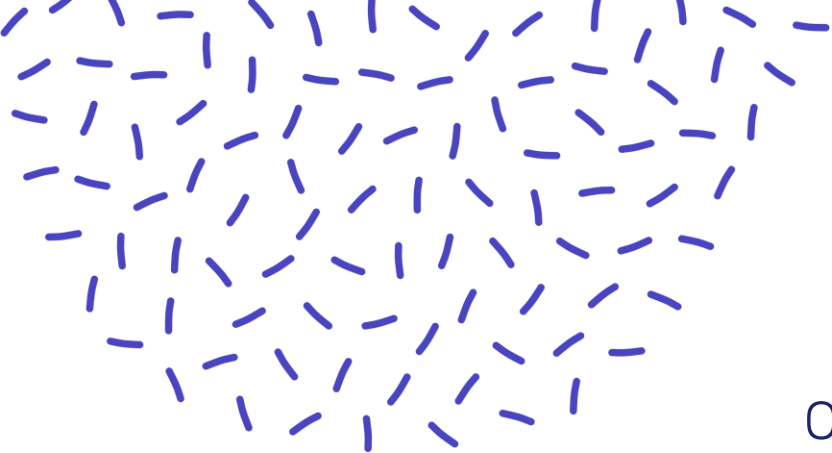


Общелабораторный семинар ЛФВЭ

Моделирование легких ядер и гиперядер в столкновениях тяжелых ионов в термодинамическом подходе при помощи генератора THESEUS



По материалам кандидатской диссертации



28. 02. 2025

Кожевникова Марина, ЛФВЭ ОИЯИ



01. Введение

Краткий обзор темы. Классификация моделей по способу работы с легкими ядрами и гиперядрами.

02. Описание модели 3FD и THESEUS

основные стадии моделирования, обновленная версия THESEUS-v2

03. Моделирование легких ядер

Расчеты быструх распределений, p_T и m_T -спектров, коллективных потоков, отношений выходов частиц при различных энергиях. Анализ полученных результатов.

04. Моделирование гиперядер

Расчет отношений выходов частиц, зависимость от среднего p_T , коллективные потоки, Анализ полученных результатов.

05. Выводы



Введение

Краткий обзор



Исследование свойств ядерной материи связано с фазовой диаграммой КХД. Вблизи критической точки и в области спинодальной нестабильности ожидается повышенный выход легких ядер.



Легкие ядра при умеренно релятивистских энергиях вносят значительный вклад в полный барионный заряд системы в конечном состоянии $\Rightarrow$ необходимость их корректного расчета



В настоящее время существует множество моделей, описывающих легкие ядра (коалесцентные, микроскопические, основанные на термодинамике)



Моделирование служит для подготовки экспериментальных программ для будущих экспериментов и помогает разобраться в физике процессов, происходящих в ядерной материи. Эксперименты: BES-RHIC, SPS, NICA and FAIR.

