

На правах рукописи

Бердников Александр Ярославич

**ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ЛЕГКИХ И ОЧАРОВАННЫХ АДРОНОВ В
ЭФФЕКТИВНЫХ КВАРКОВЫХ МОДЕЛЯХ**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2004

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего и профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (ГОУ ВПО “СПбГПУ”)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Иванов Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Фильков Лев Васильевич

доктор физико-математических наук,
профессор Нестеров Михаил Мефодьевич

Ведущая организация: Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова РАН

Защита состоится 19 января 2005 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, корпус 2, ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан 18 декабря 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.05
доктор физико-математических наук
профессор



Титовец Ю.Ф.

Актуальность работы

Квантовая хромодинамика (КХД) – современная теория сильных взаимодействий – хорошо описывает взаимодействия адронов на языке кварков и глюонов при высоких и сверхвысоких энергиях, т.е. там, где применимо описание взаимодействий по теории возмущений. В области низких энергий взаимодействия, где теория возмущений неприменима, КХД аппроксимируют эффективными кварковыми моделями с киральной симметрией.

Использование вышеупомянутых моделей является весьма успешным для описания процессов распада адронов, а также упругого и неупругого рассеяния адронов при низких и средних энергиях взаимодействия. Эффективные кварковые модели оказались очень полезными и при описании процессов высокоэнергетического взаимодействия тяжелых ядер в связи с теоретическим изучением нового состояния вещества – кварк-глюонной плазмы (КГП).

Построение эффективных кварковых моделей с минимальным числом феноменологических параметров является актуальной проблемой современной физики адронов. В настоящей работе эта проблема исследуется на примере:

- описания нелептонных четырехчастичных распадов Λ_c^+ -гиперона, которое включает расчет вероятности рассматриваемых процессов и определение поляризации Λ_c^+ -гиперона по энергетическому и угловому распределению продуктов реакций;
- расчета сечений реакций рождения странностей $p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+$ и $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ вблизи порогов и зависимости этих сечений от поляризаций сталкивающихся протонов и дочерних гиперонов;
- вычисления множественности Λ^0 -гиперонов, рожденных из кварк-глюонной плазмы, в зависимости от поляризации Λ^0 -гиперонов;
- вычисления относительных множественностей рождения адронов из кварк-глюонной плазмы в предположении полностью термализованной КГП.

Цель работы:

1. Теоретическое предсказание степени поляризации очарованных Λ_c^+ -гиперонов по продуктам четырехчастичных нелептонных распадов для анализа возможных механизмов рождения Λ_c^+ -гиперонов в высокоэнергетических ядерных реакциях в рамках проекта ФЕНИКС Брукхейвенской Национальной Лаборатории США.

2. Разработка механизма рождения странных барионов, имитирующего вклад промежуточных нуклонных резонансов, вблизи порога конечных состояний в протон-протонных столкновениях.

Теоретическое предсказание степени поляризации странных барионов в зависимости от поляризации взаимодействующих протонов для анализа возможных механизмов рождения странных барионов в реакциях тяжелых ионов при средних и высоких энергиях.

3. Теоретическое предсказание степени поляризации странных Λ^0 -гиперонов, рожденных из кварк-глюонной плазмы, для диагностики промежуточных состояний в процессах ультррелятивистских столкновений тяжелых ионов.

4. Теоретическое предсказание множественностей адронов, рожденных из кварк-глюонной плазмы в термодинамическом равновесии, в рамках коалесцентной модели коррелированных кварков для анализа экспериментальных данных на SPS CERN и RHIC BNL USA.

Научная новизна работы:

1. Впервые вычислены матричные элементы кварковых токов между адронными состояниями с нефакторизованными барионными и мезонными степенями свободы, определяющими вероятности четырехчастичных распадов $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+ \pi^0$ неполяризованных и поляризованных Λ_c^+ -гиперонов. Доказана доминантность промежуточного вакуумного состояния. Результаты расчета не

содержат новых феноменологических параметров, по сравнению с теми, что были использованы для описания 3х-частичного распада $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+$.

2. Впервые для описания рождения странных барионов в протон-протонных столкновениях при пороговых энергиях конечных состояний предложен механизм, основанный на перерассеянии протонов в начальном состоянии, имитирующий вклад в амплитуду рассеяния бесконечной совокупности нуклонных резонансов. Результаты расчета не содержат феноменологических параметров.

