

# Физика тяжелых ионов: глобальная поляризация гиперонов

Алпатов Е.В.

A21-121

# Кварковая структура адронов

- «Зоопарк элементарных частиц»: в 60-е открыто более 200 «элементарных» частиц
- SBM (Statistical Bootstrap Model) Рольфа Хагедорна пытается описать адроны больших масс как композитные состояния из более легких адронов
- Гелл-Ман и Цвейг: кварки как математическая модель «партонов»
- Экспериментальное доказательство: глубоко неупругое рассеяние электронов на протонах [1]
- Кварки связаны внутри адронов сильным взаимодействием через глюоны и не могут существовать в свободном состоянии
- Возникает **Квантовая Хромодинамика (КХД)**, возникает гипотеза о **Кварк-Глюонной Плазме (КГП)**

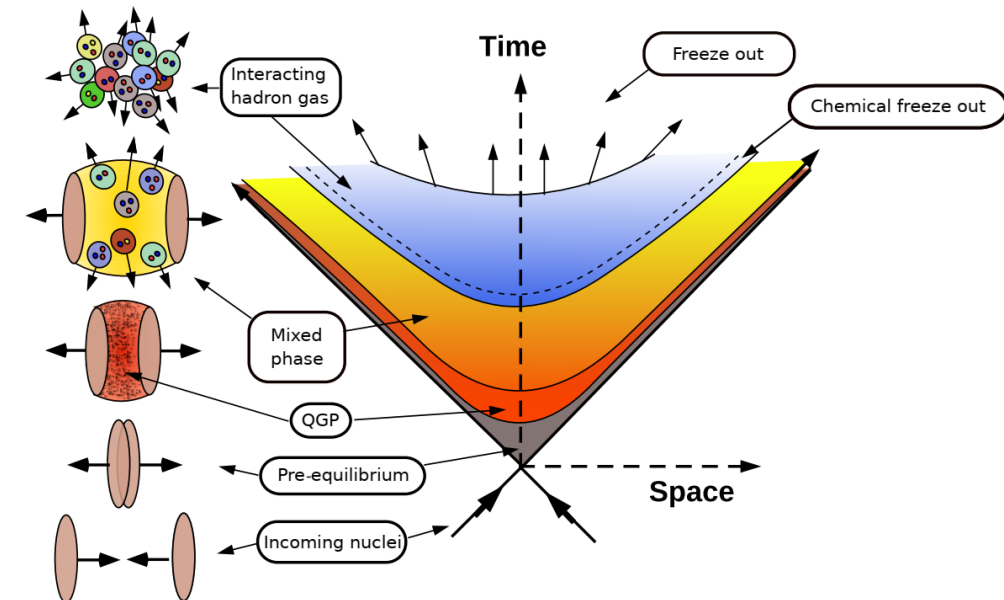
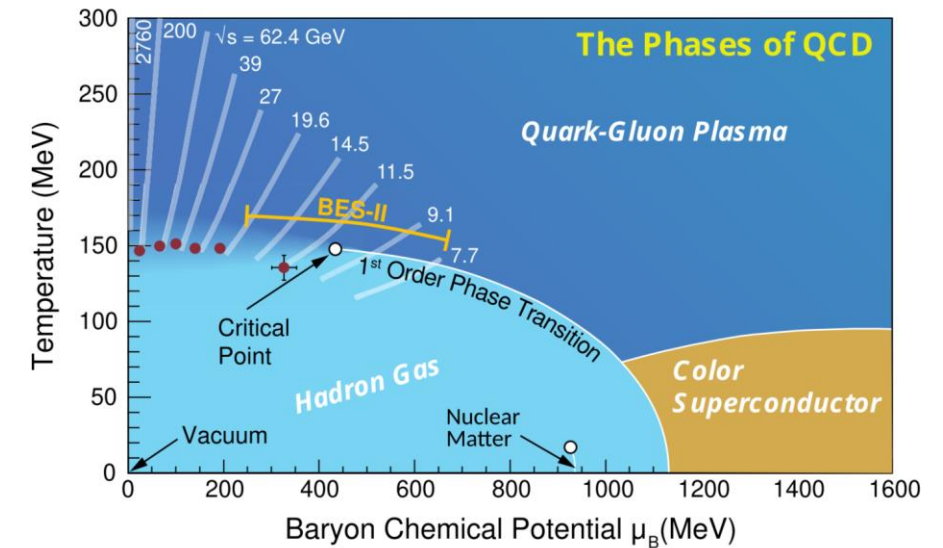
Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	верхний	очаровательный	истинный	фотон
Кварки	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	нижний	странный	прелестный	глюон
Лептоны	$\ll 2,2$ эВ	$\ll 0,17$ МэВ	$\ll 15,5$ МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино	слабое взаимодействие
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	электрон	мюон	тау	слабое взаимодействие

