

Микрохаббловское расширение в столкновениях тяжёлых ионов

(Little Hubble Flow in Heavy Ion Collisions)

В. Воронюк, Н. В. Коломеец, О. В. Теряев

Объединённый институт ядерных исследований

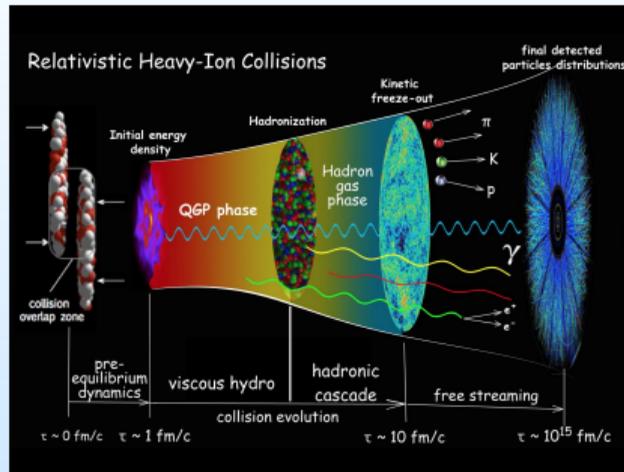
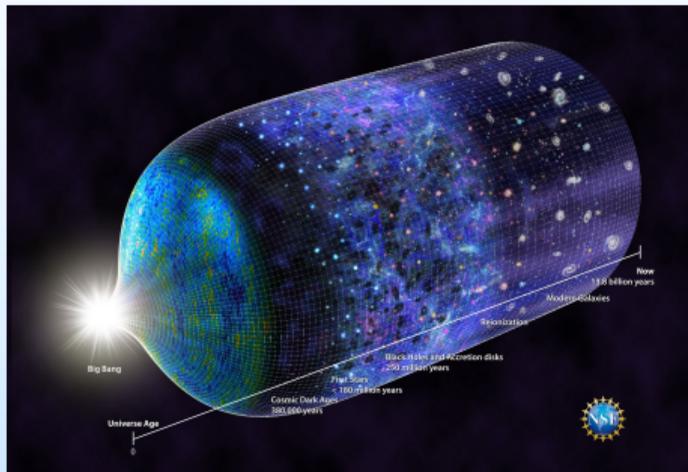
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвящённая 70-летию В. А. Рубакова

17 февраля 2025 г.

Введение

K. Kajantie, "BIG BANG AND LITTLE BANG, COSMOLOGY IN THE LABORATORY", Phys. Scripta T 23, (1988)

U.W. Heinz, "The Little bang: Searching for quark gluon matter in relativistic heavy ion collisions", Nucl.Phys.A 685 (2001) [arXiv:hep-ph/0009170 [hep-ph]]



From Chun Shen https://indico.cern.ch/event/493854/contributions/2201410/attachments/1312485/1964535/UlrichFest_ChunShen.pdf

Большой взрыв (The Big Bang)

Расширяется пространство

Изотропное расширение
(отклонения если и есть, то очень малы)

Наблюдаем в коротком промежутке времени

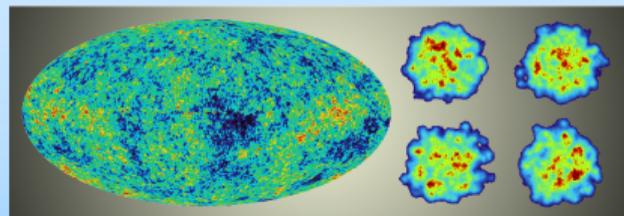
Малый взрыв (A little bang)

Расширяется фаербол

Анизотропное расширение

Можем наблюдать всю эволюцию

Можем повторить много раз



From U. Heinz, J. Phys.: Conf. Ser., 455 (2013)

Хаббловское расширение

$\vec{v} = H\vec{r}$ – закон Хаббла; H – постоянная Хаббла $H_{\text{Astro}} \approx 70 \text{ (км/с)/Мпк} \sim 10^{-41} \text{ фм}^{-1}$

