

Глава 5. Изменение интенсивности выхода частиц

5.1. Подавление импульсного спектра частиц в ядро-ядерных столкновениях

Одним из первых тестов проявления КГП в ядро-ядерных столкновениях был тест на сравнение с протон-протонным столкновением в импульсном спектре числа заряженных частиц. Подавление импульсного адронного спектра в центральных AuAu-столкновениях в сравнении с импульсным спектром в pp-столкновениях было открыто в AuAu-столкновениях на RHIC. Наблюдаемый эффект подавления получил название погашения струй (jet quenching) и будет также обсуждаться в главе 7.

Измеряется отношение множественности частиц в AA- и pp-соударениях. Ясно, что в столкновениях ядер число взаимодействующих нуклонов N_{part} сильно зависит от прицельного параметра и только в периферических взаимодействиях это число близко к единице. Поэтому искомое отношение делится на среднее $\langle N_{part} \rangle$.

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{part} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 N_{pp} / dp_T d\eta}.$$

Отношение R_{AA} получило название ядерного модифицированного фактора. Величина $\langle N_{part} \rangle$ вычисляется модельно зависящим способом (модель Глаубера) и флуктуирует от события к событию особенно при большом выбранном интервале центральности. Поэтому берётся среднее значение $\langle N_{part} \rangle$ (см. Приложение 1). Измеряют также модельно независящее от дополнительного измерения спектра в pp отношение спектра в AA к значениям спектра в периферическом столкновении этих же ядер:

$$R_{CP} = \frac{1}{\langle N_{part} \rangle} \frac{d^2 N_{AA}^{centr} / dp_T d\eta}{d^2 N_{pp}^{periph} / dp_T d\eta}.$$

Для жёстких процессов с рождением отдельного адрона h (кварконии J/Ψ , Y и др.), в которых множественность пропорциональна некогерентной сумме неупругих бинарных нуклонных столкновений, используется среднее значение $\langle N_{coll} \rangle$.

$$R_{AA}^h = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{d^2 N_{AA}^h / dp_T d\eta}{d^2 N_{pp}^h / dp_T d\eta}.$$

Иногда вместо $1/\langle N_{coll} \rangle$ используют величину $\sigma_{NN}/\langle T_{AA} \rangle = 1/\langle N_{coll} \rangle$ (см. приложение 1):

Для протон-ядерного столкновения pA

$$R_{pA}^h = \frac{1}{A} \frac{d^2 N_{pA}^h / dp_T d\eta}{d^2 N_{pp}^h / dp_T d\eta}.$$

При отсутствии поглощения в кварк-глюонной материи факторы R_{AA}^h и R_{pA}^h равны единице.

Физический смысл этих величин состоит в том, что они дают сравнение величины сигнала в среде КГП и в вакууме:

$$R_{AA} \propto \frac{"QCD Medium"}{"QCD Vacuum"}.$$

Ядерный модифицированный фактор R_{AA} измерялся для разных частиц на RHIC и LHC (см. рис. 5.1).

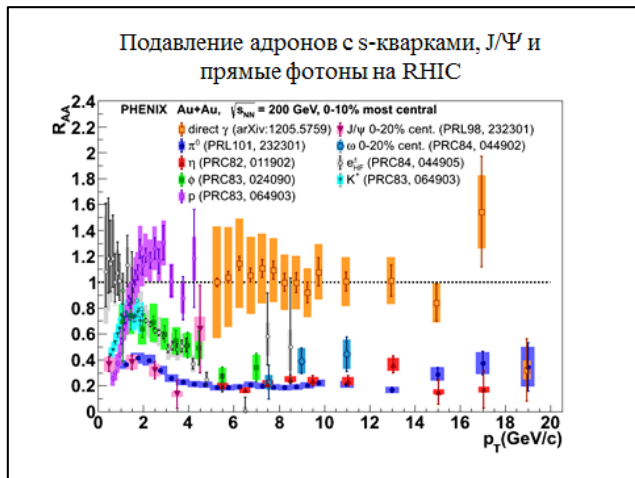


Рис. 5.1. Фактор R_{AA} для π^0 , η , ϕ , K^+ , J/Ψ -мезонов и прямых фотонов на RHIC.

