3. Термодинамическое равновесие

Принято иллюстрировать эволюцию материи после столкновения двух ядер диаграммой на рис. 3.1. Т.к. скорость частиц $v \leq c$, то эволюция материи на диаграмме представлена в двух верхних секциях координатных осей x и t. Предравновесная фаза существует при времени $t < \tau_0$, где τ_0 – момент образования КГП, затем сгусток материи переходит в состояние КГП и далее по мере расширения и остывания наступает смешанная фаза из кварков и адронов до химического замерзания, когда состав частиц перестаёт меняться. Затем адронный газ взаимодействующих адронов до кинематического замерзания, при котором уже не меняются импульсы частиц.

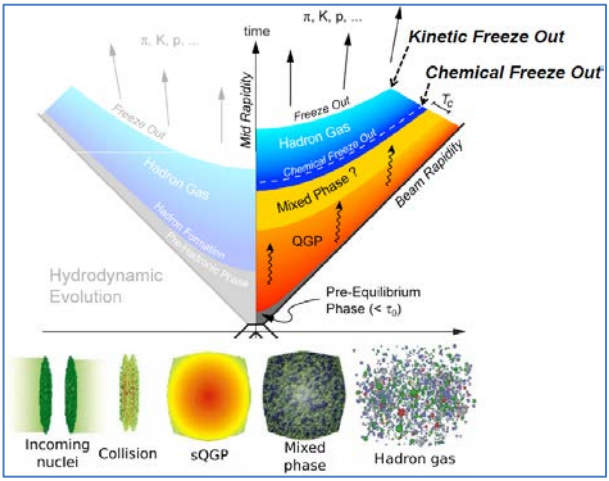

Рис. 3.1. Эволюция состояний материи во времени и пространстве. По оси ординат время ***t****, по оси абсцисс – одна из трёх (для простоты) пространственных координат.*

Экспериментальное измерение интенсивности выхода определённых частиц открывает дополнительные возможности для исследования КГП. В эксперименте ALICE на LHC изучаются выходы 13 частиц (рис. 3.2).

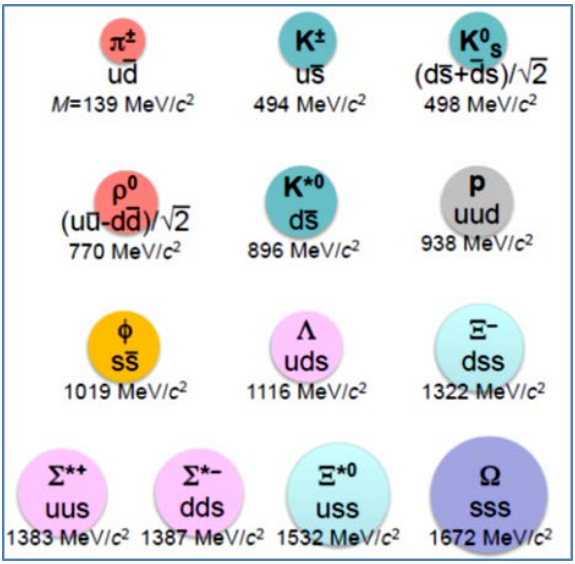

Рис. 3.2. Кварковый состав и массы частиц.

Приведём также время жизни некоторых адронных резонансов на, необходимые при анализе подавления выхода частиц (рис. 3.3).

Resonance:	ρ^0	K^{*0}	$\Sigma^{*\pm}$	$\Lambda(1520)$	Ξ^{*0}	ϕ
Lifetime (fm/*c*):	1.3	4.16	5	12.6	21.7	46.2

Рис. 3.3. Времена жизни адронных резонансов

Наиболее простой для анализа данных является статистическая модель с переменным числом частиц. Считается, что в некотором объёме образуется система N частиц, в которой за время взаимодействия успевает установиться статистическое равновесие. После установления равновесия состояния отдельных частиц системы оказываются статистически независимыми и между частицами системы отсутствуют всякие корреляции. Используя термодинамические соотношения при обобщённом уравнении состояния, можно получить подгонкой под

экспериментальные данные интенсивность выхода разных частиц. Свободными параметрами являются температура T, химический барионный потенциал μ_b, мера неполного равновесия γ_s, и объём V.

Для столкновения PbPb при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 ТэВ статистическая термальная модель даёт температуру химического замерзания равной T = 156 МэВ или 164 МэВ в зависимости от μ. (рис. 3.4).