3. Впервые поляризационные свойства Λ^0 -гиперонов, рожденных из кварк-глюонной плазмы, исследованы с помощью релятивистских кварковых операторов Вигнера. Результаты расчета, выполненные в рамках эффективной кварковой модели с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией и кварк-глюонной теории переноса, не содержат феноменологических параметров.

4. Впервые для описания рождения адронов из термализованной КГП предложена коалесцентная модель коррелированных кварков, описывающая с помощью 6 феноменологических параметров все доступные экспериментальные данные по относительным множественностям рождения легких адронов в экспериментах SPS CERN и RHIC BNL USA (21 процесс).

Научная и практическая значимость

Полученные результаты могут найти практическое применение в таких разделах физики, как квантовая теория поля, физика высоких энергий, физика атомного ядра и элементарных частиц, а также при интерпретации экспериментальных данных, получаемых в настоящее время на крупнейших ускорителях мира. Результаты работы необходимы для:

- проектирования экспериментов по исследованию ультрарелятивистских столкновений тяжелых ионов с целью поиска и исследования кварк-глюонной плазмы;

- экспериментальных исследований механизма рождения странных мезонов и барионов в протон-протонных столкновениях вблизи порога;

- планирования экспериментов коллаборации DEAR во Фраскати (Италия) по измерению сдвигов и уширений основного состояния каонного дейтерия;

- дальнейшего развития эффективных кварковых моделей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Возможно построение кварковой модели с очарованным кварком на основе модели Намбу-Джона-Лазинио с линейной реализацией киральной $U(3) \times U(3)$ симметрии, позволяющей рассчитывать трех- и четырехчастичные распады Λ_c^+ -гиперонов только с одним дополнительным феноменологическим параметром, по сравнению с тем количеством, что было использовано для описания сильных взаимодействий неочарованных адронов.

2. Для изучения поляризации Λ_c^+ -гиперонов, полученных в реакциях высокоэнергетического фото- и адророждения, неэффективно использовать анализ продуктов 4х-частичных нелептонных распадов, по сравнению с более эффективным анализом 3х-частичных нелептонных распадов Λ_c^+ -гиперонов.

3. Учёт перерасеяния протонов в начальном состоянии околопорогового рождения странных барионов в реакциях протон-протонных столкновений: 1) эквивалентен учёту бесконечного числа нуклонных резонансов; 2) позволяет описывать экспериментальные данные по сечениям реакций $p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+$ и $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ без феноменологических параметров.

4. Поляризационные свойства Λ^0 -гиперонов, рождённых из кварк-глюонной плазмы, определяются поляризацией только валентного странного кварка и хорошо описываются эффективной кварковой моделью с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией.

5. Λ^0 -гипероны рождаются из кварк-глюонной плазмы полностью деполаризованными.

6. Теоретические отношения множественностей адронов, вычисленные в рамках коалесцентной модели коррелированных кварков, хорошо описывают

все доступные экспериментальные данные (21 результат), полученные на SPS и RHIC.

7. Глюонный вклад играет важную роль в процессе рождения барионов и антибарионов из кварк-глюонной плазмы.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры “Экспериментальная ядерная физика” СПбГПУ, в лаборатории релятивистской ядерной физики ПИЯФ им. Б.П. Константинова РАН, а также на следующих международных конференциях:

- 3rd Budapest Winter School On Heavy Ion Physics (RHIC School 03)
8-10 December, 2003, Budapest, Hungary
- Triangle Seminar, 2003, November 29, Vienna, Austria

Содержание и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 136 страниц машинописного текста, в том числе 2 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 252 наименования.

Краткое содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы и сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание разделов диссертации.

В первой главе рассмотрена четырехчастичная мода слабого нелептонного распада очарованного Λ_c^+ -бариона: $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+ + \pi^0$. По сравнению

с другими четырехчастичными модами распада Λ_c^+ , данная является наиболее подходящей для экспериментального изучения, но она сложна для теоретического расчета в связи с невозможностью полной факторизации барионных и мезонных степеней свободы. Эта проблема может быть решена в рамках эффективной кварковой модели с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией, объединяющей Эффективную Теорию Тяжелых Кварков (HQET) и расширенную модель Намбу-Джона-Лазинио (ENJL).

