблюдение. Иными словами, некоторые каналы реакций типа $b + A$ гораздо удобнее изучать в т. н. "инверсной" кинематике, когда снарядом является ядро A , чем в "прямой", когда снарядом является частица b . Это бывает особенно важно при изучении класса явлений, запрещенных законами сохранения энергии-импульса для столкновений частица+(свободный нуклон), то есть для т. н. подпороговых реакций или кумулятивных реакций.

Итак, ускорение ядер открывает новые методические возможности в следующих направлениях:

- исследования структуры ядер (легчайших в первую очередь) и проявлений ненуклонных степеней свободы ядер (здесь эксплуатируется релятивистское "растяжение" времени);
- свойства гипер-ядер (конверсия "время жизни \rightarrow пройденный путь");
- исследование кумулятивных и подпороговых явлений;
- поиск эффектов многонуклонных (трехчастичных) сил в атомных ядрах.

Кроме того, пучки ускоренных тяжелых ионов необходимы для решения таких задач, как

- получение нейтронных пучков и пучков "экзотических" ядер (в первую очередь – вблизи границ области стабильности) а также ядер с протонным или нейтронным гало для исследования их свойств;
- прикладные исследования (радиационная стойкость микроэлектроники, радиобиология, астрофизические приложения).

Наконец, ряд традиционных задач физики частиц в переходной области либо вообще невозможны без использования пучков легких

ядер, либо при выполнении измерений в "инверсной" кинематике легче поддаются экспериментальному решению. К ним относятся, например,

- изучение механизмов рождения и свойств адронных резонансов (Δ , Роперовский резонанс, мезонные резонансы) при вариации квантовых чисел начальных состояний (это было реализовано при изучении реакций типа $({}^3\text{He}, t)$, (d, d') , (α, α'));
- изучение свойств элементарных частиц и адронных резонансов в ядерной среде. Здесь особенно полезна "инверсная" кинематика, что довольно очевидно: ведь для наблюдения сигнала о влиянии среды на свойства появившихся в ней частиц необходимо создать условия, при которых эти частицы достаточно долго пребывают в ядерном окружении, т.е. движутся достаточно "медленно" относительно среды.

2.4.2 Физика релятивистских тяжелых ионов.

Изучение сильно взаимодействующей адронной (КХД) материи становится главным предметом исследования в физике тяжелых ионов высоких энергий, что отражается в общей тенденции последних десятилетий к унификации программ исследований в физике частиц и в ядерной физике.

Прежде всего, это подразумевает понимание диаграмм состояний (фазовых диаграмм) ядерной материи и установления границ, разделяющих разные фазы (т. е. границ, где происходят фазовые переходы – если они вообще происходят, что пока не установлено).

Согласно современным теоретическим представлениям, ожидается, что существуют следующие различные фазы сильно взаимодействующего КХД вещества: адронное вещество, плотное барионное вещество, кварк-глюонная плазма. Возможно, есть и другие фазы.

При низких энергиях исследуется обычная ядерная материя при нормальной (или низкой) плотностях и ее уравнение состояния.

Намного меньше исследована область больших плотностей и/или высоких температур. Именно эта область может быть прощупана с помощью тяжелых ионов высоких энергий. Особо интригующей темой сегодня является вопрос о том, существует ли критическая точка на диаграмме состояний сильно взаимодействующей адронной (КХД) материи (см. рис. 2.8), одна ли она, есть ли нечто вроде тройной точки на фазовой диаграмме.

Эволюция барионной (адронной) материи может заканчиваться на стадии появления "ароматизированного" барионного вещества, обогащенного гиперонами и странными мезонами. Здесь стоит отметить, что стабилизирующая роль странности в ядерной материи сегодня является одной из наиболее интересных и не слишком исследованных тем; яркий пример дают нейтроноизбыточные легчайшие гипер-ядра.

