

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ТОЛСТОКОРОВА Полина Михайловна

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ РАССЕЯНИЯ АДРОНОВ

Кафедра физики элементарных частиц

КУРСОВАЯ РАБОТА 2 КУРСА

(Подпись студента)

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,
начальник сектора ЛТФ ОИЯИ,
Теряев Олег Валерианович

(Подпись научного руководителя)

Москва - 2025

Оглавление

1.	Введение	3
2.	Описательная часть	3
2.1.	Столкновения тяжёлых ионов и NICA	3
2.2.	КГП и её свойства	4
2.3.	PHSD, температура $U_{нру}$ и ускорение	5
3.	Оценка ускорения	7
3.1.	Релятивизм и 4-векторы	7
3.2.	Применение гидродинамической формулы для ускорения	8
3.3.	Сравнение с ускорением свободного падения	8
4.	Выводы	9
5.	Ссылки на источники	10

1. Введение

В данной работе рассматриваются некоторые свойства столкновений тяжёлых ионов (ядер атомов C, Pb, Au, U...). При столкновениях тяжёлых ионов на короткое время возникает вещество в состоянии кварк-глюонной плазмы (КГП), после чего происходит адронизация - процесс, при котором из кварков и глюонов формируются адроны, вследствие конфайнмента.

Такие столкновения, в частности, планируется исследовать с помощью ускорительного комплекса NICA в Дубне. При столкновениях тяжёлых ионов на таких ускорителях, как NICA, может быть создана и исследована кварк-глюонная плазма (КГП), и фазовый переход от КГП к материи, состоящей из адронов.

В области энергий NICA достигается очень высокая плотность барионного заряда, и возможен фазовый переход 1 рода.

2. Описательная часть

2.1. Столкновения тяжёлых ионов

В работе рассматриваются упругие столкновения тяжёлых ионов. В процессе столкновения достигаются значения температур и плотности барионного заряда, при которых происходит фазовый переход первого рода, и вещество переходит в состояние кварк-глюонной плазмы. Далее происходит ускоренное расширение с понижением температуры, из-за чего происходит адронизация - процесс, при котором из кварков и глюонов формируются адроны вследствие конфайнмента.