В данной главе показано, что результаты расчета вероятности распада $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+ + \pi^0$ относительно $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+$

$$B(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+ \pi^0 / \Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+) = 0.87$$

хорошо согласуются с экспериментальными данными

$$B(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+ \pi^0 / \Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+)_{\text{экс}} = (0.68 \pm 0.27).$$

Хотелось бы подчеркнуть, что вероятность $B(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+ \pi^0 / \Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+)$ не содержит свободных параметров. Следовательно, подобное согласие теоретического и экспериментального значений свидетельствует о правильности выбранного способа описания низкоэнергетической динамики сильных взаимодействий.

Теоретическое угловое распределение вероятности процесса $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+ + \pi^0$ предсказывает довольно слабую поляризацию очарованного бариона Λ_c^+ в зависимости от энергетических параметров продуктов распада. Практически полная изотропия дифференциальной вероятности распада поляризованного Λ_c^+ -гиперона $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+ + \pi^0$ может быть объяснена большим количеством продуктов распада, орбитальное движение которых экранирует поляризацию Λ_c^+ -гиперона. Это означает, что для экспериментального исследования поляризационных свойств Λ_c^+ , рожденных в реакциях фото- и адророждения, трехчастичная мода распада $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+$

выглядит более предпочтительной, по сравнению с четырехчастичной модой $\Lambda_c^+ \rightarrow p + K^- + \pi^+ + \pi^0$.

Во второй главе рассматривается рождение странных барионов $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ в протон-протонных столкновениях вблизи порога конечных состояний. Рассчитаны эффективные Лагранжианы переходов $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ в приближении однопионного обмена и в главном порядке разложения по импульсам частиц конечного состояния pYK^+ (Y – это Λ^0 или Σ^0). Дано количественное обоснование однопионного обмена. На основе этих лагранжианов рассчитаны сечения реакций $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ и проведено сравнение результатов с экспериментальными данными.

Теоретические сечения реакции $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ хорошо согласуются с экспериментальными данными (см. Табл. 1). Показано, что для избыточной энергии ε ($\varepsilon = 2\sqrt{\vec{p}^2 + M_p^2} - M_p - M_\Lambda$, где \vec{p} - относительный импульс сталкивающихся протонов) в диапазоне $0.68 \text{ МэВ} \leq \varepsilon \leq 6.68 \text{ МэВ}$ сечение пропорционально ε^2 , $\sigma^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon) = (4.5 \pm 0.1)\varepsilon^2$ нбарн. Это хорошо согласуется с экспериментальным сечением $\sigma^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon) = (4.4 \pm 0.7)\varepsilon^2$ нбарн. Сечение реакции $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ также известно из экспериментов для более высоких избыточных энергий:

$$\sigma_{\text{экс}}^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 8.6 \text{ МэВ}) = (264 \pm 20) \text{ нбарн},$$

$$\sigma_{\text{экс}}^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 10.9 \text{ МэВ}) = (392 \pm 33) \text{ нбарн},$$

$$\sigma_{\text{экс}}^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 13.2 \text{ МэВ}) = (534 \pm 47) \text{ нбарн}.$$

Полученные теоретические предсказания для этих энергий таковы:

$$\sigma_{\text{теор}}^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 8.6 \text{ МэВ}) = (298 \pm 6) \text{ нбарн},$$

$$\sigma_{\text{теор}}^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 10.9 \text{ МэВ}) = (444 \pm 9) \text{ нбарн} \text{ и}$$

$$\sigma_{\text{теор}}^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 13.2 \text{ МэВ}) = (604 \pm 12) \text{ нбарн}.$$

В рамках использованного в диссертации подхода теоретическое сечение при $\varepsilon = 138$ МэВ $\sigma^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 138 \text{ МэВ}) = (13.2 \pm 0.3)$ мкбарн для реакции $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ согласуется с экспериментальным сечением $\sigma^{pp \rightarrow p\Lambda K^+}(\varepsilon = 138 \text{ МэВ}) = (12 \pm 0.4)$ мкбарн. В среднем точность совпадения теоретического описания сечения реакции $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и экспериментальных данных примерно 11%.