Главный, доступный ныне метод экспериментального изучения сильно взаимодействующей КХД материи – ее образование в процессах неупругого рассеяния ядер. Можно выделить три характерные стадии развития таких процессов во времени (см. рис. 2.10):

1. образование сильно взаимодействующей адронной (КХД) материи,
2. ее эволюция (например, от горячего и плотного состояния к разреженному и холодному, где уже могут появиться адроны),
3. адронизация кварков и конденсация КХД материи в адронную и/или ядерную материю.

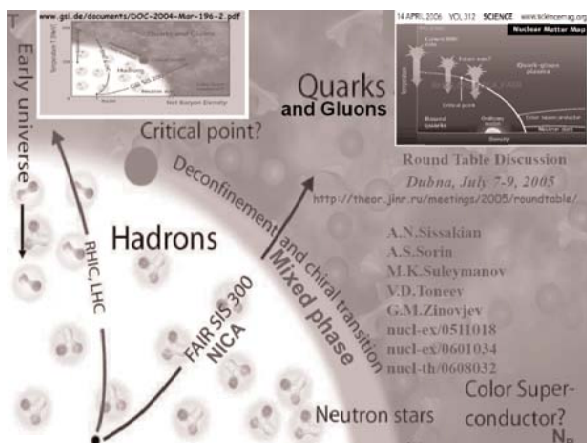


Рис. 2.8. Эволюция представлений о фазовой диаграмме для сильно взаимодействующей КХД материи. Врезка слева сверху – представление теоретиками фазовой диаграммы в 2004 году; врезка справа сверху – та же диаграмма в конце 2005 года; основной рисунок – один из вариантов ожидаемой фазовой диаграммы в середине 2005 года. Абсцисса: чистая барионная плотность, ордината: температура системы (МэВ).

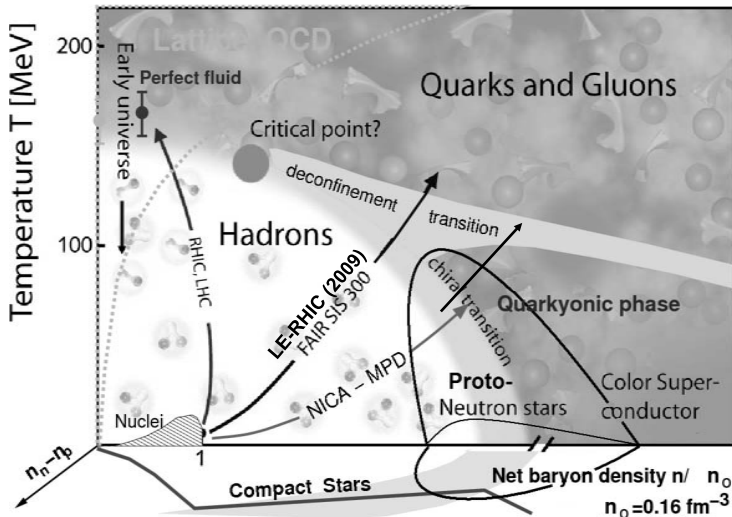


Рис. 2.9. Эволюция представлений о фазовой диаграмме для сильно взаимодействующей КХД материи: результаты расчетов на решетках для фазовой диаграммы (осень 2009 г.). Абсцисса: чистая барионная плотность в относительных единицах, ордината: температура системы в МэВ.

При смене стадий возможны различные фазовые переходы. Так например, многие теоретические модели, включая вычисления на решетке, указывают, что в области энергий (в системе центра масс, в расчете на нуклон) $\sqrt{s_{NN}} = 4 \div 9$ ГэВ для столкновений, например, Au-Au или U-U, может находиться критическая точка.

Общей для всех этих стадий особенностью является то, что при теоретическом рассмотрении каждой из них с неизбежностью приходится иметь дело с проблемами непертурбативного характера. В разных типах реакций приходится иметь дело с разными аспектами этих трех стадий.

