

# Вортисити и поляризация $\Lambda$ -гиперонов в AuAu 7.7GeV столкновениях в модели PHSD

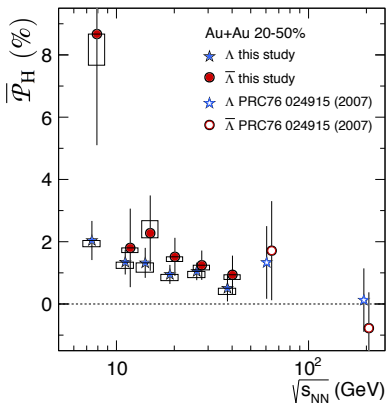
Е.Коломийцев, В.Д.Тонеев, В.Воронюк

27 октября 2017



# STAR BES

“Global  $\Lambda$  hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid” arXiv:1701.06657



Измеряют по угловому  
распределению продуктов распада  
 $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$

$$4\pi \frac{dN}{d\Omega^*} = 1 + \alpha_\Lambda \vec{P}^* \vec{n}_p^*$$

в системе покоя распадной  
частицы.

Поляризация вдоль вектора углового момента системы/поперек  
плоскости реакции.

# Введение

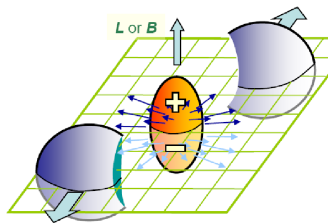
*В столкновениях тяжелых ионов рождается среда со свойствами сильно-взаимодействующей жидкости.*

## Периферические столкновения

- ▶ Большой угловой момент  $\sim (10^3 - 10^5)\hbar$
- ▶ "Жидкая капля" с вязкостью

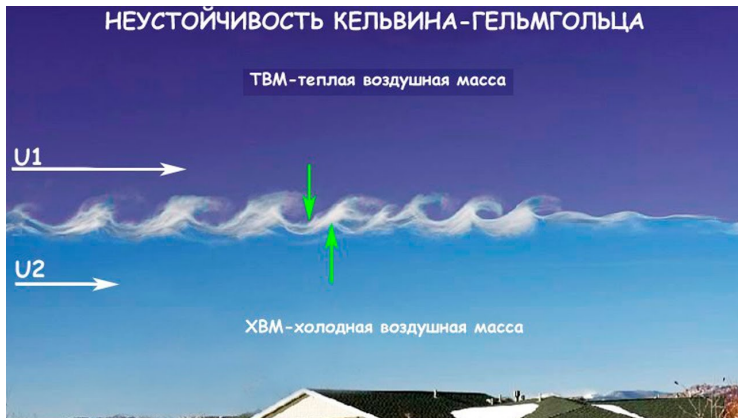


- Вращение среды
- Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца



# Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца

*Возникает при наличии сдвига между слоями сплошной среды.*  
Причудливые облака. Волны на поверхности воды.



# Магнитомеханические явления

## Эффект Эйнштейна — де Гааза

Тело (ферромагнетик) при намагничивании вдоль некоторой оси приобретает относительно неё вращательный импульс.



## Эффект Барнетта

Намагничивание тел путем их вращения при отсутствии внешнего магнитного поля.

# Возможные наблюдаемые эффекты вращения ядерной среды

- ✠ Локальное нарушение четности (Chiral Vortical Effect) Phys.Rev.C 82, 054910 (2010)
  - ✠ Поляризация частиц Phys.Rev.Lett. 94, 102301 (2005)
- 
- ◇ Мы будем рассматривать AuAu столкновения при 7.7 GeV  $b=6\text{fm}$

# Определения

**Кинематическое определение вортисити в классической гидродинамике**

$$\omega = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \mathbf{v}$$

# Определения

**Кинематическое определение вортисити в классической гидродинамике**

$$\omega = \frac{1}{2} \text{rot } \mathbf{v}$$

**Релятивистское определение вортисити**

$$\omega_{\mu\nu} = \frac{1}{2} (\partial_\nu u_\mu - \partial_\mu u_\nu)$$

где  $u_\nu$  локальный четырех-вектор скорости среды.

$$u_\nu(x) = \gamma(1, \mathbf{v}(x)), \quad \gamma(x) = \frac{1}{\sqrt{1 - \mathbf{v}^2(x)}}$$