При увеличении энергии столкновения от $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ ГэВ до энергий $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на RHIC и $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ на LHC ядерный модифицированный фактор уменьшается и становится до 7 раз меньше единицы (рис. 5.2).

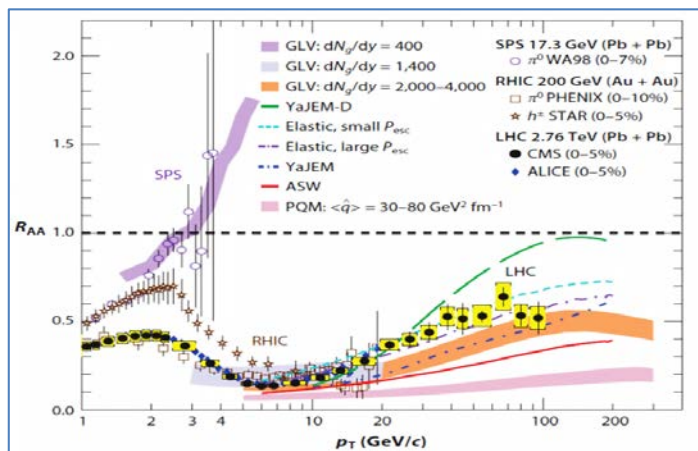


Рис. 5.2. Фактор R_{AA} для π^0 -мезонов на RHIC и для заряженных частиц на RHIC и LHC. Сравнение с некоторыми моделями при больших p_T до 100 ГэВ/с.

Причудливая форма рт-зависимости связана с изменением режима образования частиц от мягких (малые рт) к жёстким (большие рт > 5 ГэВ/с) взаимодействиям при рождении частиц.

5.2 Странные частицы

Признак КГП, предложенный Рафельски и Мюллером (Rafelski and Müller) в 1982 году [PRL, 48, 106-1069 (1982)], усиления интенсивности выхода странных частиц в столкновении ионов, если система прошла фазу деконфайнмента и произошёл переход $gg \rightarrow s\bar{s}$, был обнаружен в ряде экспериментов в АА-, рА-столкновениях (рис. 5.3, 5.4)

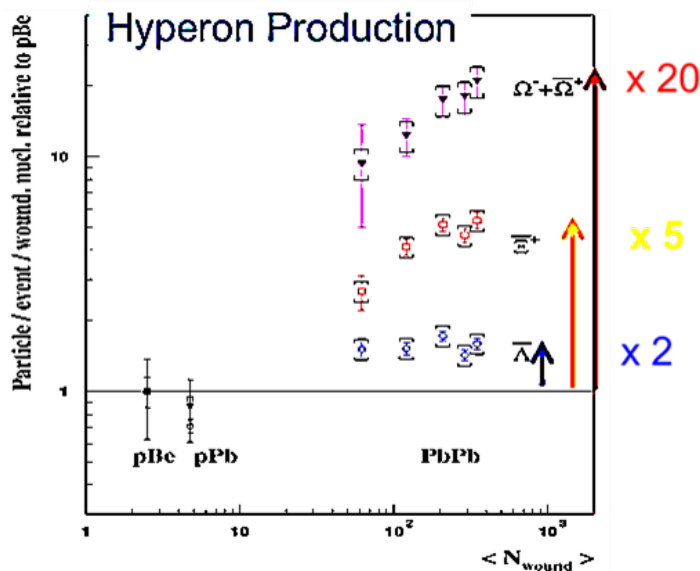


Рис.5.3. Рождение гиперонов в рНе-, рРb-, РbРb-столкновениях в зависимости от числа участвующих нуклонов при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 17$ АГэВ. Эксперимент SPS CERN. [NA57, AIP Conf. Proc. 644 (2002) 303-12].