Баллистический разлёт: $\vec{r}(t) = \vec{v}t$; $\dot{\vec{v}} = 0 \Rightarrow \vec{v} = H\vec{r}$; $H = 1/t$

В столкновениях тяжёлых ионов:

- J. P. Bondorf, S. I. A. Garpman, J. Zimanyi, “A Simple Analytic Hydrodynamic Model for Expanding Fireballs”, Nucl.Phys.A 296 (1978)
- M. Chojnacki, W. Florkowski, T. Csörgö, “On the formation of Hubble flow in little bangs”, Phys.Rev.C 71 (2005), [nucl-th/0410036]
- M. Baznat, K. Gudima, A. Sorin, O. Teryaev, “Femto-vortex sheets and hyperon polarization in heavy-ion collisions”, Phys.Rev.C 93 (2016), [1507.04652]
- A. Zinchenko, O. Teryaev, M. Baznat, A. Sorin, “Polarization of Λ -hyperons, vorticity and helicity structure in heavy-ion collisions”, PoS EPS-HEP2021 (2022)
- N. Tsegelnik, E. Kolomeitsev, V. Voronyuk, “Helicity and vorticity in heavy-ion collisions at energies available at the JINR Nuclotron-based Ion Collider facility”, Phys.Rev.C 107 (2023), [2211.09219 [nucl-th]]
- G. Inghirami, T. Reichert and M. Bleicher, “Hubble Expansion and Freeze-Out at RHIC-BES Energies from UrQMD”, [arXiv:2106.04543 [nucl-th]]

Мы оцениваем параметр Хаббла отдельно для пионов и нуклонов

Методы определения параметра Хаббла:

- фитирование профиля скорости;
- ➔ • использование $\partial v_i / \partial x_i$ [V. Voronyuk, E.E. Kolomeitsev, N.V. Kolomojets, O.V. Teryaev, N.S. Tsegelnik, Phys.Part.Nucl. 55 (2024) 4].

Параметры моделирования

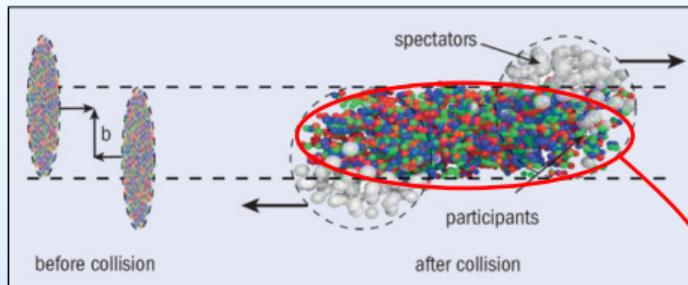
Parton-Hadron-String Dynamics (PHSD) транспортный подход, основанный на решении уравнений Каданова–Бейма в первом порядке по градиентам

[<http://theory.gsi.de/~ebratkov/phsd-project/PHSD/>;