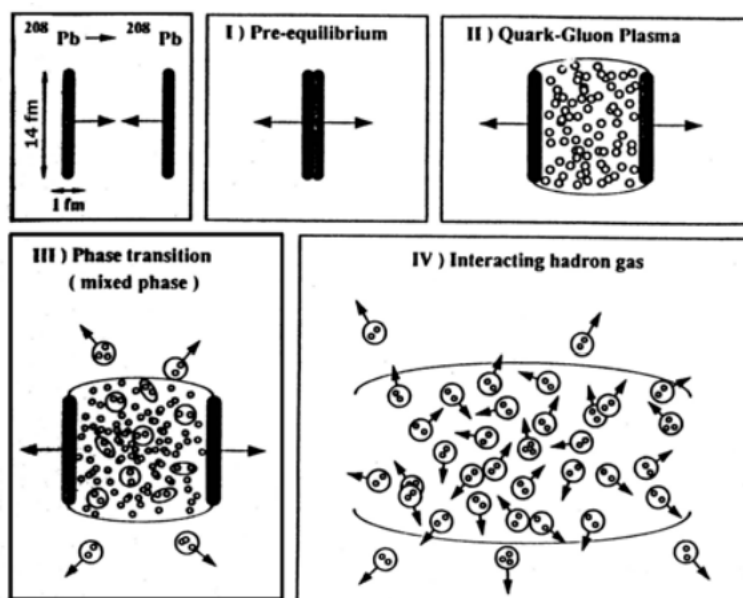


Рис.1. Из [5], Пространственно-временная картина столкновений тяжелых ионов

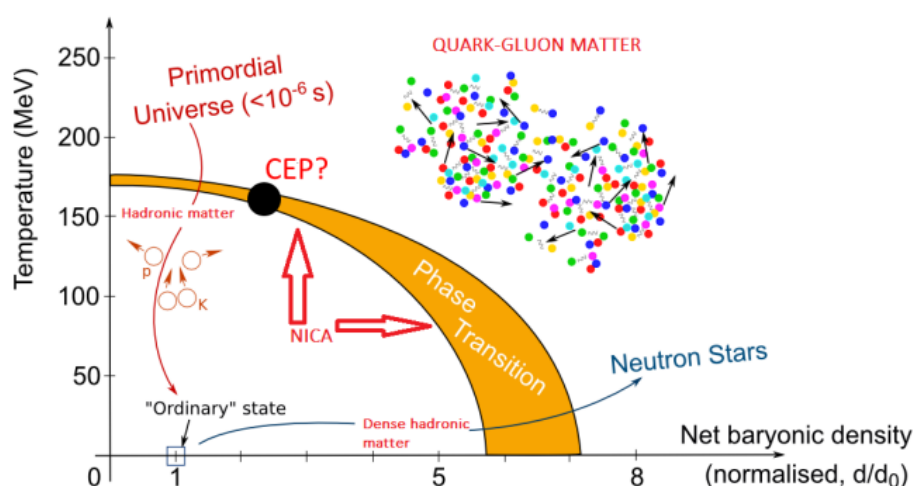


Рис.2. Из [6] Фазовая диаграмма барионной материи

2.2. КГП и её свойства

КГП - особое состояние вещества, которое достигается при чрезвычайно высоких энергиях и характеризуется разделением адронов на несвязанные кварки и глюоны (деконфайнмент). Такая материя существовала только на ранних этапах возникновения Вселенной, следовательно, исследования этого состояния вещества могут пролить свет на суть процессов, которые происходили в первые мгновения после Большого взрыва. При более низких температурах она может появиться также в ядрах/недрах нейтронных звёзд.

Эксперименты на RHIC по столкновению тяжёлых ионов показали, что партонная среда, полученная в ходе этих столкновений, по своим свойствам была похожа на идеальную жидкость. Более того, эта среда обладает максимальным достигнутым ускорением, величина которого, согласно [2]:

$$a = 1,6 \text{ ГэВ}$$

$$\text{Другая оценка [3]: } \eta_{acc} = \frac{c^2}{v_{\oplus}^2} \frac{R_{\oplus}}{R_A} \approx 10^{30}$$

При столкновениях тяжёлых ионов создаётся существенное электромагнитное поле. Недавние эксперименты показали ненулевую глобальную поляризацию гиперонов, обладающую тенденцией к уменьшению при увеличении энергии. Стоящий за этим механизм принято связывать с гидродинамикой, ставя в соответствие магнитному полю гидродинамическую завихрённость, а электрическому - ускорение.

Целью данной работы как раз и является исследование ускорения при упругом столкновении ионов.