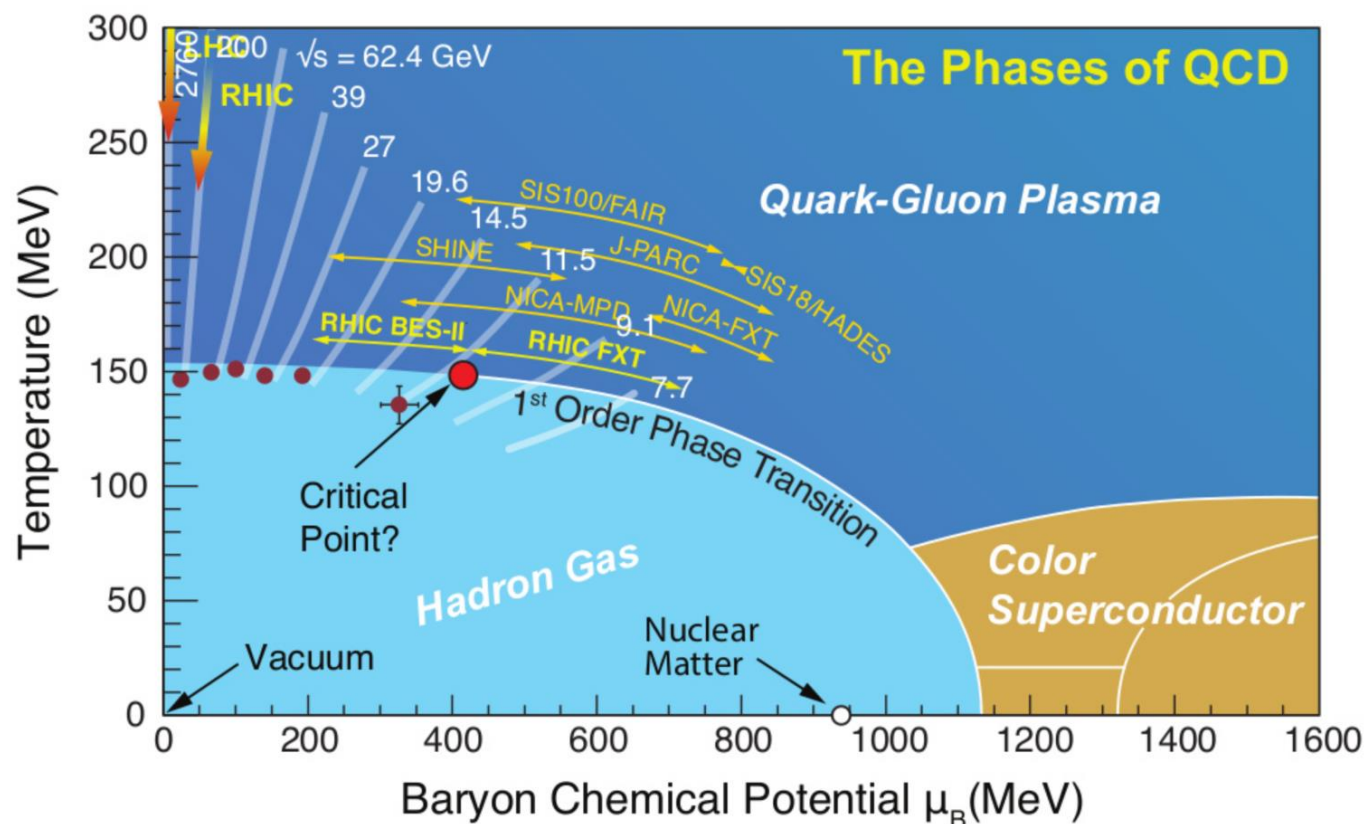


Рис.: Фазовая диаграмма КХД сильновзаимодействующей материи



Модели для описания легких (гипер)ядер

❑ Коалесценция

модель трехжидкостной гидродинамики (3FD), двухжидкостная модель, JAM, UrQMD

❑ Термодинамика

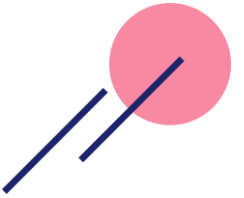
Статистическая модель, Blast-Wave. Адроны и легкие ядра моделируются единообразно, но термодинамические величины (температура, химический потенциал) фитируются.

❑ Микроскопический динамический подход

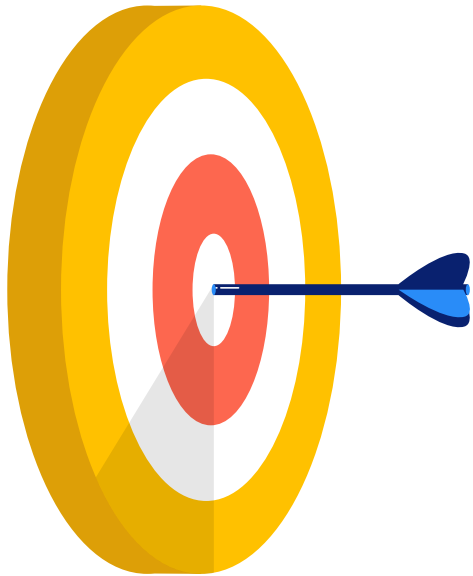
SMASH, PHQMD, LQMD, стохастический кинетический подход

❑ Термодинамика в THESEUS

Адроны и легкие ядра моделируются на одной основе, термодинамические величины (температура, химический потенциал) вычисляются в 3FD. **Не нужны дополнительные параметры!**



Цели работы

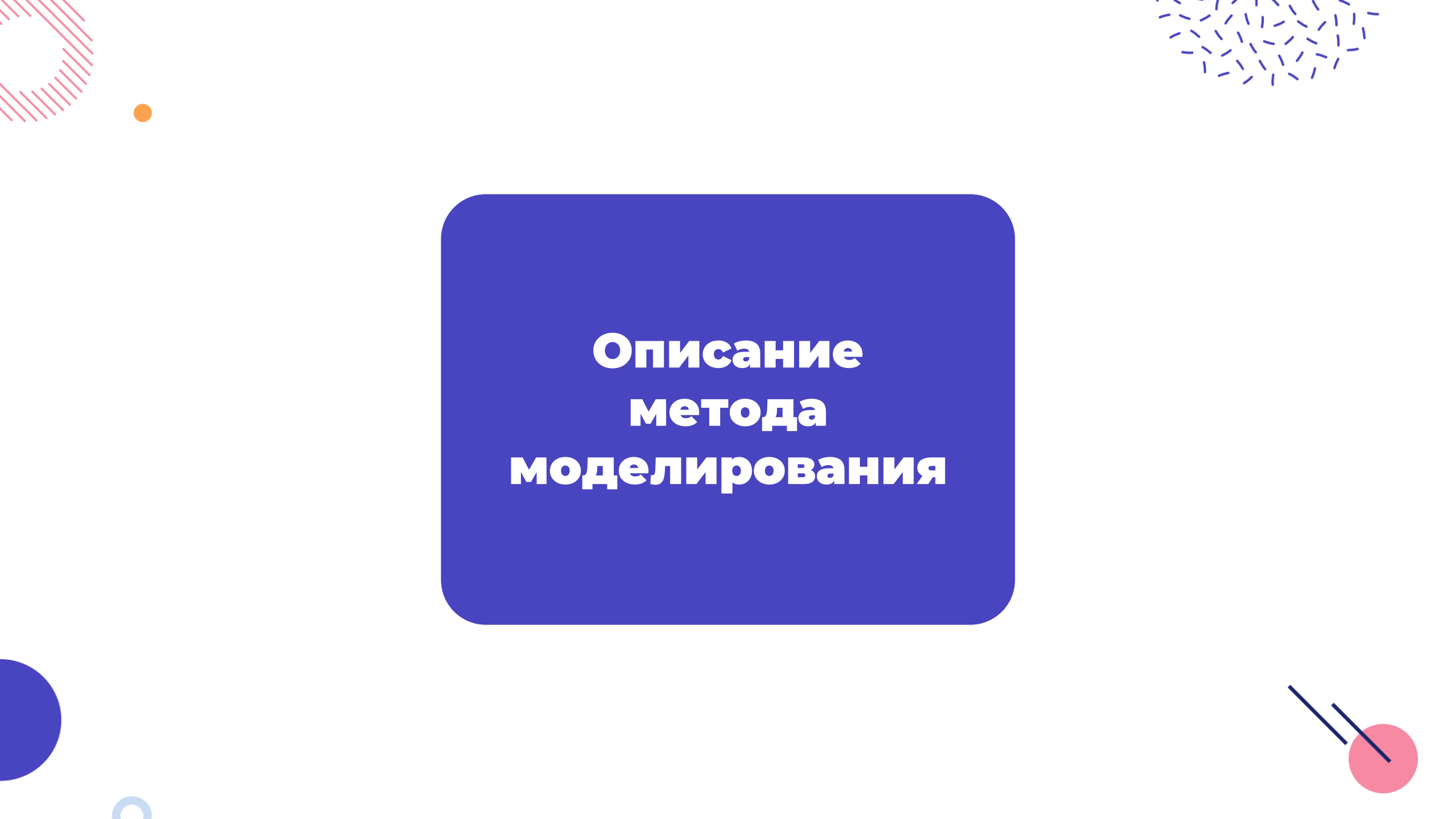


01.