Бозоны (переносчики взаимодействия)

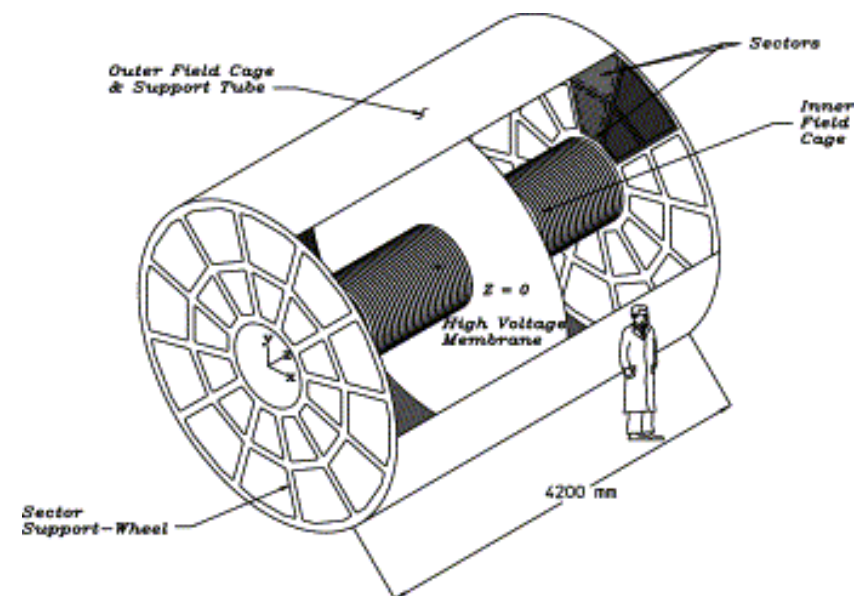
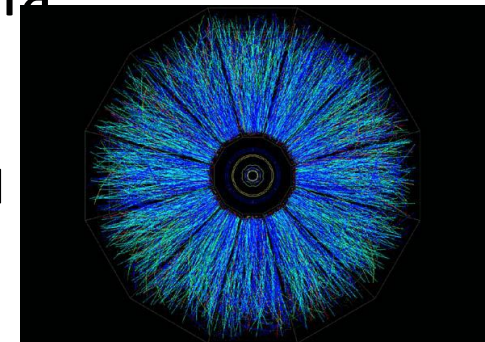
# Кварк-глюонная плазма

- Состояние вещества, при котором кварки и глюоны оказываются в квазисвободном состоянии
- Предположительно, существовала в первые микросекунды после Большого Взрыва
- Температура Хagedорна: температура «кипения» вещества, около 150 МэВ
- **КХД + температура Хagedорна = фазовый переход**
- Поиски КГП на протонных и электронных ускорителях оборачиваются провалом
- Требуется увеличение плотности вещества – новая идея – **Ускорение тяжелых ионов**



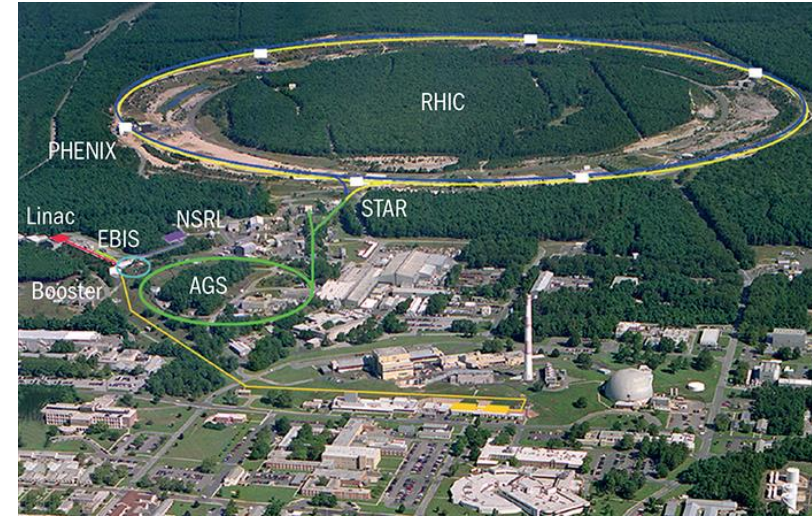
# Тяжелые ионы: экспериментальная техника