2.3. PHSD, температура $U_{нру}$ и ускорение

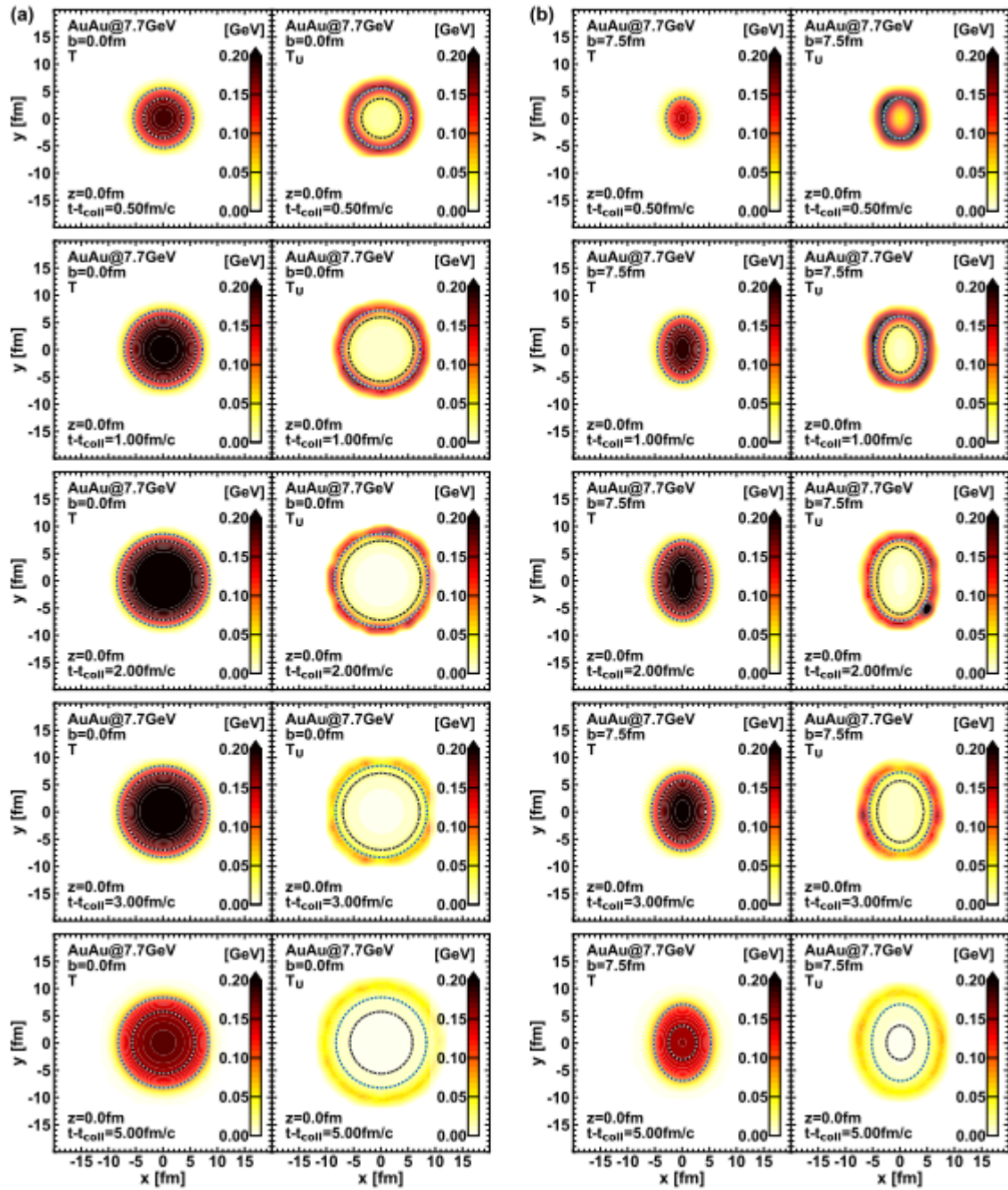


Рис.3. Из [2] Профили температуры T (первый столбец), характерной температуры Унру T_U (второй столбец) в плоскости $z = 0$, рассчитанные в разные моменты времени после столкновения для столкновений Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ. Профили T и T_U , показанные в (a), рассчитаны для центрального столкновения ($b = 0$ фм); в (b) - для нецентрального столкновения ($b = 7,5$ фм). Пунктирными кривыми показаны два контура в плоскости xu , ограничивающие среду по плотности энергии значениями $\varepsilon = 500$ МэВ/фм³ (внутренний контур) и $\varepsilon = 50$ МэВ/фм³ (внешний контур).

Так как мы рассматриваем ускоренную среду, необходимо сказать о температуре Унру.

Эффект Унру: при ускоренном движении наблюдателя (или детектора, которым, в данном случае, служит среда) имеют место квантовые эффекты, связанные с возникновением частиц. При этом для наблюдателя это выглядит, как тепловая среда с температурой, называемой температурой Унру.

Температура Унру связана с ускорением детектора следующим соотношением:

$$T_u = \frac{a}{2\pi}$$

Эта температура некоторым образом характеризует фазовые переходы между адронной и кварк-глюонной материями. При температурах, меньших температуры Унру, материя адронизована, при больших - она находится в состоянии КГП.

В статье [2], на которую в основном и опирается данная работа, ускорение среды, полученной при столкновении тяжёлых ионов, смоделировано в рамках модели PHSD.

3. Оценка ускорения

3.1. Релятивизм и 4-векторы

Так как столкновения ионов происходят на скоростях, близких к скорости света, необходимо учитывать релятивистские эффекты. Поэтому будем рассматривать

скорость среды, как 4-скорость частицы: $V = (\frac{E}{mc}; V_x; V_y; V_z)$

Запишем, соответственно, и 4-градиент: $\partial = (\frac{\partial}{\partial t}; \frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z})$

4-ускорение: $a = (\gamma\dot{\gamma}c; \gamma^2\vec{a} + \gamma\dot{\gamma}\vec{v})$, где $\vec{a}$ и $\vec{v}$ - 3-ускорение и 3-скорость, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$,

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

В таком случае, формула имеет вид [2]: $a_\mu = u^\nu \partial_\nu u_\mu$

Некоторые характеристики столкновения тяжёлых ионов, которые возникают коллективно (описываются статистически), можно рассматривать и для более лёгких отдельных частиц (например, протонов). Учитывая это, заменим, 4-скорость среды на

4-скорость частицы. Учтём также, что $V = (\frac{E}{mc}; \frac{\vec{p}}{m})$, а значит и $\partial = (\frac{\partial}{c\partial t}; \vec{\nabla})$, заменим производные отношениями конечных величин. Тогда имеем $a = (\frac{E}{mc} \frac{1}{c\Delta t} + \frac{p}{m} \frac{1}{\Delta l}) \frac{p}{m}$.