Разработать новую версию THESEUS, способную корректно моделировать легкие ядра и гиперядра, а также их античастицы

02.

Получить различные результаты при помощи THESEUS при различных условиях (энергии столкновения тяжелых ядер, центральности), провести сравнение с имеющимися экспериментальными данными и проанализировать результаты



Описание метода моделирования

Модель 3FD (3-fluid dynamics)

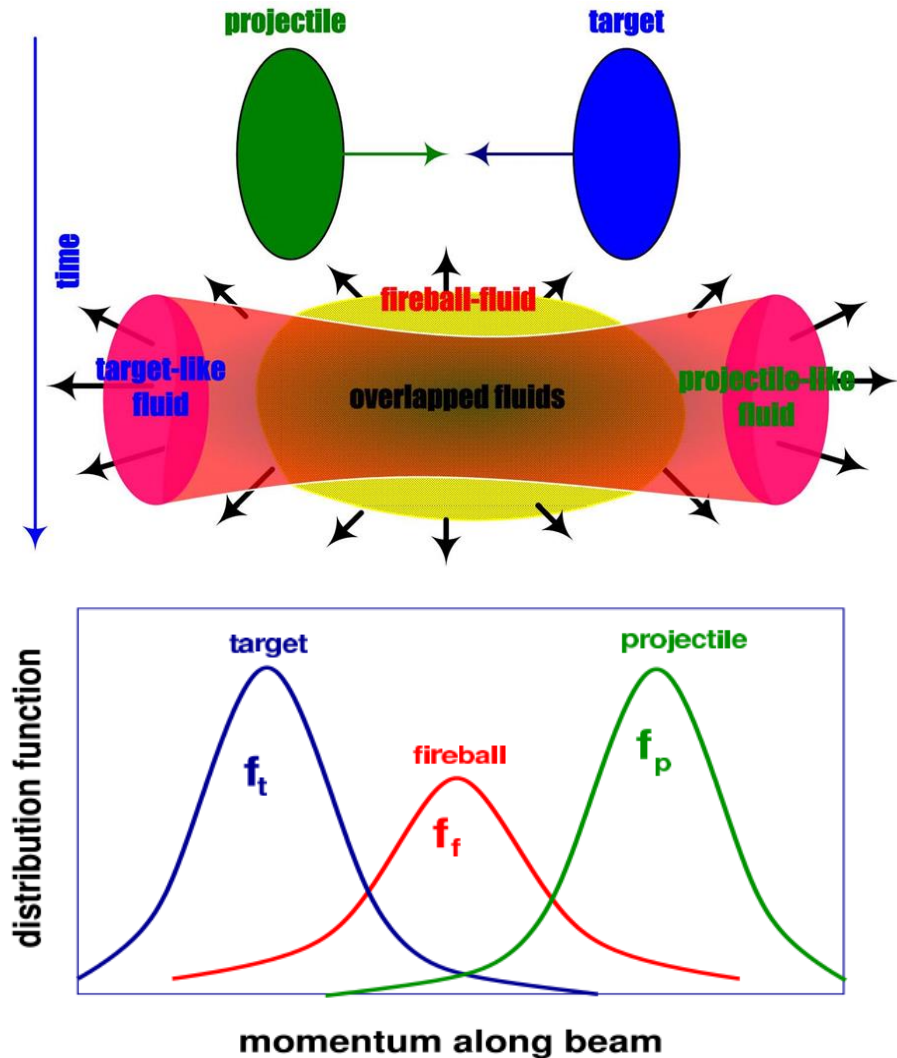


Рис. : Система сталкивающихся ядер и связанные с ней жидкости (вверху) и функции распределения в зависимости от импульса вдоль пучка (внизу)

Модель 3FD описывает динамику сильно взаимодействующей материи от ранней неравновесной стадии вплоть до замораживания. В модели материя описывается тремя жидкостями:

- **Две барионные жидкости**, связанные с начальными нуклонами, входящими в состав ядра-снаряда (**p**rojectile) и ядра-мишени (**t**arget);
- **Файрбольная жидкость** (**f**ireball), содержащая частицы, образующиеся в процессе эволюции системы, которые заселяют преимущественно область центральных быстрот.

Модель 3FD: основные уравнения

Target-like fluid:

$$\partial_\mu J_t^\mu = 0$$

Leading particles carry bar. charge

$$\partial_\mu T_t^{\mu\nu} = -F_{tp}^\nu + F_{ft}^\nu$$

exchange/emission

Projectile-like fluid:

$$\partial_\mu J_p^\mu = 0,$$

$$\partial_\mu T_p^{\mu\nu} = -F_{pt}^\nu + F_{fp}^\nu$$

Fireball fluid:

$$J_f^\mu = 0,$$

Baryon-free fluid

$$\partial_\mu T_f^{\mu\nu} = F_{pt}^\nu + F_{tp}^\nu - F_{fp}^\nu - F_{ft}^\nu$$

Source term

Exchange

The **source term** is delayed due to a formation time τ

Total energy-momentum conservation:

$$\partial_\mu (T_p^{\mu\nu} + T_t^{\mu\nu} + T_f^{\mu\nu}) = 0$$

Свойства модели:

- Начальные условия: два сферических ядра с резким краем и начальной барионной плотностью $n_B = 0.15 \text{ фм}^{-3}$, флуктуации отсутствуют.
- Конечная тормозная способность ядерной материи.
- Уравнение состояния.
- Гидродинамические уравнения с членами, отвечающими за трение, моделируют взаимодействие между жидкостями.
- Замораживание при плотности энергии $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$.