Таблица 1. Сечения реакции $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ для избытка энергии в диапазоне $0.68 \text{ МэВ} \leq \varepsilon \leq 6.68 \text{ МэВ}$.

ε (МэВ)	$\Omega_{p\Lambda K^+}(\varepsilon)$	$\sigma_{p\Lambda K^+}(\varepsilon)$ (нбарн)	$\sigma_{p\Lambda K^+}(\varepsilon)/\varepsilon^2$ (нбарн/МэВ ²)	$\sigma_{p\Lambda K^+}(\varepsilon)_{\text{эксн}}$ (нбарн)	$\sigma_{p\Lambda K^+}(\varepsilon)_{\text{эксн}}/\varepsilon^2$ (нбарн/МэВ ²)
0.68	0.516	1.8 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.1 ± 0.2	4.54
1.68	0.605	13.2 ± 0.3	4.7 ± 0.1	13.4 ± 0.7	4.75
2.68	0.616	34.1 ± 0.7	4.8 ± 0.1	36.6 ± 2.6	5.10
3.68	0.609	63.6 ± 1.2	4.7 ± 0.1	63.0 ± 3.1	4.65
4.68	0.594	100.3 ± 1.9	4.6 ± 0.1	92.2 ± 6.5	4.21
5.68	0.577	143.5 ± 2.8	4.5 ± 0.1	135 ± 11	4.18
6.68	0.560	192.6 ± 3.7	4.3 ± 0.1	164 ± 10	3.68
			4.5 ± 0.1		4.4 ± 0.7

Сечение реакции $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$, вычисленное в рамках данного подхода, также хорошо описывает экспериментальные данные. Теоретические значения сечения (см. Табл. 2) находятся в хорошем согласии с экспериментом как для всех избыточных энергий в интервале $0.68 \text{ МэВ} \leq \varepsilon \leq 6.68 \text{ МэВ}$, так и при $\varepsilon = 138 \text{ МэВ}$.

$$\sigma_{\text{теор}}^{pp \rightarrow p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon = 138 \text{ МэВ}) = (0.72 \pm 0.08) \text{ мкбарн},$$

$$\sigma_{\text{эксн}}^{pp \rightarrow p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon = 138 \text{ МэВ}) = (1.0 \pm 0.5) \text{ мкбарн}.$$

В использованном в работе подходе увеличение сечения реакции $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ по отношению к сечению реакции $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ полностью

является следствием унитарной симметрии. Фактически, константа связи $g_{p\Sigma^0 K^+}$ меньше константы связи $g_{p\Lambda K^+}$ в 6.25 раза ($g_{p\Sigma^0 K^+} = 0.16 \times g_{p\Lambda K^+}$).

Таблица 2. Сечение реакции $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ для избытка энергии в диапазоне $0.68 \text{ МэВ} \leq \varepsilon \leq 6.68 \text{ МэВ}$.

ε (МэВ)	$\Omega_{p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon)$	$\sigma_{p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon)$ (нбарн)	$\sigma_{p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon)/\varepsilon^2$ (нбарн/МэВ ²)	$\sigma_{p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon)_{\text{эксн}}$ (нбарн)	$\sigma_{p\Sigma^0 K^+}(\varepsilon)_{\text{эксн}}/\varepsilon^2$ (нбарн/МэВ ²)
0.68	0.515	0.11 ± 0.01	0.23 ± 0.03	0.14 ± 0.06	0.29 ± 0.14
1.68	0.603	0.80 ± 0.10	0.27 ± 0.03	0.73 ± 0.34	0.26 ± 0.12
2.68	0.613	2.00 ± 0.25	0.28 ± 0.03	1.67 ± 0.77	0.23 ± 0.11
3.68	0.605	3.71 ± 0.46	0.28 ± 0.03	2.87 ± 1.32	0.21 ± 0.10
4.68	0.590	5.85 ± 0.72	0.27 ± 0.03	4.26 ± 1.97	0.20 ± 0.09
5.68	0.572	8.36 ± 1.03	0.26 ± 0.03	5.83 ± 2.69	0.18 ± 0.08
6.68	0.555	11.29 ± 1.38	0.25 ± 0.03	7.53 ± 3.47	0.17 ± 0.08
			0.26 ± 0.03		0.22 ± 0.11

В отличие от других теоретических подходов к механизму рождения $\Lambda^0 K^+$ и $\Sigma^0 K^+$ в pp столкновениях, суммарный вклад барионных резонансов аппроксимируется амплитудой перерасеяния протонов в начальном состоянии.