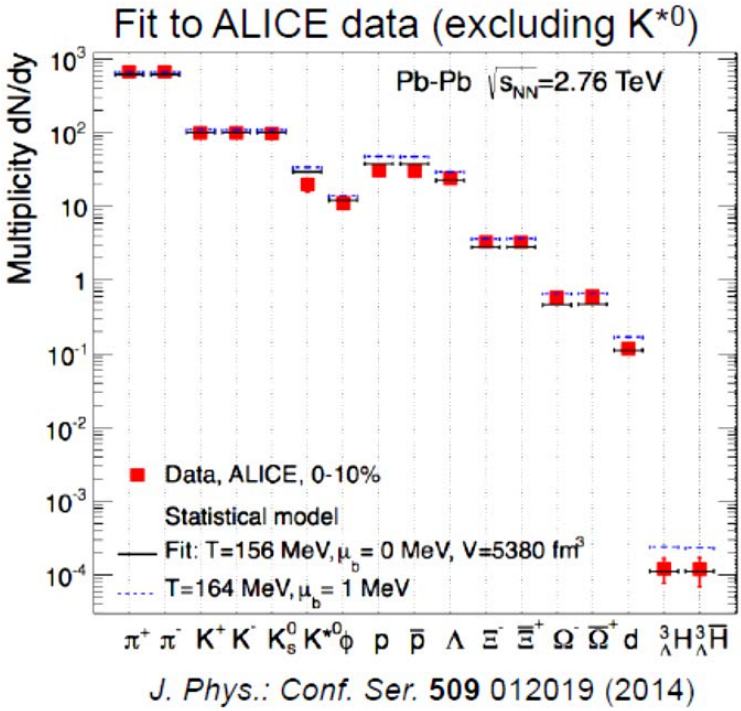

Рис. 3.4. Результаты подгонки интенсивности выхода разных частиц при фиксированном барионном химическом потенциале μ = 0 и 1 МэВ [A.G. Knospe, CERN seminar, ALICE, 14 March 2017].

Более тщательный анализ с учётом взаимодействия адронов в конечном состоянии после химического замерзания, но до кинематического остывания даёт ещё лучшее согласие подгонки термальной статистической модели к данным (рис. 3.5). При этом температура T получается равной 166 ± 3 МэВ и химический барионный потенциал μ_b = 2 ± 6 МэВ.

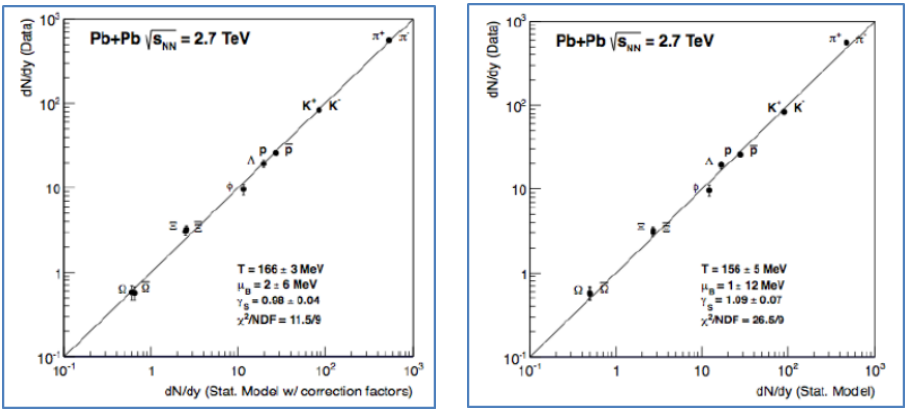

Рис. 3.5. Сравнение статистической модели без учёта (слева) и с учётом (справа) взаимодействия адронов в конечном состоянии [L. Milano, CERN-THESIS-2012-251_ALICE]. По оси абсцисс число адронов в статистической модели, по оси ординат – экспериментальные данные.

Как видно из рис. 3.5 согласие модели и эксперимента превосходное.

Соответствие выхода разного сорта частиц в эксперименте и в статистической модели говорит в пользу установления термального равновесия.

Модель устанавливает параметры равновесного газа адронов, но не даёт информации об эволюции материи до этого состояния.