3FD: Yu.B. Ivanov, V.N. Russkikh, V.D. Toneev,
PHYSICAL REVIEW C 73, 044904 (2006)

Модель 3FD: уравнения состояния

Адронное: имеются только адронные состояния (адронный газ), отсутствует фазовый переход

Mishustin I. N., Russkikh V. N., Satarov L. M., Sov. J. Nucl. Phys. Vol. 54. P. 260–314 (1991)



С фазовым переходом 1-го рода: адронные состояния + КГП

A. Khvorostukhin, V.V. Skokov, V.D. Toneev, K. Redlich, EPJ C48, 531 (2006)



С кроссовером: адронные состояния + КГП с сосуществованием фаз (кроссовером) в широком диапазоне температур и барионных плотностей

A. Khvorostukhin, V.V. Skokov, V.D. Toneev, K. Redlich, EPJ C48, 531 (2006)

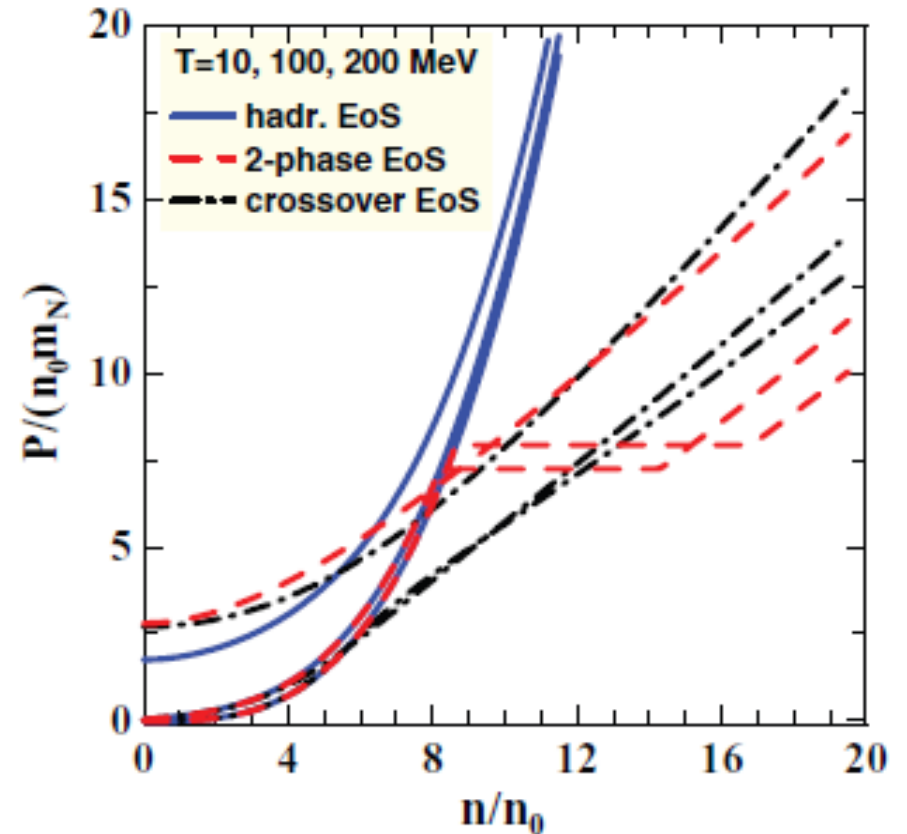


Рис. 3: Различные уравнения состояния на примере зависимости давления от барионной плотности при различных температурах.



- Генератор событий THESEUS (Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator Extended by UrQMD final State interactions) был впервые представлен в 2016 году в работе P. Batyuk et al., PHYSICAL REVIEW C 94, 044917 (2016).
- Генератор базируется на модели 3FD. Эта модель описывает гидродинамическую стадию эволюции системы,
- а THESEUS описывает следующую стадию, наступающую после замораживания: **партиклизацию – переход от жидкостного описания к кинетическому.**
- Кинетическая стадия моделируется при помощи модели UrQMD (Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics), описываются процессы адронного перерассеяния (или дожига).



3FD

- На выходе мы имеем Лагранжевы тестовые частицы (капли) для каждой жидкости α (= p, t or f).
- Капля = элемент гиперповерхности при замораживании
- Наблюдаемые = интегралы от адронных функций распределения по гиперповерхности при замораживании.
- Такие величины не удобны для применения экспериментальных аксептансов!

THESEUS

- THESEUS = 3FD + процедура Монте-Карло + дожиг UrQMD;
- Используются гиперповерхности при замораживании из 3FD (T, μ_B, μ_S) для генерации частиц $(x, y, z, p_x, p_y, p_z, E, \dots)$;
- На выходе: дерево в ROOT-файле, содержащее все сгенерированные частицы.
- Можно применять аксептанс.