**Вортисити отвечает за возможное локальное нарушение четности в CVE подобно магнитному полю в СМЕ.**



# Определения

## Релятивистское определение температурной вортисити

$$\varpi_{\mu\nu} = \frac{1}{2}(\partial_\nu\beta_\mu - \partial_\mu\beta_\nu) \quad \beta_\nu = \frac{u_\nu}{T}$$

## Вектор локальной поляризации из-за спин-орбитального взаимодействия

F. Becattini et al. Eur. Phys. J. C75, no. 9, 406 (2015)

### Спиновый вектор

$$S^\mu(x, p) = -\frac{s(s+1)}{6m}(1 \pm n(x, p))\varepsilon^{\mu\nu\lambda\delta}\varpi_{\nu\lambda}p_\delta$$

$s$  – спин,  $p_\delta$  – 4е импульс частицы

- Термодинамическое равновесие
- Механизм не конкретизируется

### Поляризация $\Lambda$

$$P = 2 \frac{\mathbf{S}^* \cdot \mathbf{L}}{|\mathbf{L}|}$$

$\mathbf{S}^*$  – спиновый вектор в системе покоя  $\Lambda$ ,  $\mathbf{L}$  – вектор углового момента системы.

# Parton-Hadron-String-Dynamics model

- **Обобщенные транспортные уравнения вне массовой поверхности основанные на уравнениях Каданова–Бейма .**
- **Динамика квазичастиц вне массовой поверхности:** характеристики квазичастиц модифицируются в среде
- **Модель DQPM:** спектральные функции, массы, ширины, средне-полевые потенциалы для партонов (фит решеточной КХД)
- **Фазовый переход: кроссовер,  $\varepsilon_{cr} > 0.5 \text{ ГэВ}/\text{фм}^3$ .**
- **Динамическая адронизация**

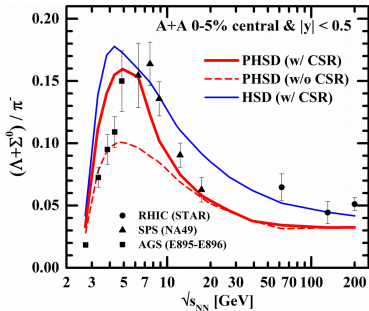
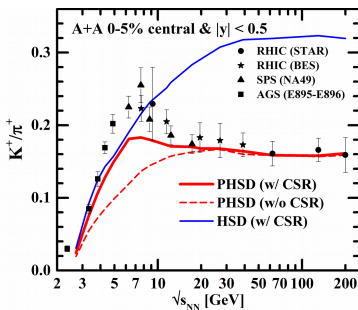
Модель хорошо описывает экспериментальные данные в широкой области энергий.

W.Cassing, E.Bratkovskaya, PRC 78 (2008) 034919; NPA831 (2009) 215; W.Cassing, EPJ ST 168 (2009) 3

# Chiral symmetry restoration in the hadronic phase

The strangeness enhancement seen experimentally at FAIR/NICA energies probably involves the approximate restoration of chiral symmetry in the hadronic phase.

W.Cassing, A.Palmese, P.Moreau, E.L.Bratkovskaya – arXiv:1510.04120 [PRC]



# Поле скоростей. ЧАСТИЦЫ → СРЕДА

Численно поле скоростей можно определить с помощью некоторой размазывающей функции  $\Phi(x, x_i)$ , где  $x$  координата среды, а  $x_i$  координата  $i$ й частицы.

Wei-Tian Deng and Xu-Guang Huang, Phys. Rev. C **93**, 064907 (2016)

## ✦ Скорость потока частиц

$$v^a(x) = \frac{1}{\sum_i \Phi(x, x_i)} \sum_i \frac{p_i^a}{p_i^0} \Phi(x, x_i),$$

## ✦ Скорость потока энергии

$$v^a(x) = \frac{\sum_i p_i^a \Phi(x, x_i)}{\sum_i [p_i^0 + (p_i^a)^2 / p_i^0] \Phi(x, x_i)},$$

## ✦ Скорость ячейки

$$v^a(x) = \frac{\sum_i p_i^a \Phi(x, x_i)}{\sum_i p_i^0 \Phi(x, x_i)},$$

# ЧАСТИЦЫ → СРЕДА

## Поток частиц

$$J^\mu(x) = \left( \sum_i \Phi(x, x_i), \sum_i \frac{p_i}{p_i^0} \Phi(x, x_i) \right)$$

## Поле скоростей

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r})}{J_0(\mathbf{r})} \quad u^\mu(\mathbf{r}) = \frac{J^\mu(\mathbf{r})}{\sqrt{J_\nu(\mathbf{r})J^\nu(\mathbf{r})}}$$

Разный выбор  $\Phi(x, x_i)$  может приводить к разному полю.