- От ускорителей требовалось увеличение энергии столкновения
- Для столкновений тяжелых ионов ожидается большой выход частиц – требуется улучшение детекторов и систем обработки данных
  - Одно из главных достижений – TPC (Time Projection Chamber)
  - Компьютерная обработка данных, БД, программирование и т.д.
- В отличие от большей части предшествующей физики, экспериментатор не знает, что происходит во время самого столкновения, мы наблюдаем только конечные состояния частиц – сильная связь теории, эксперимента и моделирования

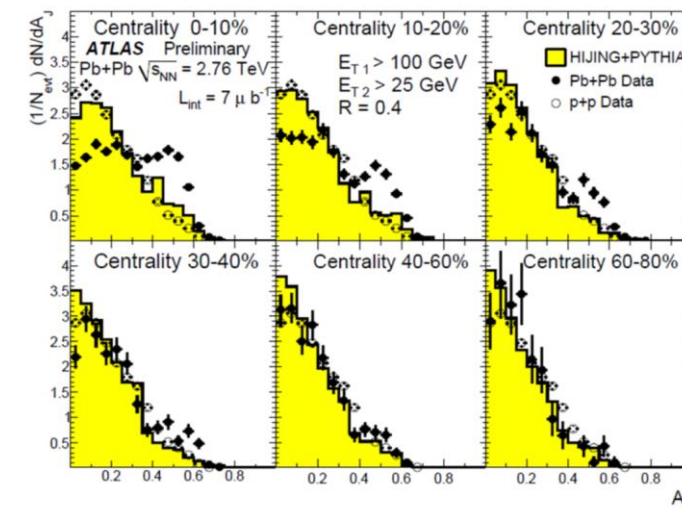
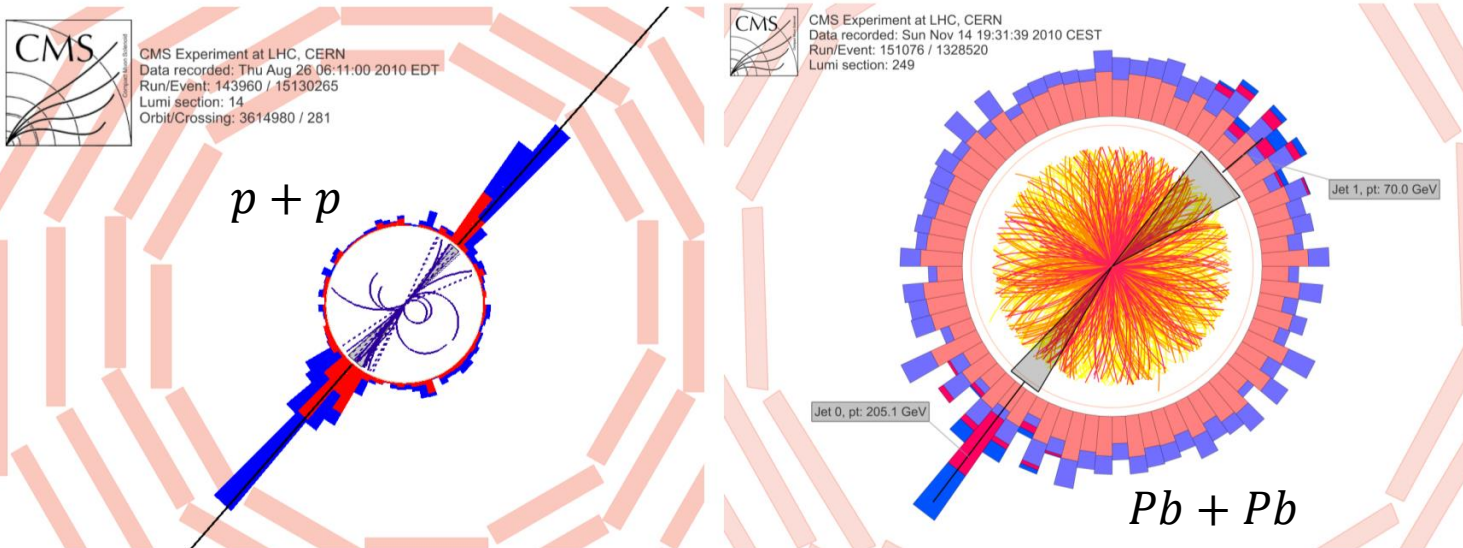