Например, в любом неупругом рассеянии, рождение частиц происходит в различном окружении. В столкновениях "частица-частица" образование новых частиц происходит в области, погруженной в физический вакуум, тогда как в ядро-ядерных столкновениях оно происходит в областях, погруженных в сильно взаимодействующую КХД среду (где, кстати, некоторые спонтанно нарушенные симметрии могут оказаться восстановленными). Поэтому изме-

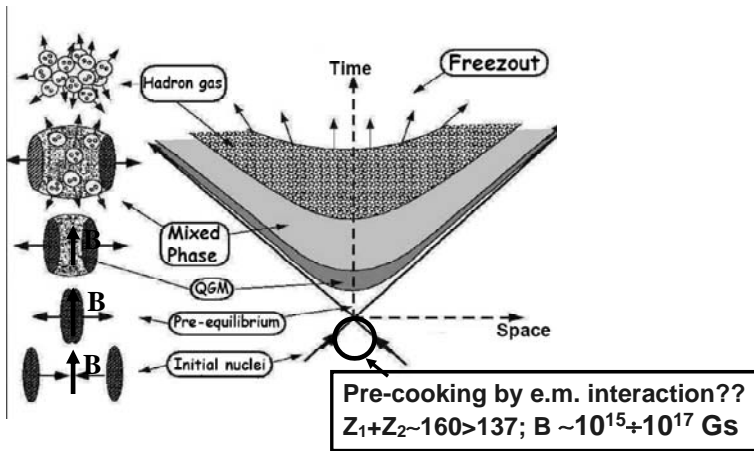


Рис. 2.10. Возможный сценарий эволюции сильно взаимодействующей КХД материи при столкновении релятивистских тяжелых ионов. За начало отсчета времени (произвольно) принят момент, когда линия, соединяющая центры масс сталкивающихся ядер перпендикулярна линии, на которой лежит импульс одного из ядер; начало отсчета пространственных координат совпадает с координатами точки наибольшего сближения сталкивающихся ядер (для симметричного столкновения (одинаковые ядра) она совпадает с координатами центра масс системы двух ядер).

нение свойств частиц в сильно взаимодействующей среде становится в настоящее время "горячей" темой: в холодной и горячей, плотной и разреженной материи могут быть разными как структурные функции частиц, так и спектры частиц и/или ширины резонансов; адронизация кварков (рассматриваемая в терминах функций фрагментации) на конечной стадии эволюции КХД вещества также происходит в различном окружении, и т. д. и т. п.

Важная особенность, присущая именно столкновениям релятивистских тяжелых ионов связана с тем, что из-за высокого электрического заряда ядер процессы взаимодействия на кварковом уровне разыгрываются в присутствии сильнейших электромагнитных полей. Теоретические оценки показывают, например, что при столкновениях релятивистских тяжелых ионов могут появляться сильнейшие магнитные поля (рис. 2.11), на несколько порядков превосходящие магнитные поля астрофизических объектов.

Поэтому вполне возможно, что к перечисленным выше стадиям

развития во времени процессов неупругого взаимодействия ядер следует добавить стадию "предварительной подготовки" ядерной материи к собственно сильному взаимодействию (рис. 2.10), на которой протонная и нейтронная составляющие каждого из ядер, участвующих в столкновении, разделяются (из-за кулоновского расталкивания) и поляризуются (из-за появления сверхсильных магнитных полей и разного знака магнитных моментов нейтронов и протонов). Какие эффекты могут возникать при этом на начальной стадии образования сильно взаимодействующей КХД материи, равно как и при ее эволюции в присутствии сверхсильных электромагнитных полей, пока неясно. Более того, далеко не очевидно, что здесь применимы традиционные пертурбативные подходы к рассмотрению электромагнитных взаимодействий (см. в этой связи книгу [21]).