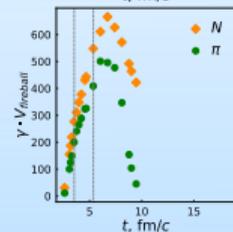
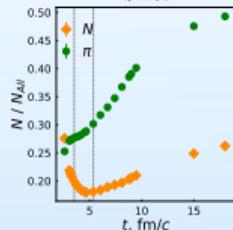
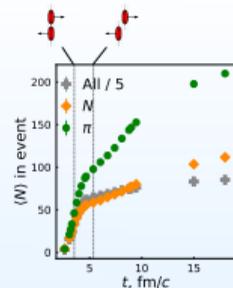
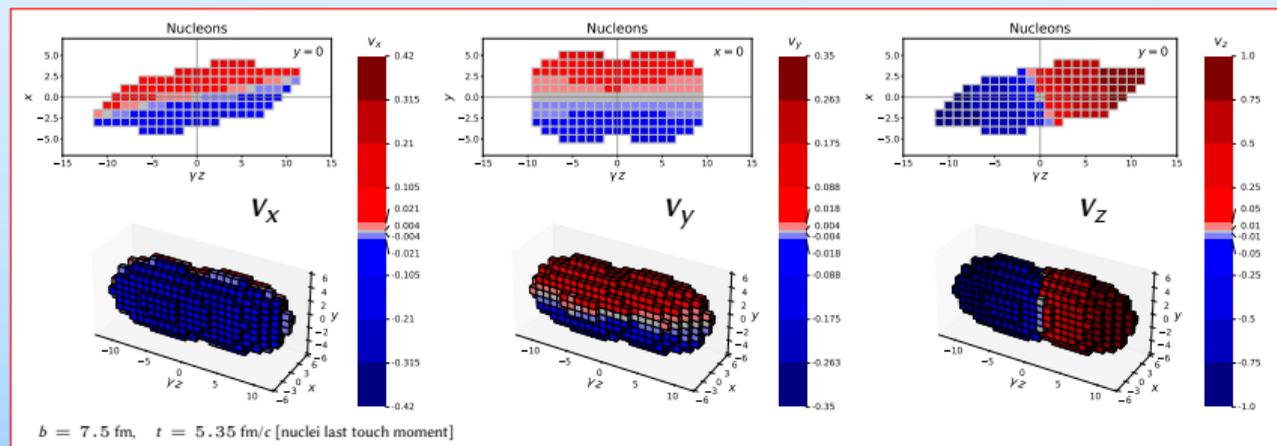
W. Cassing and E. L. Bratkovskaya, Phys.Rev.C 78 (2008),

[arXiv:0808.0022 [hep-ph]].

- Au + Au
- $\sqrt{s_{NN}} = 7,8 \text{ ГэВ}$ [энергии NICA]
- $b = 2,5; 5,0; 7,5; 10.0 \text{ фм}$



From <https://cerncourier.com/a/participants-and-spectators-at-the-heavy-ion-fireball/>

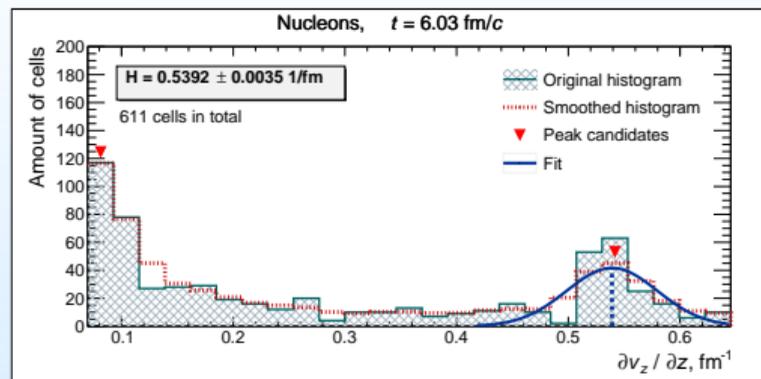
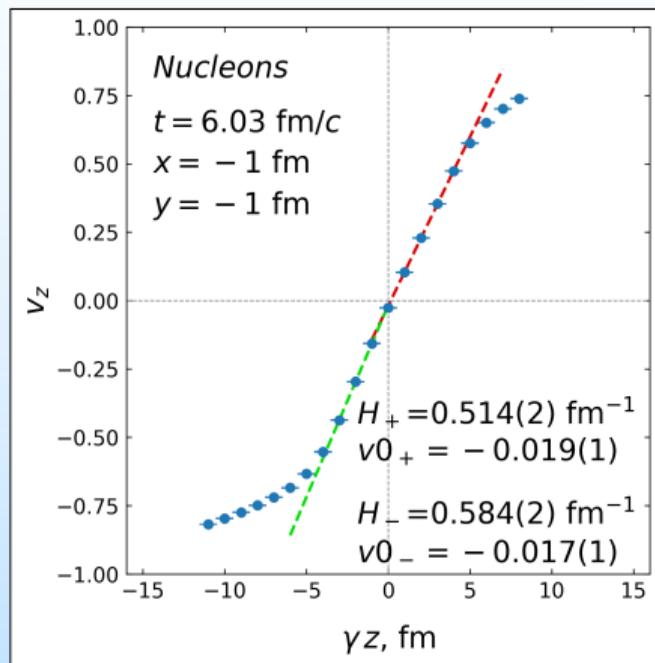