THESEUS-v2: обновления

- В первоначальной версии THESEUS не было легких ядер. В обновленной версии (THESEUS-v2) есть легкие ядра и гиперядра, которые рассматриваются единообразно с другими частицами **термодинамически без использования дополнительных параметров**.
- Для включения легких (гипер)ядер (и их античастиц) пересчитывается барионный химический потенциал (исходя из сохранения локального барионного заряда):

$$\begin{aligned}
 & n_{\text{primordial}} N(x; \mu_B, T) + \sum_{\text{hadrons}} n_i(x; \mu_B, \mu_S, T) \\
 = & n_{\text{observable}} N(x; \mu'_B, T) + \sum_{\text{hadrons}} n_i(x; \mu'_B, \mu_S, T) \\
 & + \sum_{\text{nuclei}} n_c(x; \mu'_B, \mu_S, T).
 \end{aligned}$$

Nucleus($E[\text{MeV}]$)	J	decay modes, in %
d	1	Stable
t	1/2	Stable
^3He	1/2	Stable
^4He	0	Stable
$^4\text{He}(20.21)$	0	$p = 100$
$^4\text{He}(21.01)$	0	$n = 24, p = 76$
$^4\text{He}(21.84)$	2	$n = 37, p = 63$
$^4\text{He}(23.33)$	2	$n = 47, p = 53$
$^4\text{He}(23.64)$	1	$n = 45, p = 55$
$^4\text{He}(24.25)$	1	$n = 47, p = 50, d = 3$
$^4\text{He}(25.28)$	0	$n = 48, p = 52$
$^4\text{He}(25.95)$	1	$n = 48, p = 52$
$^4\text{He}(27.42)$	2	$n = 3, p = 3, d = 94$
$^4\text{He}(28.31)$	1	$n = 47, p = 48, d = 5$
$^4\text{He}(28.37)$	1	$n = 2, p = 2, d = 96$
$^4\text{He}(28.39)$	2	$n = 0.2, p = 0.2, d = 99.6$
$^4\text{He}(28.64)$	0	$d = 100$
$^4\text{He}(28.67)$	2	$d = 100$
$^4\text{He}(29.89)$	2	$n = 0.4, p = 0.4, d = 99.2$
$^3_{\Lambda}\text{H}$	1/2	Stable
$^4_{\Lambda}\text{He}$	0	Stable

Таблица: Виды стабильных легких ядер, гиперядер, а также нестабильные состояния ^4He (свойства нуклидов из базы данных BNL) в THESEUS-v2.

THESEUS-v2: обновления

- Нестабильные легкие ядра распадаются и вносят вклад в распределения стабильных легких ядер.
- Нет дожига для легких ядер, потому что UrQMD их не обрабатывает. Мы моделируем стадию дожига **поздним замораживанием** с плотностью энергии $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.2 \text{ ГэВ/фм}^3$, которое подходит для большинства видов легких ядер. Это значение одинаково для всех энергий столкновения, центральностей и комбинаций сталкивающихся ядер, см.

М. Kozhevnikova, Yu.B. Ivanov Phys.Rev.C 107 (2023) 2, 024903

Nucleus($E[\text{MeV}]$)	J	decay modes, in %
d	1	Stable
t	1/2	Stable
^3He	1/2	Stable
^4He	0	Stable
$^4\text{He}(20.21)$	0	$p = 100$
$^4\text{He}(21.01)$	0	$n = 24, p = 76$
$^4\text{He}(21.84)$	2	$n = 37, p = 63$
$^4\text{He}(23.33)$	2	$n = 47, p = 53$
$^4\text{He}(23.64)$	1	$n = 45, p = 55$
$^4\text{He}(24.25)$	1	$n = 47, p = 50, d = 3$
$^4\text{He}(25.28)$	0	$n = 48, p = 52$
$^4\text{He}(25.95)$	1	$n = 48, p = 52$
$^4\text{He}(27.42)$	2	$n = 3, p = 3, d = 94$
$^4\text{He}(28.31)$	1	$n = 47, p = 48, d = 5$
$^4\text{He}(28.37)$	1	$n = 2, p = 2, d = 96$
$^4\text{He}(28.39)$	2	$n = 0.2, p = 0.2, d = 99.6$
$^4\text{He}(28.64)$	0	$d = 100$
$^4\text{He}(28.67)$	2	$d = 100$
$^4\text{He}(29.89)$	2	$n = 0.4, p = 0.4, d = 99.2$
$^3_{\Lambda}\text{H}$	1/2	Stable
$^4_{\Lambda}\text{He}$	0	Stable

Таблица: Виды стабильных легких ядер, гиперядер, а также нестабильные состояния ^4He (свойства нуклидов из базы данных BNL) в THESEUS-v2.

THESEUS-v2: позднее замораживание

Для легких ядер модель UrQMD не способна моделировать стадию дожига. Поэтому мы моделируем эту стадию **поздним замораживанием**.

Самое подходящее значение, как видно из результатов для протонов: $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.2 \text{ ГэВ/фм}^3$.

Используются протоны, т.к. они тесно связаны с легкими ядрами.