Следует отметить, что в подходе, использованном в работе, дочерний протон и Λ^0 -гиперон, также как и дочерний протон и Σ^0 -гиперон находятся в синглетном спиновом состоянии. Это означает, что направление спина Λ^0 и Σ^0 -гиперонов строго противоположно направлению спина дочернего протона. Таким образом, при измерении поляризации дочернего протона однозначным образом измеряется поляризация Λ^0 и Σ^0 -гиперонов. Конечно, это является верным только для избыточных энергий, близких к порогу возникновения конечных состояний $p\Lambda^0 K^+$ и $p\Sigma^0 K^+$. Для избыточных энергий, когда вклад триплетного состояния $p\Lambda^0$ и $p\Sigma^0$ систем становится заметным, поляризации Λ^0 и Σ^0 -гиперонов уже определены не так строго.

Поляризационные свойства странных барионов, образующихся в реакциях $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ вблизи порога конечных состояний $p\Lambda^0K^+$ и $p\Sigma^0K^+$, проанализированы в зависимости от энергий сталкивающихся протонов.

Важным результатом главы является теоретическое предсказание появления поляризованных странных барионов в реакциях $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ только в 3S_1 спиновых состояниях пар $(p\Lambda)$ и $(p\Sigma^0)$. Согласованность полных сечений реакций $p+p \rightarrow p+\Lambda^0+K^+$ и $p+p \rightarrow p+\Sigma^0+K^+$ в случае неполяризованных барионов с экспериментальными данными является важным фактором надежности полученных результатов для поляризованных барионов.

В третьей главе проанализированы поляризационные свойства Λ^0 -гиперонов, рожденных из КГП. Получено их импульсное распределение на языке матричных элементов релятивистских операторов Вигнера. Матричные элементы этих операторов рассчитывались в рамках Эффективной кварковой модели с $U(3) \times U(3)$ киральной симметрией и Кварк-глюонной теории переноса. В главе показано, что для Λ^0 -гиперонов, рожденных из КГП в состоянии близком к термодинамическому равновесию, импульсные распределения могут быть представлены в виде интегралов по поверхности вымораживания, когда кварковые функции распределения могут быть взяты в форме функции распределения Ютнера с гидродинамической скоростью $U(x)$, кварковым химическим потенциалом $\mu(x)$ и температурой $T(x)$, зависящими от пространственно-временной координаты x . Также обосновано, что без решения кварк-глюонных уравнений переноса для параметров $U(x)$, $\mu(x)$ и $T(x)$, множественность Λ^0 -гиперонов не зависит от поляризации. Это означает, что Λ^0 -гипероны неполяризованы, когда они рождаются из КГП, находящейся в состоянии близком к термодинамическому равновесию.

Так как хорошо известно, что в ядерных реакциях при высоких энергиях продуцируемые Λ^0 - гипероны сильно поляризованы, то полученная деполяризация Λ^0 - гиперонов в КГП может служить в качестве дополнительного признака кварк-глюонной плазмы.

В подходе, использованном в настоящей работе, множественность Λ^0 - гиперонов определяется только s -кварками. Таким образом, в этом приближении поляризационные свойства Λ^0 - гиперонов полностью определяются спином s -кварка. Это утверждение согласуется с моделью Деграна-Миттинена. Такое согласие свидетельствует о правильности применения релятивистских кварковых операторов Вигнера и Эффективной кварковой модели с $U(3) \times U(3)$ киральной симметрией для анализа рождения барионов из КГП.