$\epsilon > 50 \text{ МэВ}$

Эккартово определение скорости:

$$\vec{v} = \langle \vec{p} / E \rangle$$

Параметр Хаббла из производной по направлению



Изотропное хаббловское расширение:

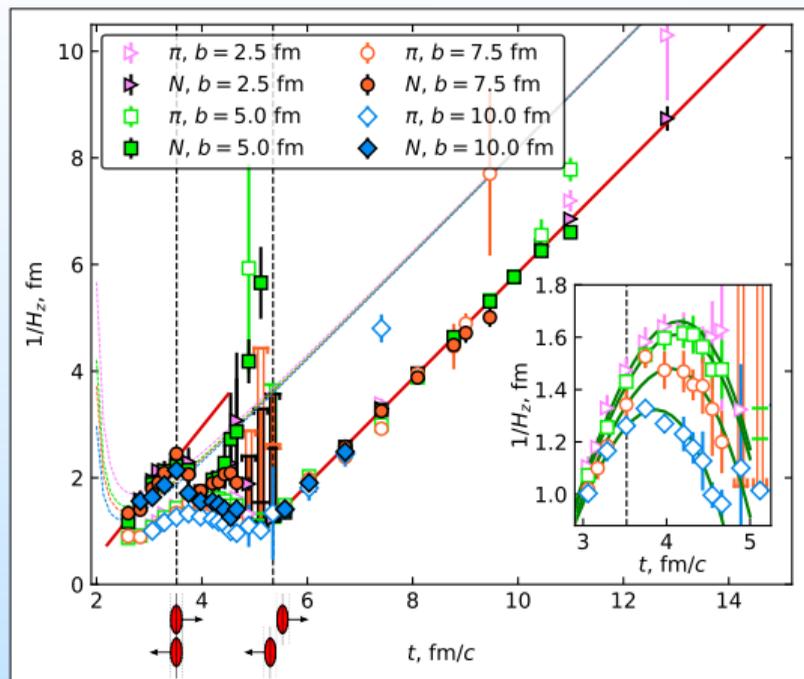
$$\text{div } \vec{v} = 3H, \quad H = \text{const.}$$

Анизотропное хаббловское расширение:

$$\text{div } \vec{v} = \underbrace{\partial_x v_x}_{H_x} + \underbrace{\partial_y v_y}_{H_y} + \underbrace{\partial_z v_z}_{H_z}$$

Если основная часть ячеек вовлечена в хаббловское движение, ожидается различным пик на гистограмме $\partial_i v_i$. **Положение пика $\Rightarrow H_i$**

Параметр Хаббла в продольном направлении



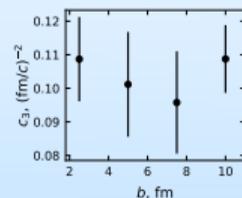
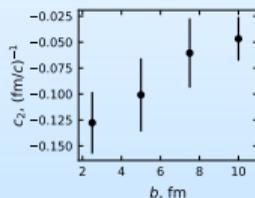
Au + Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 7.8$ GeV