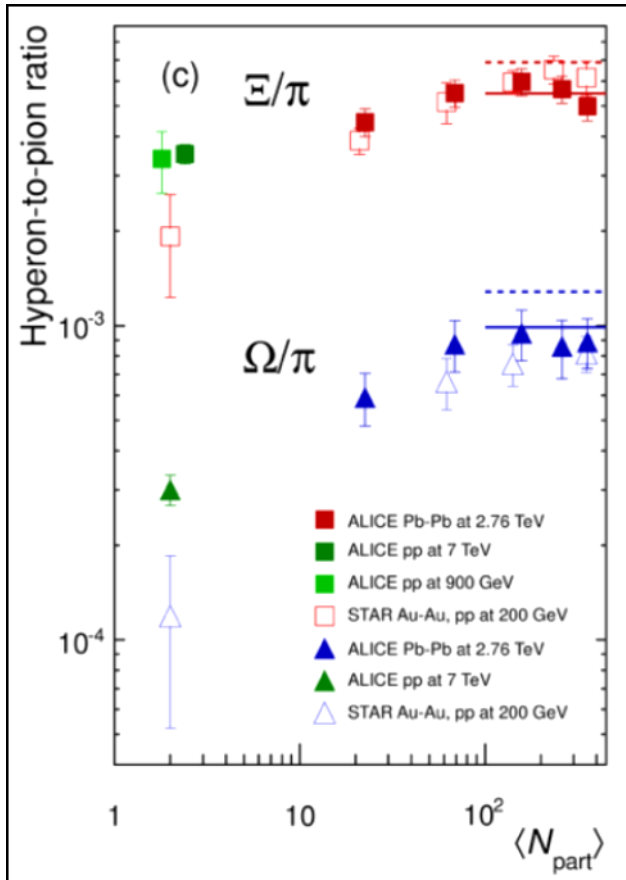


Рис. 5.4. Отношение интенсивности выхода странных гиперонов к выходу пионов для pp -при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и 7 ТэВ для PbPb при 2.76 ТэВ.
Эксперимент ALICE LHC [L. Barnby, LHC seminar 10 November 2015].

Самые «свежие» данные на LHC и сравнение с некоторыми моделями представлены на рис. 5.5.

Strangeness Enhancement pp pA AA

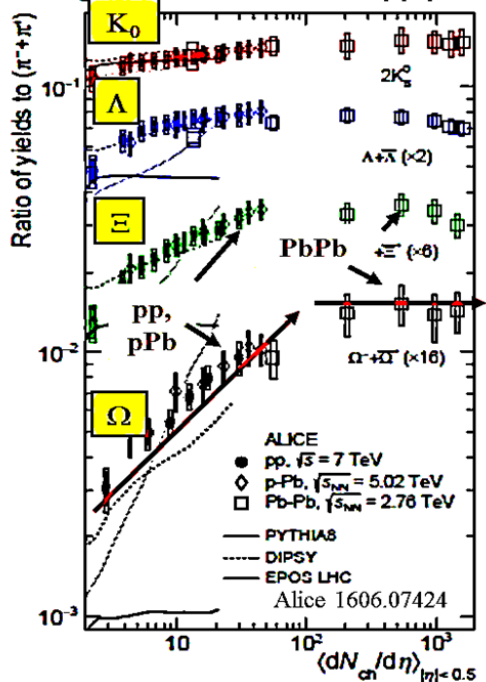


Рис. 5.5.
Отношение
интенсивности
выхода странных
гиперонов к
выходу пионов для
pp при $\sqrt{s_{NN}} = 200$
ГэВ и 7 ТэВ для
PbPb при 2.76
ТэВ. Эксперимент
ALICE LHC
[L.Barnby, LHC
seminar 10
November 2015].

5.3. Фактор ядерной модификации в pPb-столкновениях.

Как и ожидалось, фактор ядерной модификации в pPb-столкновениях при $p_T > 1$ ГэВ/с близок к единице (рис. 5.6).

Для ядро-ядерных взаимодействий фактор R_{AA} в 5 раз меньше единицы при $p_T = 4\text{--}20$ ГэВ/с, что можно объяснить сильным взаимодействием партонов в конечном состоянии при прохождении среды КГП. Для 70–80% периферических столкновений фактор R_{pPb} ближе к единице, потому что партон проходит меньшую толщину области КГП.