В четвертой главе рассмотрено описание кварк-глюонной плазмы как термализованной кварк-глюонной системы. Рассмотрена адронизация термализованной КГП на основе коалесцентной модели коррелированных кварков и антикварков. Входными параметрами модели являются пространственные объемы адронизации легких мезонов, барионов и антибарионов, определяемые, соответственно, тремя безразмерными параметрами C_M , C_B , и $C_{\bar{B}}$. Показано, что при температуре $T = 175$ МэВ предсказанные величины отношений множественностей частиц находятся в хорошем согласии с результатами экспериментов, выполненных NA44, NA49, NA50 и WA97 международными коллаборациями по исследованию $Pb + Pb$ столкновений при энергии 158 ГэВ/нуклон, NA 35 коллаборацией по исследованию $S + S$ столкновений и NA38 коллаборацией по изучению $O + U$ и $S + U$ столкновений при энергии 200 ГэВ/нуклон. В главе также показано, что коалесцентная модель коррелированных кварков, описывающая кварк-глюонную плазму в виде термализованной кварк-глюонной системы, в целом хорошо аппроксимирует последние экспериментальные данные по реакциям $Au + Au$, осуществляемым на RHIC.

Увеличение величин отношений множественностей $\frac{\bar{p}}{p}$, $\frac{\bar{\Lambda}}{\Lambda}$ и $\frac{\bar{E}}{E}$ по сравнению с

результатами, полученными при более низких энергиях, может быть объяснено вкладом глюонных степеней свободы, который предполагается универсальным для всех множественностей адронов, рожденных из КГП. Благодаря глюонному вкладу предсказывается увеличение отношения для $\bar{\Omega}$ и Ω . Для расчета величины отношения множественностей $\frac{K^+}{K^-}$ можно допустить, что K -мезоны рождаются из КГП, в основном, вследствие сильных распадов, таких, как $K^{*+} \rightarrow K^+ \pi^-$ и $\phi \rightarrow K^+ K^-$. Полученный результат $\frac{K^+}{K^-} = 1.36 \pm 0.06$ свидетельствует, что использованная модель находится в согласии с экспериментальными данными. Предполагая, что π -мезоны, также как и K -мезоны рождаются в столкновениях тяжелых ионов из КГП фазы вследствие сильных распадов мезонных и барионных резонансов, можно получить величины отношений множественностей, согласующиеся с теми, которые были вычислены в данной работе без учета глюонного вклада. Это означает, что глюонный вклад играет важную роль только для рождения барионов и антибарионов из КГП.

В заключении изложены основные результаты и выводы проведенных исследований.

Результаты:

1. Вычислены вероятность и **угловое распределение** четырехчастичного нелептонного распада $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^0$ Λ_c^+ -гиперона в зависимости от его поляризации. Результаты расчета получены в рамках эффективной кварковой модели с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией, объединяющей эффективную теорию тяжелых кварков и расширенную модель Намбу-Джона-Лазинио с линейной реализацией киральной $U(3) \times U(3)$ симметрии. Результаты расчета не содержат феноменологических параметров и хорошо согласуются с экспериментальными данными.

2. Вычислены сечения реакций $p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+$ и $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ вблизи порога конечных состояний $p\Lambda^0 K^+$ и $p\Sigma^0 K^+$ в зависимости от энергии протонов в системе центра инерции и поляризации барионов. Результаты расчета не зависят от феноменологических параметров и хорошо согласуются с экспериментальными данными. Показано, что учет перерасеяний в начальном состоянии имитирует вклад бесконечного числа нуклонных резонансов.

3. Вычислено распределение по импульсам множественности Λ^0 -гиперонов, рожденных из кварк-глюонной плазмы, в зависимости от их поляризации. Вышеупомянутое распределение определяется матричными элементами релятивистских кварковых операторов Вигнера, которые вычислены в рамках эффективной кварковой модели с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией и кварк-глюонной теории переноса. Результаты расчета не зависят от феноменологических параметров и демонстрируют полное отсутствие зависимости распределения от поляризации Λ^0 -гиперонов.

4. Вычислены множественности адронов, рожденных из кварк-глюонной плазмы в термодинамическом равновесии, в рамках коалесцентной модели коррелированных кварков. Результаты расчета хорошо описывают экспериментальные данные SPS CERN и RHIC BNL USA.

Выводы.

1. Эффективная кварковая модель с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией, включающая эффективную теорию тяжелых кварков (c, b , и t) и расширенную модель Намбу-Джона-Лазинио с линейной реализацией киральной $U(3) \times U(3)$ симметрии, позволяет описывать нелептонные распады очарованных барионов без привлечения феноменологических параметров.