# Тяжелые ионы: ускорители и эксперименты

- Несмотря на, в целом, успешные попытки ускорения тяжелых ионов на линейных ускорителях, были построены новые коллайдеры: RHIC специально для изучения КГП, LHC и эксперимент ALICE, строящаяся NICA и эксперимент MPD
- Функционируют также: HADES на SIS-18, NA61/SHINE на SPS



# Поиск КГП: погашение струй (jet quenching)

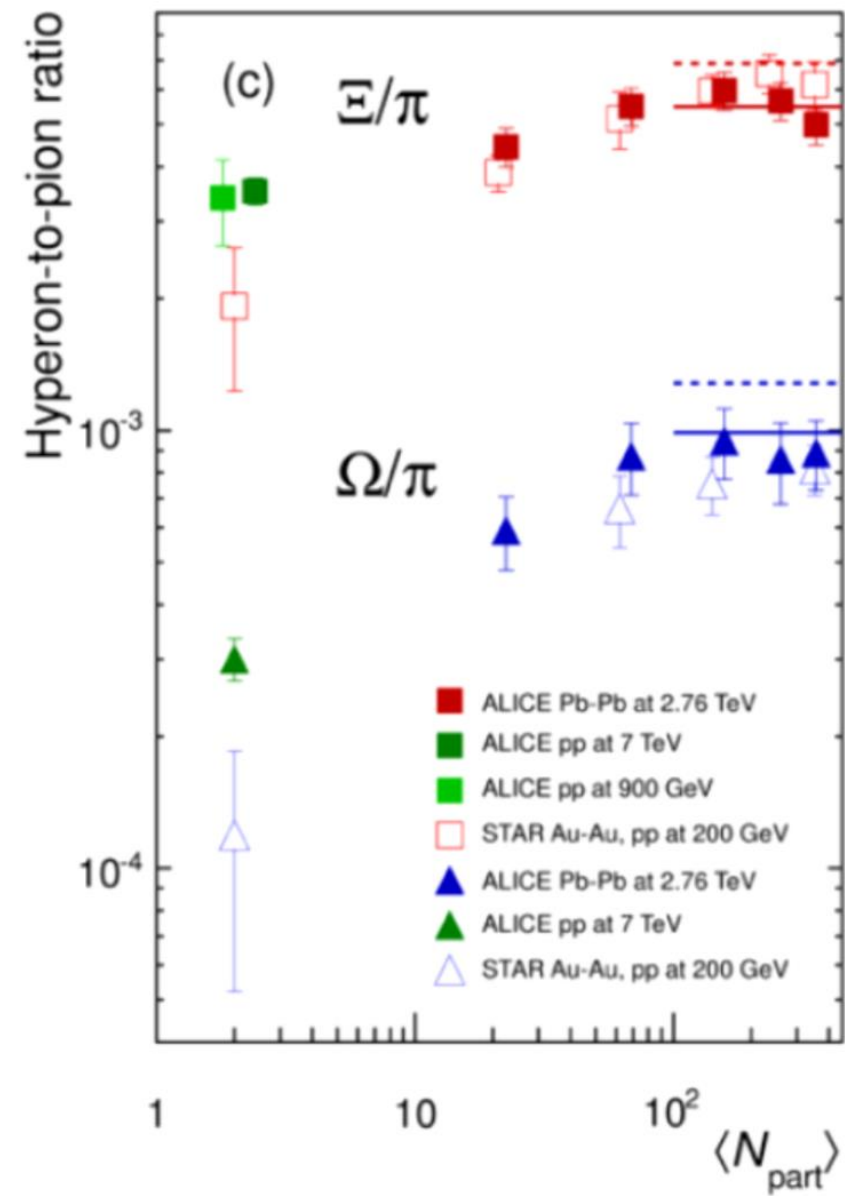


$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}} \quad \text{или} \quad A_J = \frac{p_{T1} - p_{T2}}{p_{T1} + p_{T2}}$$