- После расхождения остатков ядер – баллистический разлёт со смещённым начальным моментом времени:

$$H_z = \frac{C}{t - t_0}, \quad C = 1,0053(55) \\ t_0 = 4,12(2) \text{ фм/с}$$

- Пионы до \sim момента расхождения ядер:

$$\frac{1}{H_z} = t - t_1 - c_2(b)(t - t_1)^2 - c_3(b)(t - t_1)^3$$



$t_1 = 1,97(3) \text{ фм/с}$

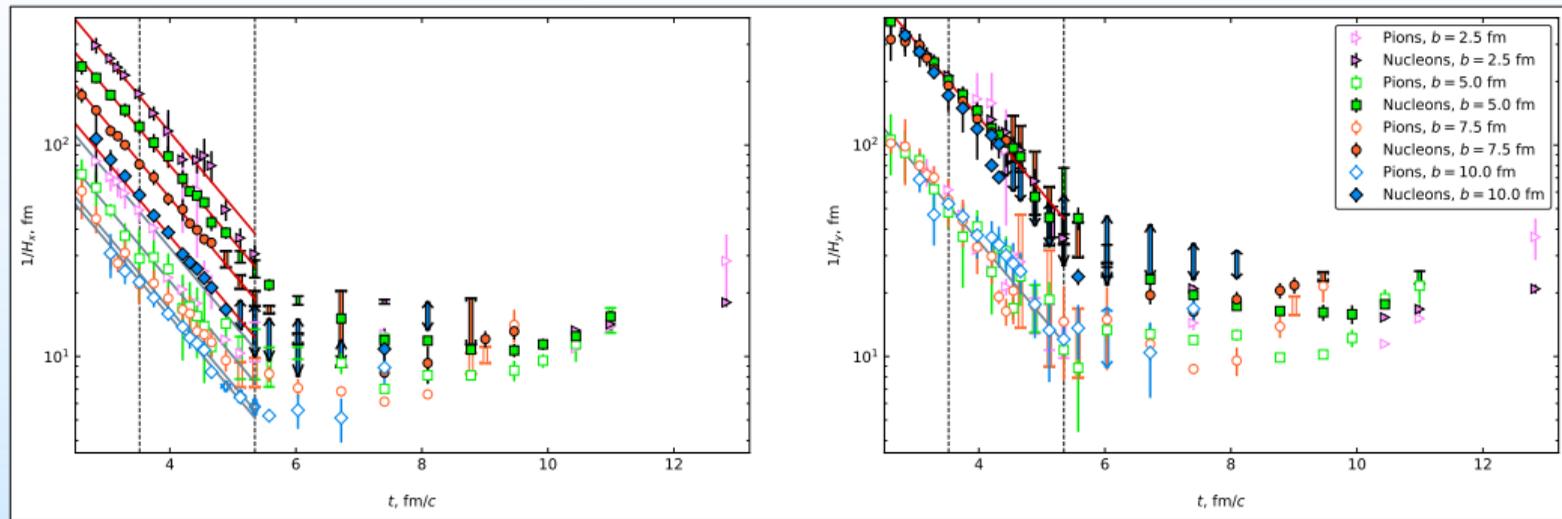
Недостаточная точность...

- Нуклоны при малых t :

$$H_z = \frac{C}{t - t_0}, \quad C = 0,81(6) \\ t_0 = 1,6(1) \text{ фм/с}$$

Пунктирные линии – сравнение с работой J. P. Bondorf, S. I. A. Garpman, J. Zimanyi (1978)

Параметр Хаббла в поперечном направлении



До момента расхождения остатков ядер

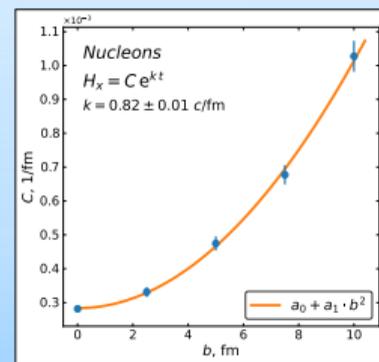
$$H_x = F(b) e^{kt}, \quad H_y = a_0 e^{kt}, \quad k = 0,82(1) \text{ c/фм}$$

«Маленькая инфляция» (“little inflation”) – ?