2. **Использование четырехчастичных мод нелептонных распадов Λ_c^+ -гиперона неэффективно для анализа поляризации Λ_c^+ -гиперонов, полученных в процессах высокоэнергичных фото- и адророждения.**

3. Учет перерасеяния протонов в начальном состоянии в протон-протонных столкновениях вблизи порога рождения странных барионов эквивалентен учету вклада бесконечного числа нуклонных резонансов. Результаты расчета не содержат феноменологических параметров и хорошо согласуются с экспериментальными данными.

4. Эффективная кварковая модель с киральной $U(3) \times U(3)$ симметрией позволяет выполнить расчет матричных элементов релятивистских кварковых операторов Вигнера, определяющих импульсное распределение множественности гиперонов, без введения феноменологических параметров при произвольной зависимости гидродинамической скорости $V(x)$, температуры $T(x)$ и химического потенциала $\mu(x)$ от пространственно-временной точки x . Результаты расчета свидетельствуют о полной деполяризации Λ^0 -гиперонов, рожденных из кварк-глюонной плазмы.

5. Полное отсутствие поляризации Λ^0 -гиперонов, рожденных из кварк-глюонной плазмы, может быть хорошим тестовым сигналом для диагностики КГП в промежуточном состоянии ультрарелятивистских столкновений тяжелых ионов на современных коллайдерах.

6. Коалесцентная модель коррелированных кварков хорошо описывает экспериментальные данные по множественному рождению адронов в экспериментах SPS CERN и RHIC BNL USA.

7. Полученное согласие между теоретическими множественностями адронов, вычисленными в рамках коалесцентной модели коррелированных кварков, с экспериментальными данными SPS CERN и RHIC BNL USA могут свидетельствовать в пользу существования кварк-глюонной плазмы в промежуточном состоянии ультрарелятивистских столкновений тяжелых ионов, реализуемых в SPS CERN и RHIC BNL USA.

Публикации.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

- 1) Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Ivanov A.N., Ivanova V.A., Kosmach V.F., Samsonov V.M., Troitskaya N.I., Thatar Vento V. Polarization Of Λ^0 Hyperons as a Signature for the Quark-Gluon Plasma// e-Print Archive: nucl-th/0312045, Dec 2003. -P.1-17
- 2) Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Ivanov A.N., Ivanova V.A., Kosmach V.F., Troitskaya, Scadron M.D. On polarization of Strange Barions In Reactions $p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+$ and $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ Near Thresholds// Eur.Phys.J.A.-2001.- V.65.- P.341-347
- 3) Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Ivanov A.N., Kosmach V.F., Scadron M.D., Troitskaya N.I. On The Polarization Properties Of The Charmed Baryon Λ_c^+ In The $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-$ Decay// Phys.Rev.D- 2001.-т. 64.- P.014027-1–014027-10
- 4) Berdnikov A.Ya, Berdnikov Ya.A, Ivanov A.N., Kosmach V.F., Scadron M.D., Troitskaya N.I. On The Reactions $p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+$ and $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ Near Thresholds// Eur.Phys.J. A.-2000.- V.9.- P.425-432
- 5) Berdnikov A.Ya, Berdnikov Ya.A, Ivanov A.N., Ivanova V.A., Kosmach V.F., Samsonov V.M., Troitskaya N.I. On The Hadron Production From The Quark Gluon Plasma Phase In Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions// FIZIKA -2003. - V.B12. P.235-256 (e-Print Archive: hep-ph/0005205.-2000.-P.1-15)
- 6) Berdnikov A.Ya, .Berdnikov Ya.A, Ivanov A.N., Ivanova V.A., Kosmach V.F., Samsonov V.M., Troitskaya N.I. On The K^+ Production From The Quark Gluon Plasma Phase In Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions// Acta Phys.Slov.-2002.- V.52.- P.143-160
7. Бердников А.Я., Бердников Я.А., Иванов А.Н., Иванова В.А., Космач В.Ф., Самсонов В.М., Троицкая Н.И. Вклад глюонов в множественности рождения адронов из кварк-глюонной плазмы в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов// Материалы научно-практической конференции и школы-семинара «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий», 18-20 июня 2002 г.- Санкт-Петербург, 2002.- т.2.- С.24-27