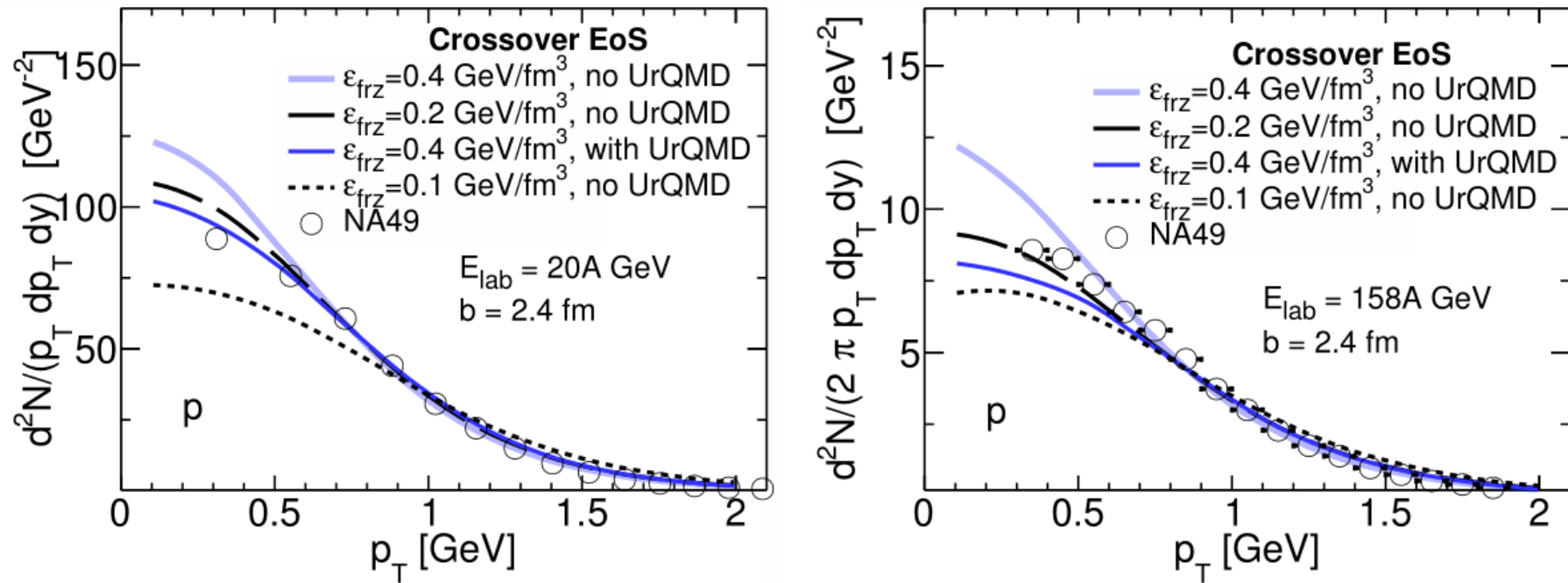


Рис.: Спектры по поперечным импульсам для протонов в центральных столкновениях Au+Au.

Схема моделирования эволюции системы сталкивающихся тяжелых ядер

Начальное
состояние

Гидродинамическая
эволюция

Партиклизация

Дожиг

Детектор



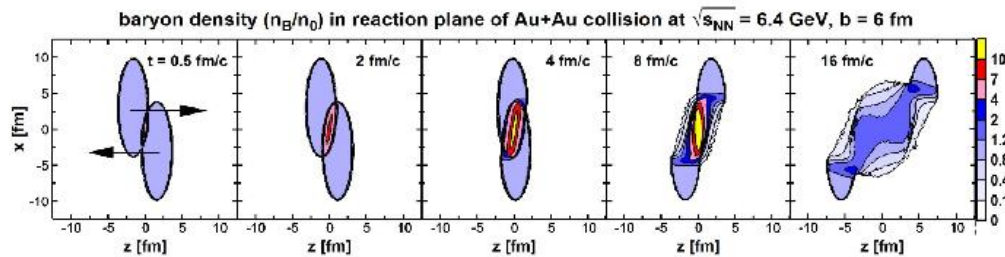
3FD

3FD

THESEUS-v2

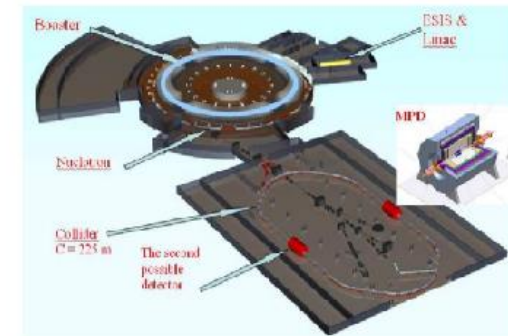
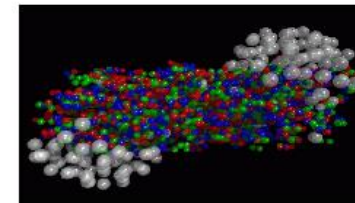
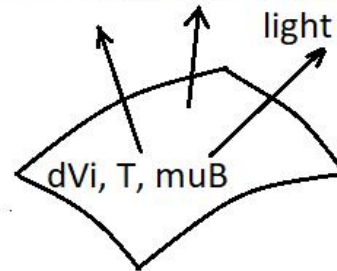
UrQMD