3.2. Применение гидродинамической формулы для ускорения

Рассмотрим систему отсчёта, близкую к сопутствующей.

В таком случае $\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{a}$

Применим формулу гидродинамического ускорения: $\vec{a} = (\vec{V} \vec{\nabla}) \vec{V}$, где a и V - ускорение среды и её скорость соответственно.

Будем рассматривать рассеяние на небольшой угол. Тогда изменяться будет только поперечная компонента ускорения: $\vec{a}_0 = (\vec{V}_1 \vec{\nabla}) \vec{V}_0$, где $\vec{a}_0$ - поперечная компонента ускорения, $\vec{V}_0, \vec{V}_1$ - поперечная и продольная компоненты скорости.

3.3. Сравнение с ускорением свободного падения

Вернёмся к формуле $a = (\frac{E}{mc} \frac{1}{c\Delta t} + \frac{p}{m} \frac{1}{\Delta l}) \frac{p}{m}$.

Запишем Δt как $\Delta t = \frac{\Delta l}{V} = \frac{\Delta l}{\frac{E}{mc}}$.

Тогда $a_0 = ((\frac{E}{mc^2})^2 \frac{c}{\Delta l} + \frac{p}{m\Delta l}) \frac{p}{m}$

Для оценки величины a_0 сравним её с g и найдём величину $\frac{a_0}{g}$:

$g = \frac{V_{1к}^2}{R_3}$, где $V_{1к}$ - первая космическая скорость (≈ 8 км/с), R_3 - средний радиус

Земли (≈ 6371 км)

$\Delta l \approx 1$ ФМ, $c \approx 3 * 10^5$ км/с

$\frac{a_0}{g} = (\frac{c}{V_{1к}})^2 (\frac{R_3}{\Delta l}) (\frac{p}{m^2}) (\frac{E^2}{mc^2} + \frac{p}{c^2})$

В итоге характерный порядок величины $\frac{a_0}{g} \approx 10^{31}$

4. Выводы

В ходе работы были изучены некоторые процессы, происходящие при упругих столкновениях тяжёлых ионов, поведение КГП, как материи со свойствами идеальной жидкости, а также было оценено ускорение при рассеянии адронов при их столкновениях в коллайдерах:

$$\frac{a_0}{g} \approx 10^{31}$$

Однако в данной работе не рассматривается магнитная составляющая. В дальнейшем можно учесть и её, рассмотрев гидродинамическую завихрённость и применив магнитогидродинамический подход для описания движения КГП.

5. Ссылки на источники

[1] <https://nica.jinr.ru/ru/> - официальный сайт мегапроекта NICA

[2] https://www.researchgate.net/publication/389055945_Modeling_of_acceleration_in_heavy-ion_collisions_occurrence_of_temperature_below_the_Unruh_temperature -

Моделирование ускорения при столкновении тяжёлых ионов: возникновение температуры ниже температуры Унру (Г. Ю. Прохоров, Д. А. Шохонов, О. В. Теряев, Н. С. Цегольник, В. И. Захаров)

[3] <https://ufn.ru/en/articles/2023/2/a/> - General relativity effects in precision spin experimental tests of fundamental symmetries (S.N. Vergeles, N.N. Nikolaev, Yu.N. Obukhov, A.Ya. Silenko, O.V. Teryaev)

[4] https://www.researchgate.net/publication/45865077_Parton-Hadron-String_Dynamics_an_off-shell_transport_approach_for_relativistic_energies - Parton-Hadron-String Dynamics: an off-shell transport approach for relativistic energies (W. Cassing and E. L. Bratkovskaya)

[5] http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/oganesyan_Intr_HI.pdf - ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ (под редакцией Ю.Ц. Оганесяна, Авт.: Ю.П. Гангрский, В.А. Григорьев, В.М. Емельянов, К.О. Лapidус, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Э. Пенионжкевич, Ю.В. Пятков)

[6] https://nica.jinr.ru/documents/TDR_spec_Fin0_for_site_short.pdf - ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ОБЪЕКТА «КОМПЛЕКС NICA»

[7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Four-velocity>

[8] <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Four-gradient>

[9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Four-acceleration>