# Метод частица в ячейке (“Particle in Cell” или “Claud in Cell”)

## Сеточная плотность

$$J_a = \sum_i J(\mathbf{r}_i) W(\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_a),$$

для узла в точке  $\mathbf{R}_a$ , где сумма ведется по всем частицам  $i$ ,  $W$  – весовая функция

## Аппроксимация

$$J(\mathbf{r}) = \sum_a J_a W(\mathbf{r} - \mathbf{R}_a),$$

где сумма ведется по узлам.

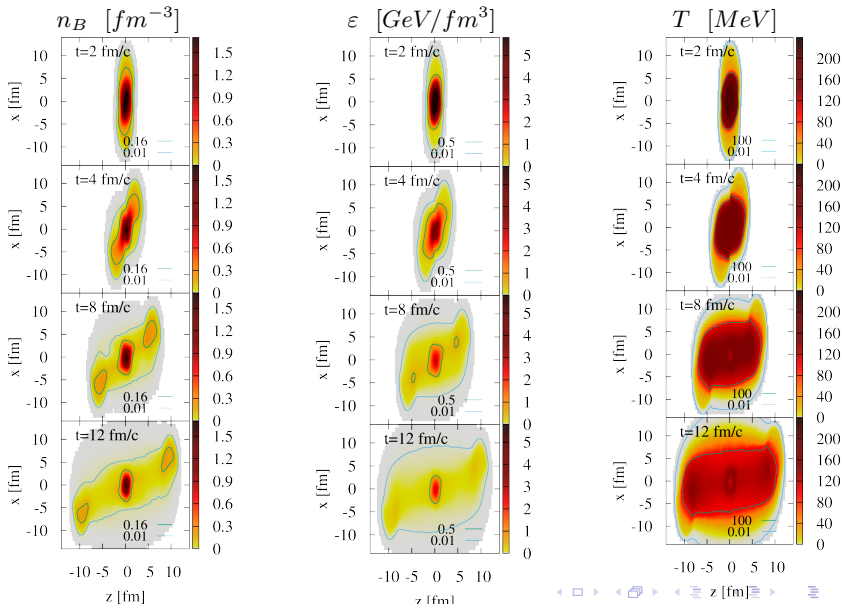
**Весовой функция  $W$  выбрана квадратичная – квадратичный сплайн. Каждый раз используется  $3 \times 3 \times 3$  узла.**

# Метод частица в ячейке (“Particle in Cell” или “Claud in Cell”)

## Свойства метода + следствия квадратичного сплайна

- ✦ Единая весовая функция для перехода на узлы решетки и восстановления значений.
- ✦ Уширение точечных частиц ( $r=0.8\text{fm}$ ).
- ✦ Непрерывное восстановление между узлами.
- ✦ Первая производная непрерывная
- ✦ Вычисление производных не требует разностной схемы (аналитическая производная весовой функции)

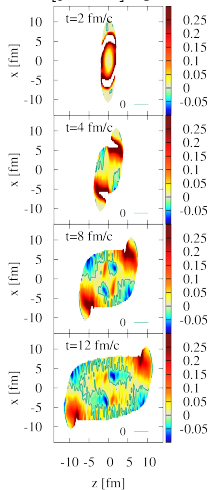
# EOS: релятивистский идеальный адронный газ (Хворостухин & Тонеев)