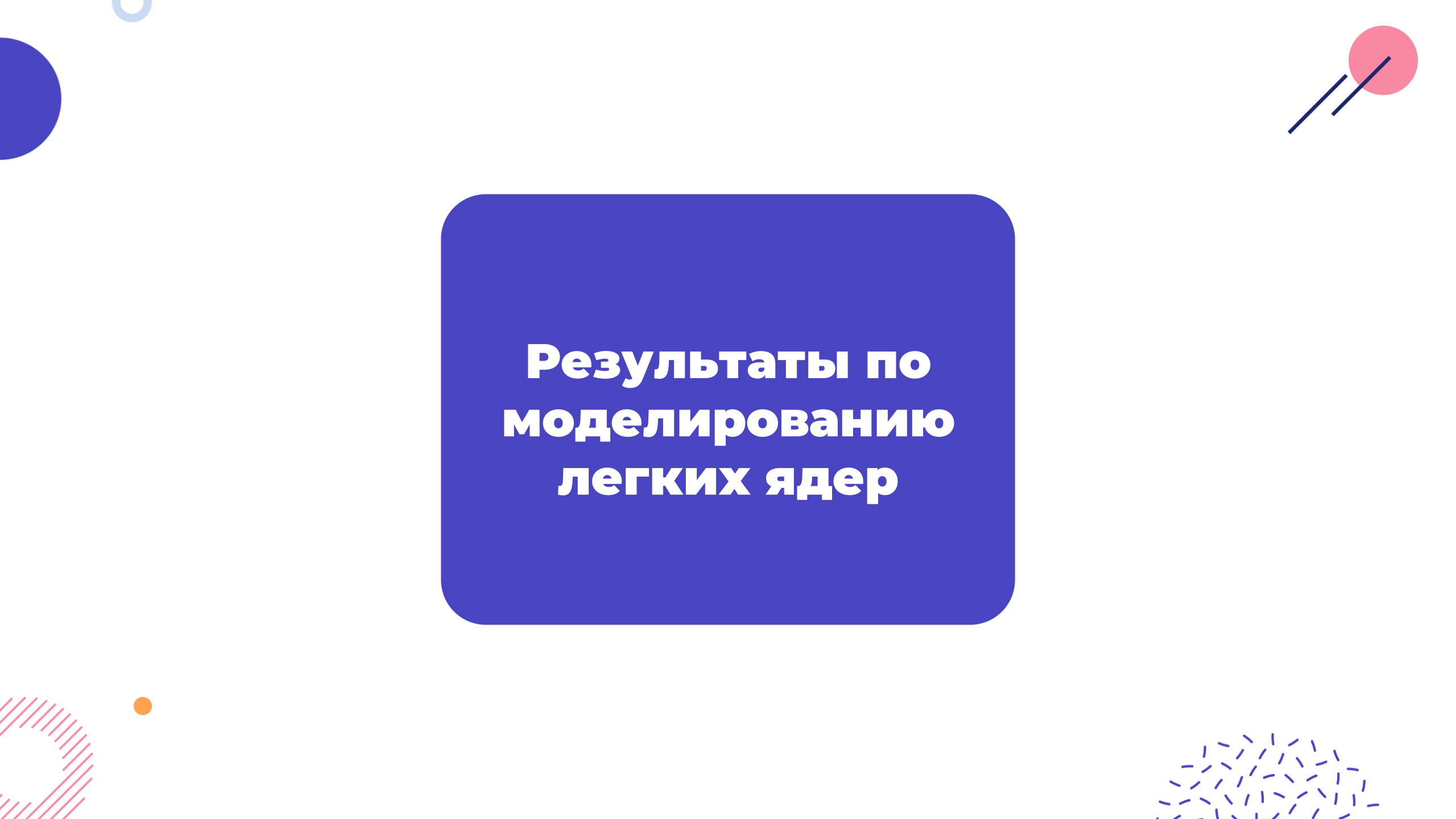
MPD



hadrons $\{x, y, z, E, p_x, p_y, p_z, \text{etc.}\}$

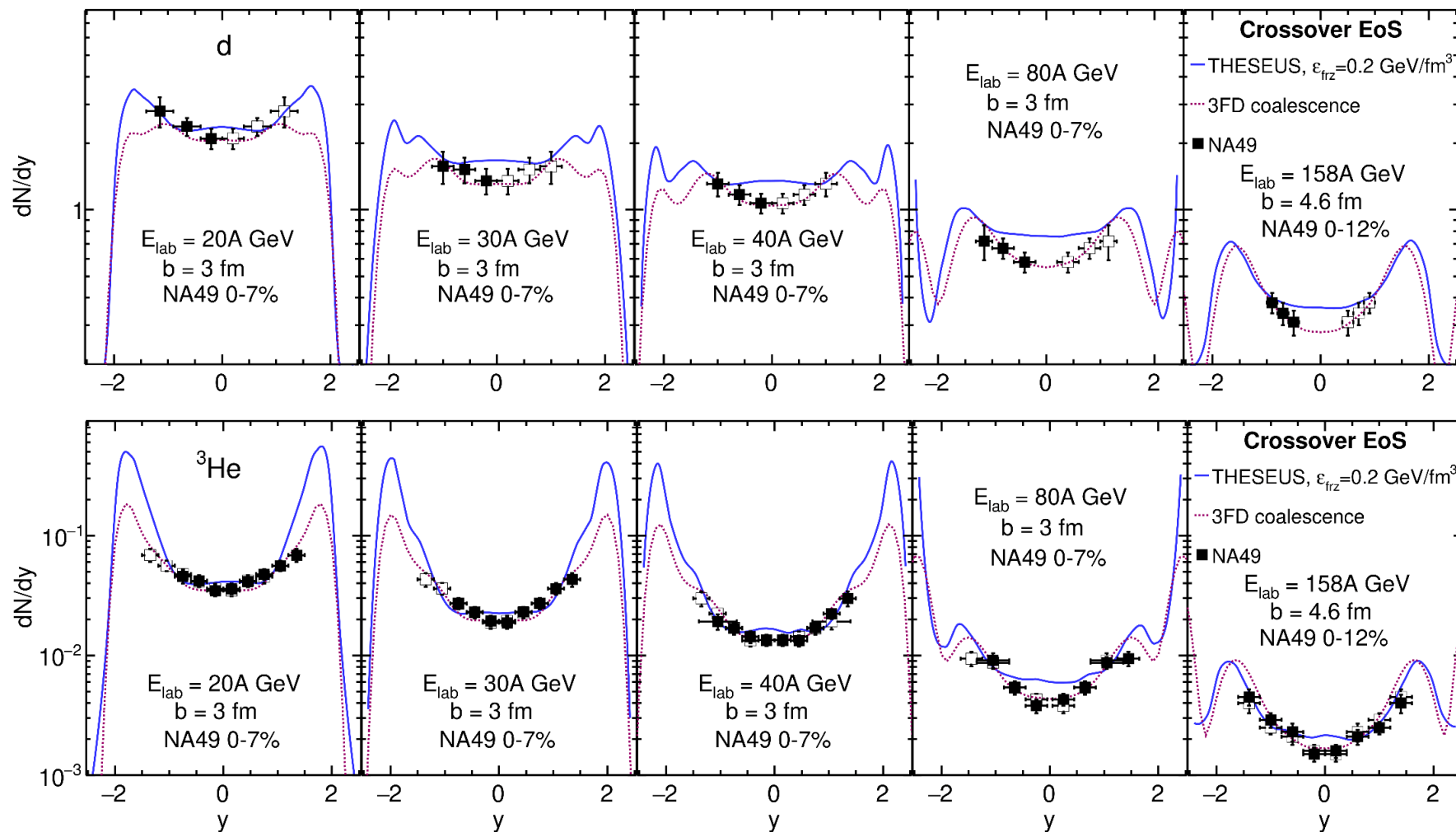
light nuclei





Результаты по моделированию легких ядер

Быстротные распределения



Продольная быстрота:

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

p_z - импульс вдоль пучка

Ivanov Y. B., Soldatov A. A. Eur. Phys. J. A. — 2017. — Vol. 53, no. 11. — P. 218

Anticic T. [et al.]. Phys. Rev. C. — 2016. — Vol. 94, no. 4. — P. 044906.