- Наблюдаемый эффект напрямую связан с сильным взаимодействием и кварками [J.D.Bjorken, FERMLAB-PUB-82-059-THY (1982)]
- При прохождении через сильновзаимодействующее вещество (КГП) одна из струй теряет энергию и «гасится»
- Аналогично гасится выход частиц при больших поперечных импульсах в центральных столкновениях

# Поиск КГП: усиление выхода странных частиц

- [Rafelski and Müller, PRL, 48, 106-1069 (1982)]
- При возникновении КГП глюоны будут создавать ss пары, приводящие к увеличению выхода странных частиц
- Также наблюдаем этот эффект и для малых систем в столкновениях с высокой множественностью
- Пытаются объяснить возникновением QGP droplet, но почему-то без погашения струй

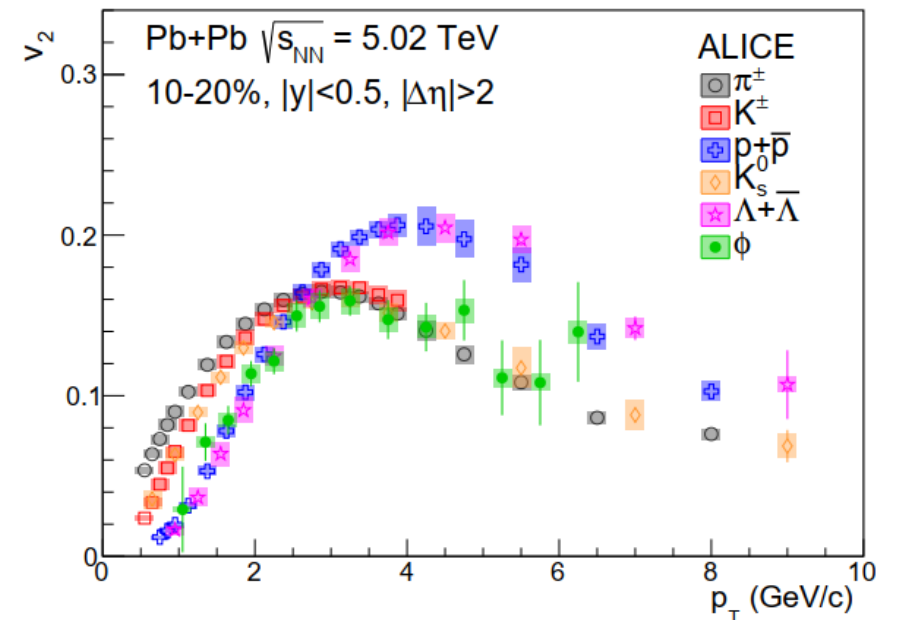
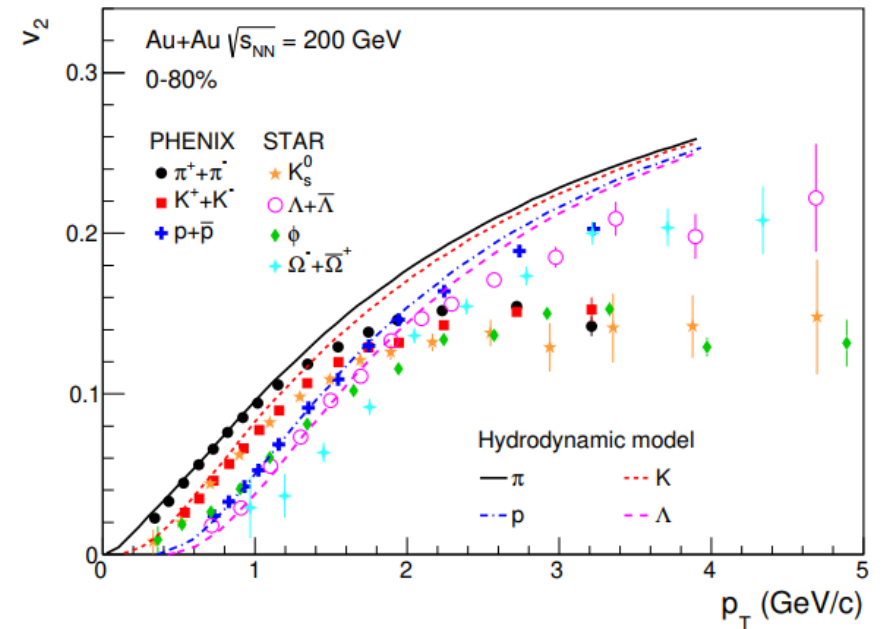