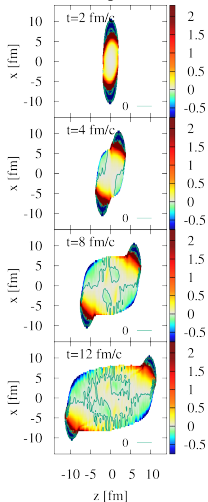


# Кинематическая и температурная вортисити

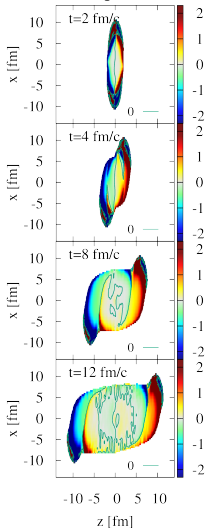
$$\omega_{xz} [fm^{-1}] \quad y = 0$$



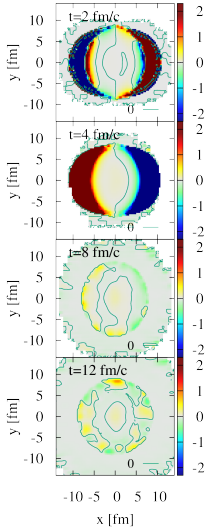
$$\varpi_{xz} \quad y = 0$$



$$\varpi_{tz} \quad y = 0$$

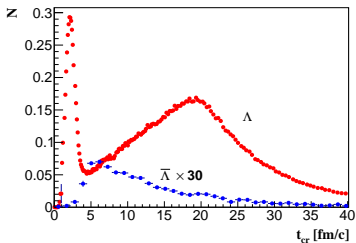
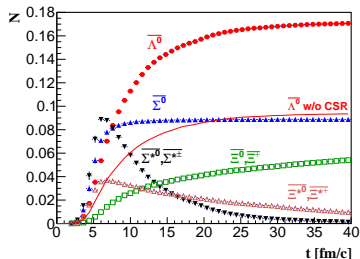
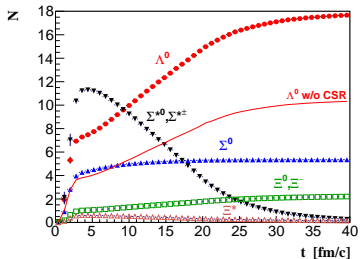


$$\varpi_{tz} \quad z = 0$$



# Рождение гиперонов

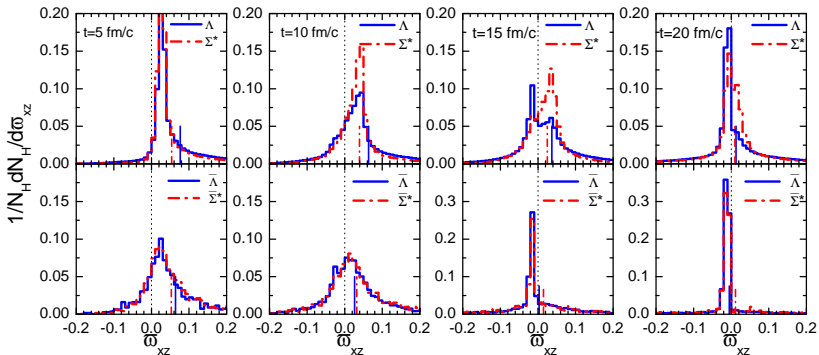
Число странных гиперонов в зависимости от времени эволюции.



Число  $\Lambda$  долетевших до детектора в зависимости от времени рождения.

# Поляризация

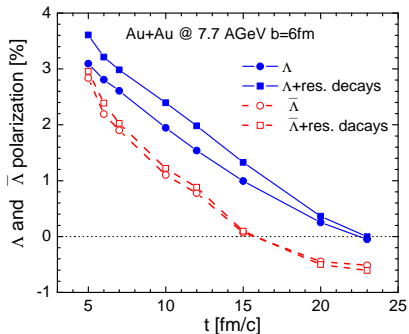
$$S_y \sim \varpi_{xz}$$



Распределение по наиболее существенной компоненте. Остальные компоненты симметричны.

# Поляризация

Предварительные результаты: Зависимость поляризации от выбора времени фризаута.



# Заключение

- ✦ Вортисити сосредоточено в основном в пограничной области фаербола.
- ✦ Поляризация зависит от выбора времени фризаута.
- ✦ Разница между поляризацией частиц и античастиц маленькая и противоположна экспериментально найденной. (Магнитное поле?)
- ✦ Распады более тяжелых гиперонов приводят к уменьшению наблюдаемой поляризации.
- ✦ В области энергии NICA происходит усиление поляризации  $\Lambda$ -гиперонов, а также усиление выхода странных частиц, что дает преимущество по изучению этих эффектов.

*Спасибо за внимание.*