ALICE Collaboration, PRL 110, 082302 (2013)

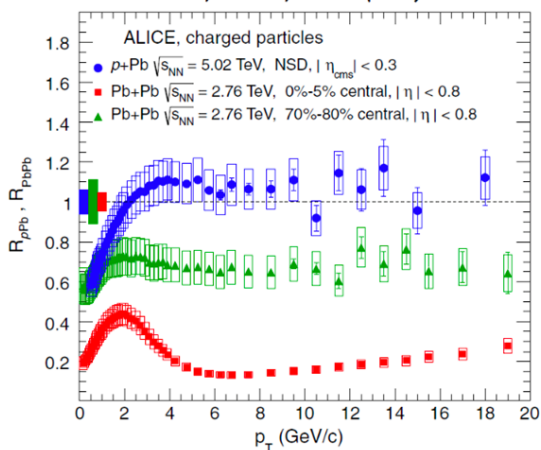


Рис. 5.6. Фактор R_{pPb} при двух значениях центральности 0 -5%, 70 -80% и R_{PbPb} для заряженных частиц. Сравнение R_{PbPb} сделано для всей области центральностей, чтобы исключить неопределённости модельного вычисления в нормировочном множителе $\langle N_{part} \rangle$ для pA-столкновений. [ALICE, Phys.Rev.Lett v.110 (2013), p.082302].

Считается, что в ядро-ядерном столкновении в начальном состоянии образуется КГП (эффект в начальном состоянии), которая имеет реальный объём, время жизни, температуру и при остывании расширяется. Поэтому часть партонов, образованных внутри КГП, теряет свою энергию и поглощается. Поэтому уменьшается интенсивность выхода частиц (эффекты в конечном состоянии). В pp- и pA-столкновениях объём области перекрытия мал и можно ожидать, что эффектов в конечном состоянии не будет. Сравнение AA и pA-результатов даст возможность разделить два механизма. Пока результат по ядерному фактору модификации R_{pA} говорит, как раз об этом. Эффекты конечного состояния при $p_T > 1$ ГэВ/с малы. Но нужно ещё учесть, что свойства КГП зависят от энергии (сравните RHIC и LHC на рис. 5.2). Проявление эффекта в конечном состоянии в pA-столкновениях может измениться при более высокой энергии.

Сравнение фактора ядерной модификации с теориями, включающими в себя зависимость длины пробега в среде КГП,

позволит в дальнейшем установить как средняя длина пробега зависит от свойств КПП таких как температура, вязкость и др.

Успешным подтверждением теоретических предсказаний о подавлении цветонейтральных частиц является измерение фактора R_{AA} для таких частиц (см. рис. 5.7).

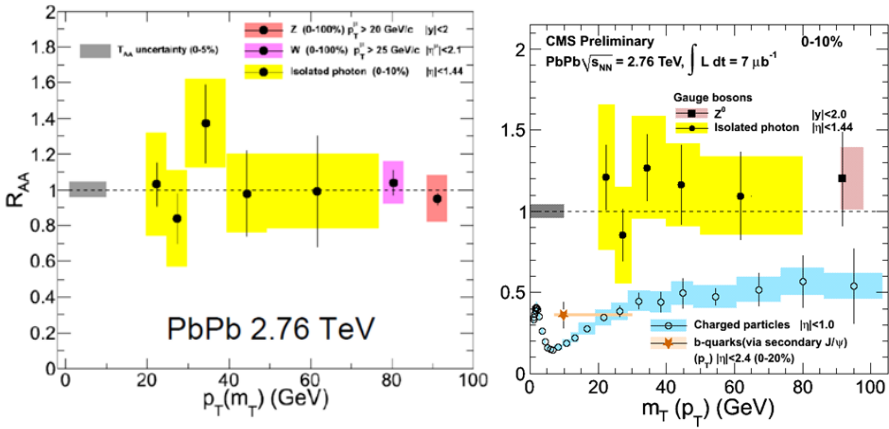


Рис. 5.7. Фактор R_{AA} для разной природы частиц, включая фотоны, Z и W бозоны. Поперечная масса частицы равна $m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$.

Изолированные (прямые) фотоны не подавляются. Адроны с тяжёлыми b -кварками подавляются, но несколько слабее, чем с лёгкими кварками. Цветонейтральные частицы (Z^0 -бозон) не подавляются.