# Поиск КГП: коллективные эффекты

- Разные градиенты давления в пространстве, разное расширение в разных направлениях
- Пространственная анизотропия приводит к импульсной анизотропии:

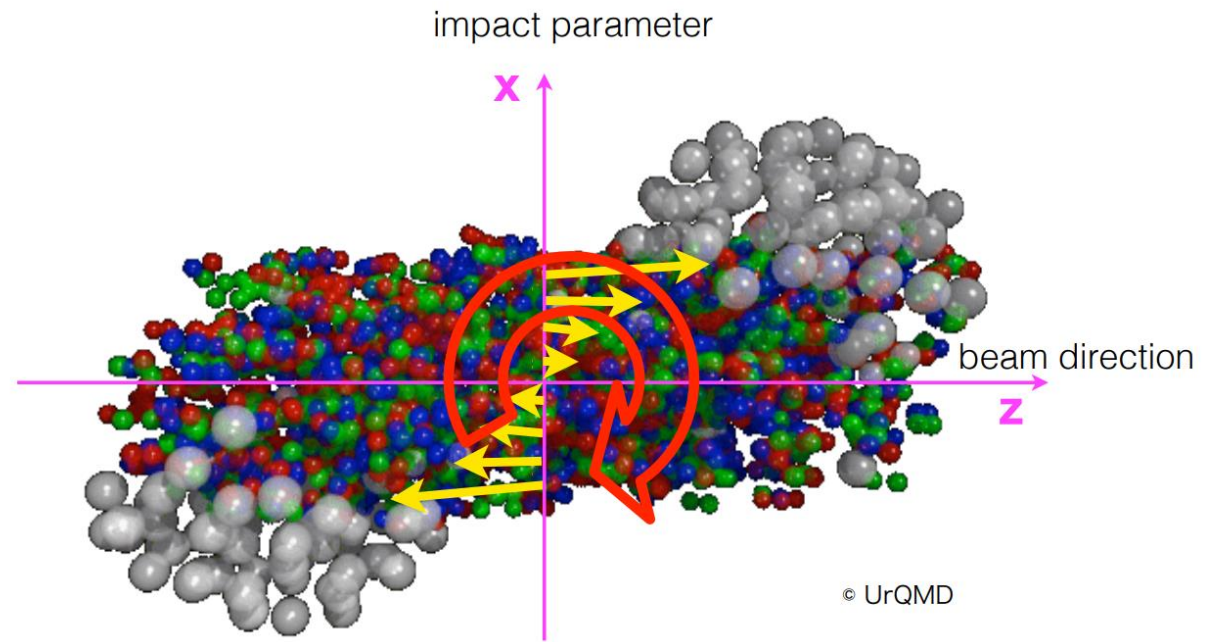
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{d^2 N}{2\pi p_T dp_T dy} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos(n\phi) \right)$$

- Можем исследовать жидкостные характеристики КГП, и вообще говорить о КГП в терминах гидродинамики





# Вихревая структура в столкновениях тяжелых ионов



- В нецентральных столкновениях градиент скорости ведет к завихренности:

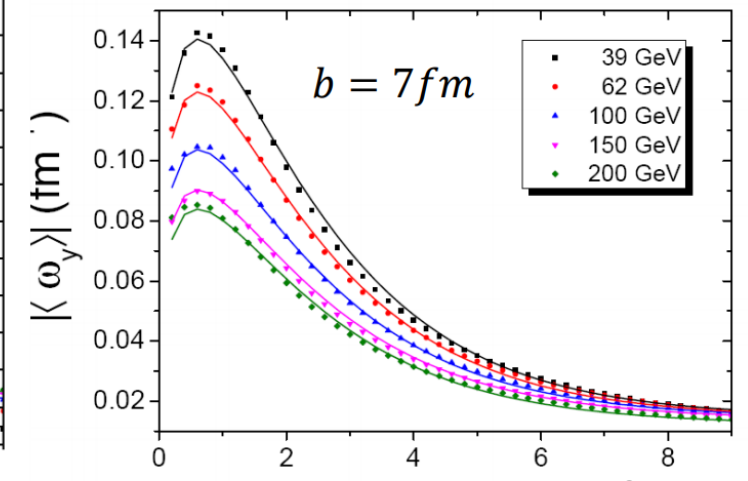
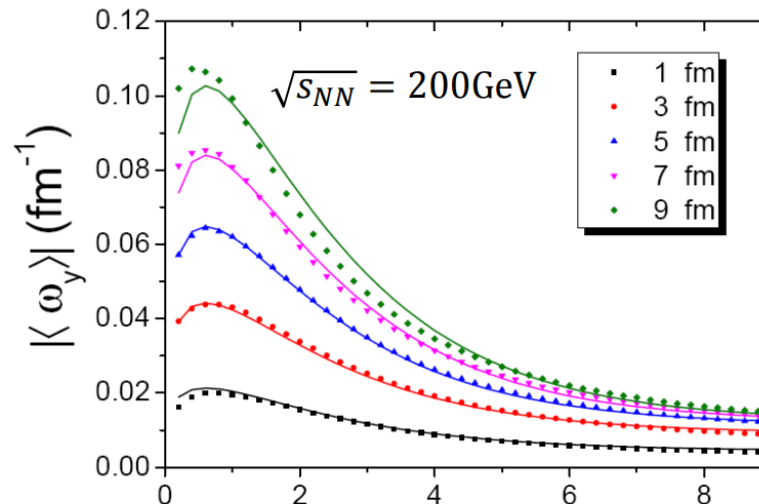
$$\omega_y = \frac{1}{2} (\nabla \times v)_y \approx -\frac{1}{2} \frac{dv_z}{dx}$$

- Для малой поляризации:

Becattini, Karpenko, Lisa, Upsal, Voloshin PRC95.054902 (2017)

$$P_\Lambda \approx \frac{1}{2} \frac{\omega}{T} + \frac{\mu_\Lambda B}{T}$$

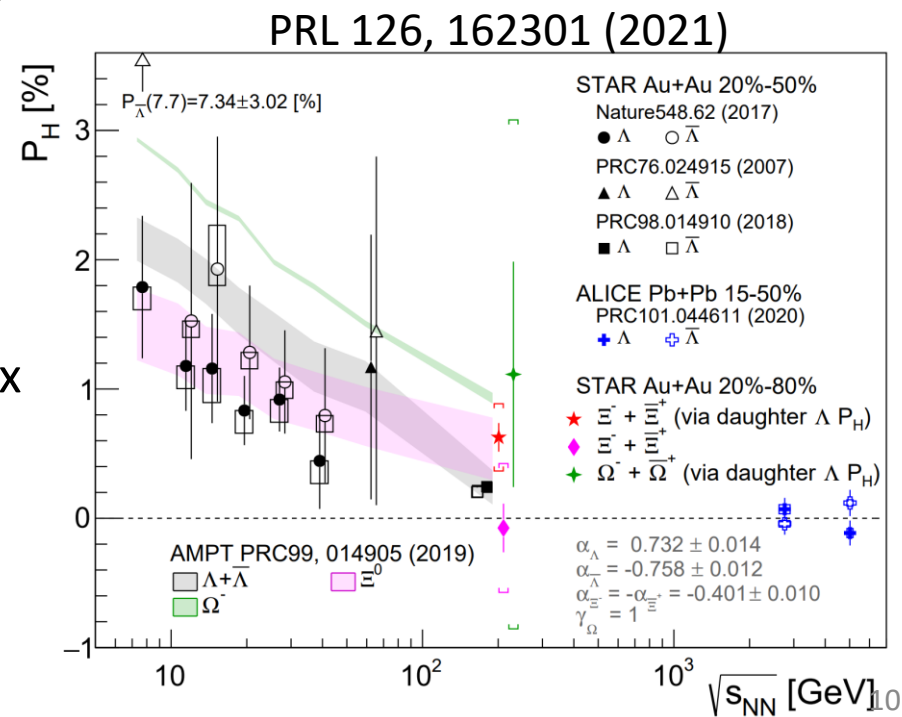
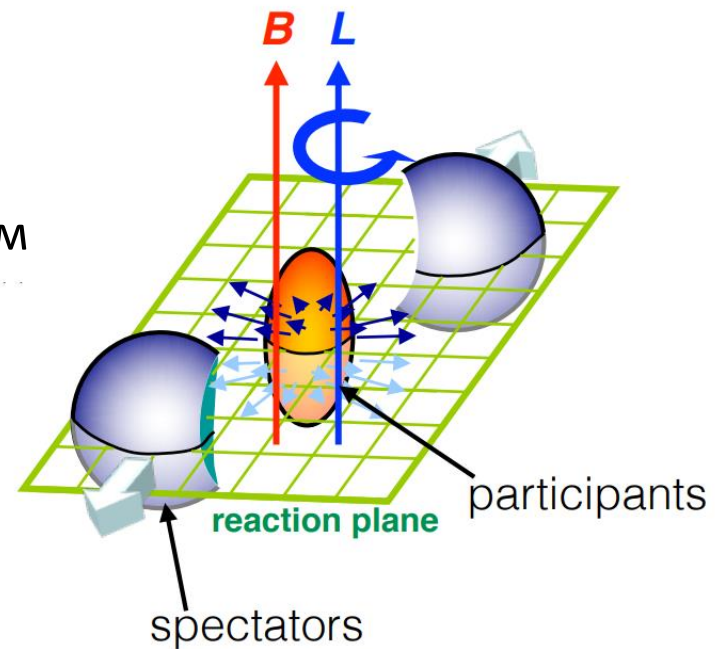
$$P_{\bar{\Lambda}} \approx \frac{1}{2} \frac{\omega}{T} - \frac{\mu_\Lambda B}{T}$$