Comparison of magnetic fields



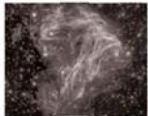
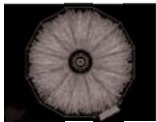
	The Earth's magnetic field	0.6 Gauss
	A common, hand-held magnet	100 Gauss
	The strongest steady magnetic fields achieved so far in the laboratory	4.5×10^5 Gauss
	The strongest man-made fields ever achieved, if only briefly	10^7 Gauss
	Typical surface, polar magnetic fields of radio pulsars	10^{13} Gauss
	Surface field of Magnetars	10^{15} Gauss
	http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html	
	Heavy ion collisions: the strongest magnetic field ever achieved in the laboratory	
	Off central Gold-Gold Collisions at 100 GeV per nucleon	
	$eB(\tau = 0.2 \text{ fm}) = 10^3 \sim 10^4 \text{ MeV}^2 \sim 10^{17} \text{ Gauss}$	
	<small>from D.Kharzeev (Nov. 5-6, 2008, in Dubna, "NICA round table" 3)</small>	

Рис. 2.11. Характерные напряженности магнитного поля в природных объектах.

time

1970'



Relativistic Ion Facilities from Synchrotron and AGS to NICA and FAIR

Over the last 30 years a lot of efforts have been made to provide the conditions for searching for new states of strongly interacting matter under extreme conditions.

Synchrotron: $E_{lab} \sim 4.2 \text{ AGeV}$ ($\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$)
1971 - 1999, pioneer experiments in the field of relativistic nuclear physics.

AGS: $E_{lab} \sim 11 \text{ AGeV}$ ($\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ GeV}$)
1986 - 1992, study of compressed baryonic matter.



1986'



SPS: $E_{lab} \sim 158 \text{ AGeV}$ ($\sqrt{s_{NN}} = 18 \text{ GeV}$)
1986- up to now,
study of compressed baryonic matter.

1996'

RHIC: $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ ($E_{lab} \sim 80000 \text{ AGeV}$)
1996 - up to now,



2008'

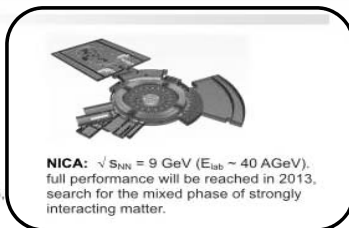


LHC: $\sqrt{s_{NN}} = 5520 \text{ AGeV}$ ($E_{lab} \sim 6.1 \cdot 10^7 \text{ AGeV}$)
2008 - planned

2015'



SIS 300 (FAIR): $E_{lab} \sim 34 \text{ AGeV}$
($\sqrt{s_{NN}} = 8.5 \text{ GeV}$).
full performance will be reached in 2015,
study of compressed baryonic matter.



NICA: $\sqrt{s_{NN}} = 9 \text{ GeV}$ ($E_{lab} \sim 40 \text{ AGeV}$).
full performance will be reached in 2013,
search for the mixed phase of strongly
interacting matter.

Рис. 2.12. Инструменты для релятивистской ядерной физики (или физики релятивистских тяжелых ионов): от Синхрофазотрона ОИЯИ до LHC (ЦЕРН), НИКА (ОИЯИ), FAIR (GSI).

Т. о. главные темы исследований в области тяжелых ионов высоких энергий в настоящее время представляются следующими:

- исследование свойств адронов в ядерной и плотной барионной (адронной) среде,
- определение уравнения состояния адронной материи,
- поиск фазовых переходов и возможной КХД-критической точки (или точек),

- свойства ядерной (адронной) материи при высоких плотностях вещества и энергии,
- поиск возможных сигналов деконфайнмента и/или восстановления киральной симметрии,
- исследование электродинамических явлений в сверхсильных электромагнитных полях, возникающих при столкновениях тяжелых ядер.

Можно с уверенностью утверждать, что экспериментальное изучение в ядро-ядерных столкновениях горячей и плотной, сильно взаимодействующей материи с поиском сигналов о смешанной фазе и критической точке (или точках) будет в ближайшие десятилетия главным стратегическим направлением в физике тяжелых ионов высоких энергий и физике элементарных частиц.

Это направление естественным образом выросло из исследований, начатых в ОИЯИ еще на Синхрофазотроне (рис. 2.12) и продолжающихся в других центрах.