Эффект подавления выхода частиц в центральных АА-столкновениях при $p_T > 2$ ГэВ/с и подавление выхода адронных струй (см. главу 6) – **важный сигнал, свидетельствующий о взаимодействии частиц, рождённых в жёстком партонном рассеянии, со средой с высокой энергетической плотностью.**

5.4. Деформация спектров по эффективной массе

Усиление интенсивности выхода лептонных пар малой массы около области массы ρ -мезона (рис. 5.8), потенциально указывает на восстановление киральной симметрии [см. J.Schukraft, Nucl. Phys. A967 (2017) 1, arXiv:1705.02646].

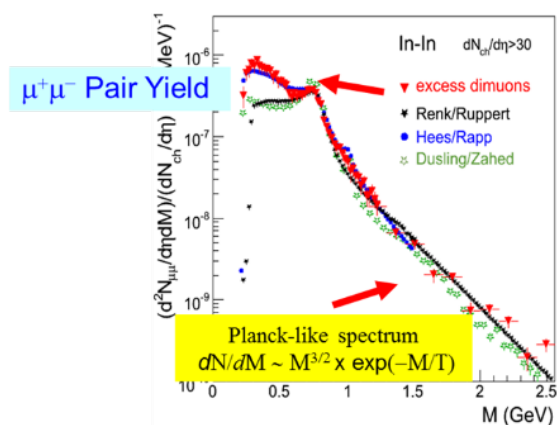


Рис. 5.8. Интенсивность рождения пары мюонов в InIn-столкновении в эксперименте NA60 CERN SPS при $\sqrt{s_{NN}} = 158$ ГэВ.

Уширение массы ρ -мезона (рис. 5.9) предсказывается при расплавлении адронов при температурах T близких к T_c в модели

восстановления киральной симметрии [P.M.Hohler and R. Rapp, Phys.Lett.B 731 (2014) 103].

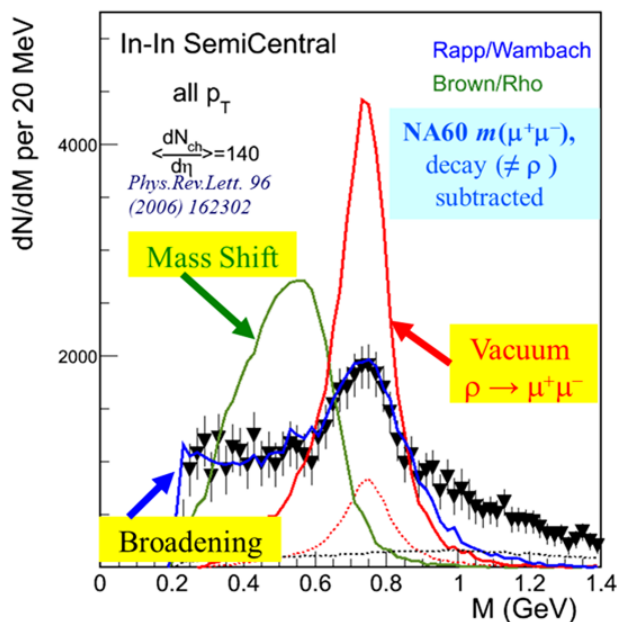


Рис. 5.9.
Распределение по эффективной массе пары мюонов в InIn-столкновении в эксперименте NA60 CERN SPS при $\sqrt{s_{NN}} = 158$ АГэВ [R.Arnaldi et al., Phys.Rev.Lett. 96(2006)162302].

Связь наблюдаемого уширения ρ -мезона в горячей адронной материи и восстановление киральной симметрии в КГП является, тем не менее, скорее гипотезой, чем твёрдым теоретическим выводом.

5.5. Загадка отношения ρ/π .

Интересное сравнение отмечено в измерении интенсивности выхода барионов по отношению к мезонам (рис. 5.10). Это отношение в ядро-ядерных столкновениях существенно

больше, чем в pp - и e^+e^- -столкновениях. Причём максимум для p/π близок к единице.