Jiang et al, PRC94 044910 (2016)

# Глобальная поляризация НУС

- Нецентральные столкновения тяжелых ионов обладают высоким угловым моментом, передающимся через спин-орбитальное взаимодействие спину рождающихся частиц
- Измерение поляризации рожденных частиц представляет интерес для изучения свойств кварк-глюонной материи
- В эксперименте можно измерить поляризацию гиперонов с помощью определения угла вылета дочерних барионов
- Зависимость от центральности глобальной поляризации  $\Lambda$ -гиперонов была измерена для энергий 3-200 ГэВ в эксперименте STAR
- Показано уменьшение поляризации  $\Lambda$ -гиперонов с ростом энергии столкновений
- Глобальная поляризация  $\bar{\Lambda}$ -гиперонов систематически выше поляризации  $\Lambda$ -гиперонов в пределах статистических погрешностей
- Измерена глобальная поляризация  $\Xi^-$ - и  $\Omega^-$ -гиперонов в столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ



S. A. Voloshin, arXiv:nucl-th/0410089.

Z.-T. Liang and X.-N. Wang, PRL 94 (2005) 102301, [Erratum: PRL 96,039901(2006)].

L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Nature 548 (2017) 62-65.

# Как измерить глобальную поляризацию?



- Благодаря свойствам слабых распадов, нарушающих CP-инвариантность, направление импульса дочерних барионов совпадает с направлением спина родительского гиперона
- Дочерние барионы гиперонов с поляризацией ( $\vec{P}$ ) следуют распределению:

$$\frac{dN}{d\Omega^*} = \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha_H |\vec{P}| \cdot \widehat{p}_b^*) = \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha_H P \cos \theta^*)$$

- $\alpha_H$  - параметр распада, индивидуальный для каждого типа гиперонов
- $\widehat{p}_b^*$  - импульс дочернего бариона в системе покоя родительского гиперона
- Можно измерить проекцию на направление изначального углового момента  $\vec{L}$ :

$$P_H = \frac{8}{\pi \alpha_H} \frac{\langle \sin(\psi_1 - \varphi_p^*) \rangle}{Res(\psi_1)}$$

- $\psi_1$  угол плоскости реакции
- $\psi_1$  и его разрешение  $Res(\psi_1)$  могут быть получены из сигнала «спектаторов»
- Глобальная поляризация  $\Xi$ -гиперонов связана с глобальной поляризацией дочерних  $\Lambda$ -гиперонов:  
 $P_\Lambda = C_{\Xi\Lambda} P_\Xi$ ,  $C_{\Xi\Lambda} = 0.932$  – фактор передачи