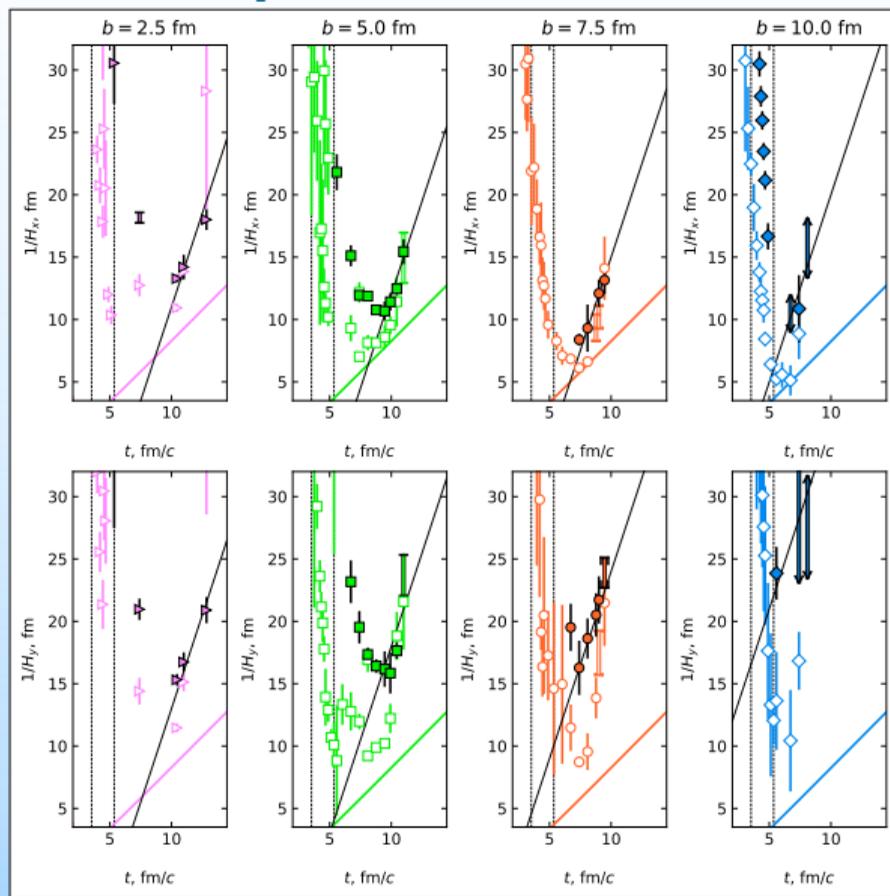
Для нуклонов:

$$F(b) = a_0 + a_1 b^2, \quad a_0 = 2,84(9) \times 10^{-4} \text{ 1/фм}, \quad a_1 = 7,3(4) \times 10^{-6} \text{ 1/фм}^3$$

Для пионов: $a_0 = 1,09(5) \times 10^{-3} \text{ 1/фм}$; $F(b) - ?$



Большие времена



При больших временах расширение медленнее, чем при баллистическом разлёте

Возможно, мы не доходим до стадии баллистического разлёта

Выводы

- С помощью модели PHSD получена временная зависимость параметра Хаббла в столкновениях Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 7,8$ ГэВ для четырёх прицельных параметров.
- Показано, что после расхождения остатков ядер в продольном направлении фаербол расширяется, как при баллистическом разлёте со смещённым начальным моментом:

$$H_z = \frac{1}{t - t_0}, \quad t_0 = 4,12(2) \text{ фм/с.}$$

- На ранних стадиях параметр Хаббла отличается для пионов и нуклонов; в H_z – переходная область \Rightarrow возможность сопоставить с потоками и результатами фемтоскопии.
- Показано, что в поперечных направлениях
 - до расхождения ядер скорость растёт экспоненциально по времени [«Маленькая инфляция» (“little inflation”) – ?]:

$$v_x = F(b) e^{k t} x$$

$$v_y = a_0 e^{k t} y$$

	N	π
a_0	✓	✓
$F(b)$	$a_0 + a_1 b^2$?

- при больших временах (доступных нам) параметр Хаббла убывает быстрее, чем $1/t$.