Другой полезной моделью для частиц в конечном состоянии является модель взрывной волны (Blast-Wave model). Все адроны имеют общую температуру кинематического замерзания T_{kin}, степень n в спектре и радиальную скорость частиц β_T. Адронные p_T-спектры параметризуются одинаковой формулой, зависящей от масс частиц с этими параметрами [*E. Schnedermann,Phys. Rev. C 48(1993) 2462*]. Проводится единый фит (подгонка) под экспериментальные зависимости в заданных интервалах по центральности [*B. Abelev, Blast-Wave Phys.Rev. C88 (2013) 044910*].

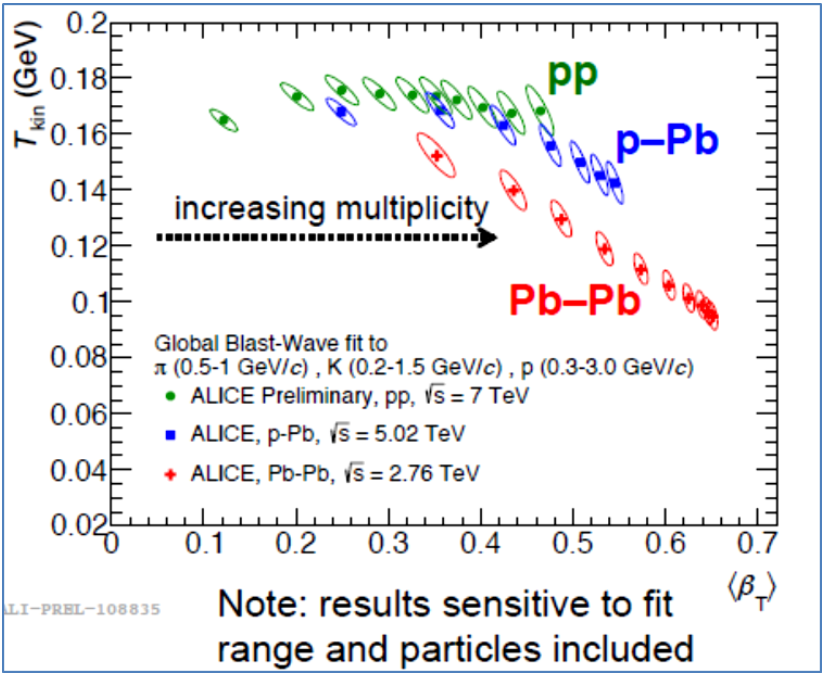

Рис. 3.6. Результат анализа в модели взрывной волны для пионов, каонов и протонов в pp-, pPb- и PbPb-столкновениях при энергиях LHC [A.G. Knospe, CERN seminar, ALICE, 14 March 2017].

С ростом центральности в PbPb-столкновении T_{kin} уменьшается, а $<\beta_T>$ увеличивается по сравнению с данными pp и pPb, что свидетельствует о зависимости параметров от образования КГП. Зависимость параметров модели взрывной волны от энергии столкновения представлена на рис. 3.7.

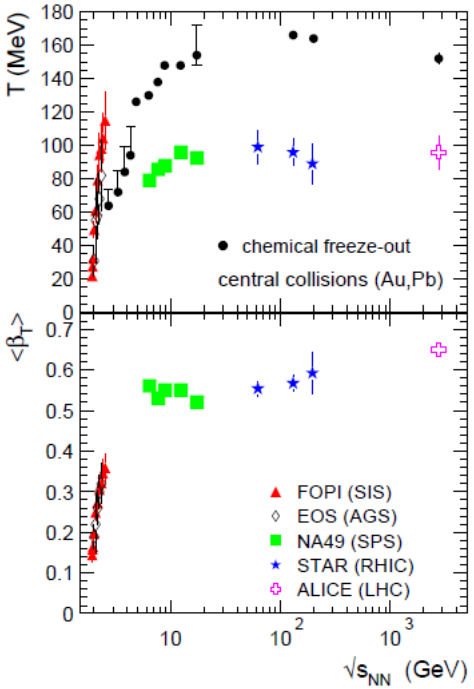

Рис.3.7.Температура T_{ch}(кружки), T_{kin}(квадраты и звёздочки) и $<\beta_T>$ средняя скорость при кинетическом замерзании в модели взрывной волны из экспериментов при разных энергиях. [A. Andronic, AIP Conf.Proc. 1498 (2012) 125, arXiv:1210.8126]

При высоких энергиях температура кинематического замерзания постоянна и на 50-60 МэВ ниже, чем температура химического замерзания.