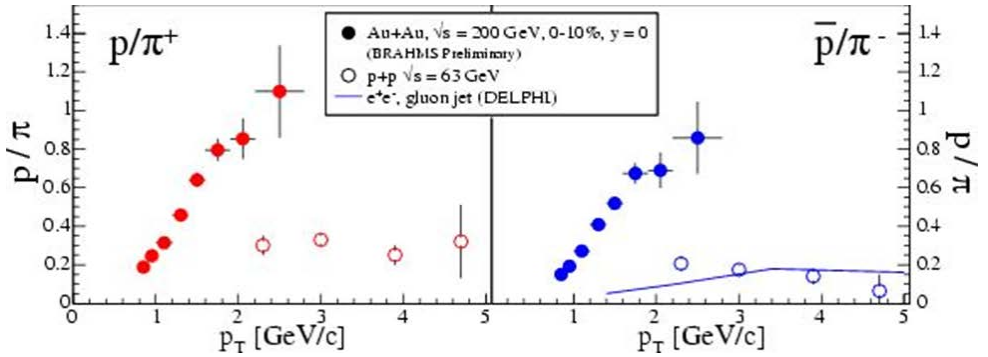


Рис. 5.10. Отношение выхода барионов к мезонам для $AuAu$ -столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и pp при $\sqrt{s_{NN}} = 63$ ГэВ/с. Сплошная линия справа данные из e^+e^- -столкновений.

В эксперименте ALICE на LHC превышение барионов над мезонами наблюдается при $p_T = 2 - 6$ ГэВ/с (рис. 5.11) и исчезает при высоких $p_T > 8$ ГэВ/с.

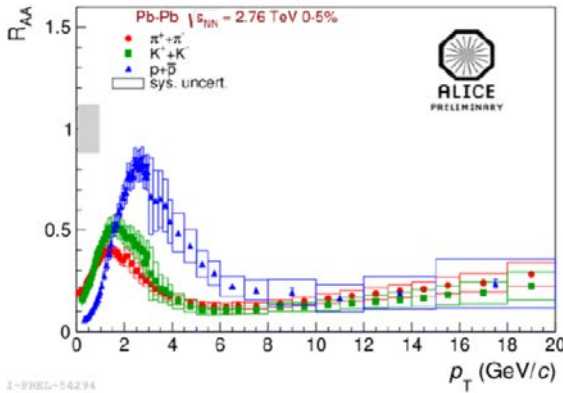


Рис. 5.11. Ядерный модифицированный фактор для идентифицированных частиц.

Отличие может быть связано с образованием КГП. Возможно также, что превышение выхода барионов связано с механизмом фрагментации на системы с двумя или тремя валентными кварками или с рекомбинацией 3-х и 2-х кварков в барион и мезон соответственно в плотной среде.

В гидродинамике единственной характеристикой является масса. Результат не должен зависеть от кваркового состава. Действительно (рис. 5.12), нестранные $p = |ddu\rangle$ и странные $\phi = |ss\rangle$ частицы дают одинаковую p_T -зависимость (с другой нормировкой). [E.V. Shuryak, arXiv:1412.8393]

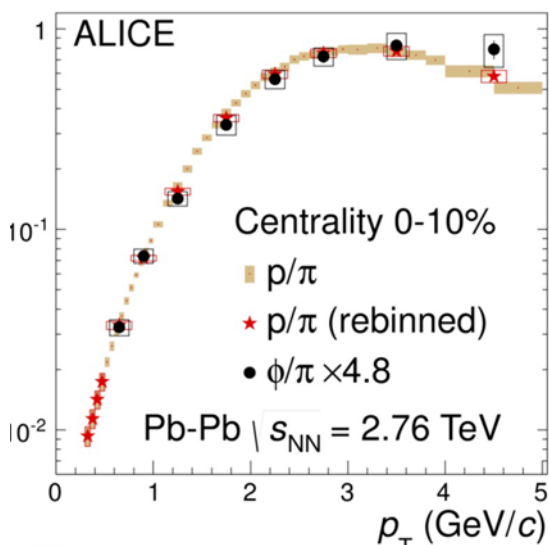


Рис. 5.12. Отношение p/π и подогнанное нормировкой отношение ϕ/π .

Исследование интенсивностей выхода частиц и их отношений остаётся важным инструментом получения информации о свойствах Кварк-глюонной материи.

Наиболее яркими результатами являются подавление выхода адронов в АА-столкновении и его отсутствие для фотонов и бозонов, а также деформация спектра в области массы ρ -мезона.