Рис.: Быстротные распределения дейтронов (верхний ряд) и ^3He (нижний ряд) в центральных столкновениях Pb+Pb. Приведены результаты со стандартным замораживанием $\epsilon_{\text{frz}} = 0.4$ ГэВ/фм³ (бледно-голубые линии) и поздним $\epsilon_{\text{frz}} = 0.2$ ГэВ/фм³ (синие линии), без вклада возбужденных низколежащих резонансов $^4\text{He}^*$ (черные линии), результаты 3FD коалесценции и экспериментальные данные NA49. Моделирование с поздним замораживанием дает в целом разумный результат, но наблюдается ухудшение с ростом энергии. Для ^3He результат оказался даже лучше, чем для дейтронов, у которых масса меньше.

Отношения выходов частиц

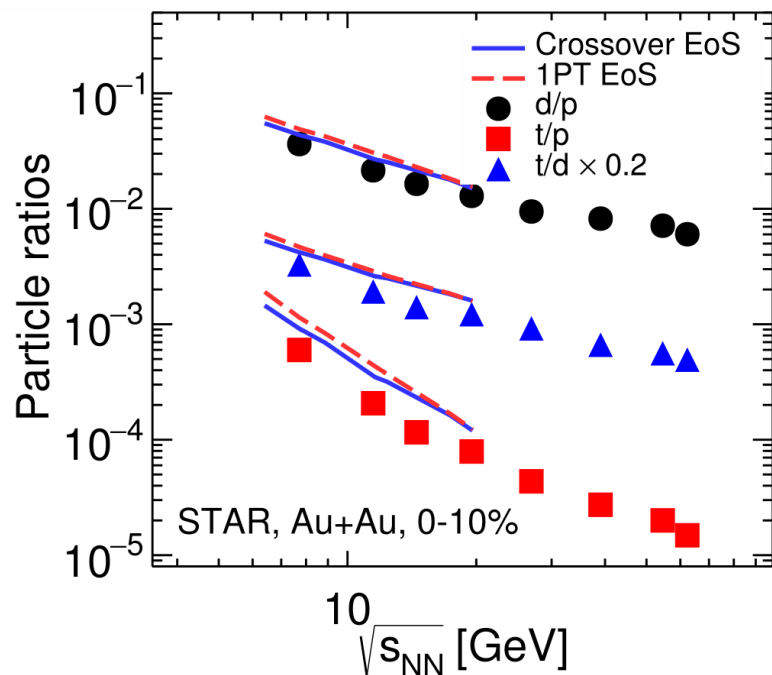


Рис.: Зависимость от энергии отношений выходов d/p, t/p, и t/d в области центральных быстрот для центральных (0-10%) Au+Au столкновений. Моделирование проведено при $b = 4$ фм для Au+Au и при $b = 3$ фм для Pb+Pb в бине по быстроте $|y| < 0.5$.

Показано, что на отношение $N(t) \times N(p)/N^2(d)$ сильно влияют протоны, полученные от слабых распадов. Вычисленный результат с протонами без вклада от слабых распадов превышает предсказанное значение: 0.29 (Shuryak E., Torres-Rincon J. M// Eur. Phys. J. A. — 2020. — Vol. 56, no. 9. — P. 241), т.к. есть вклад от околоцентральных источников, а не только центральных. Необходимо корректно учитывать слабые распады, а UrQMD не является достаточно точной для этого.

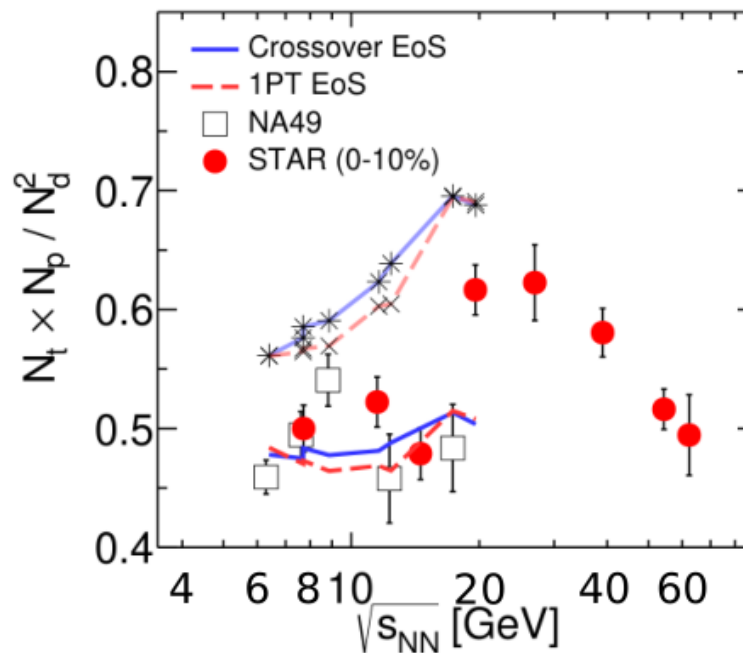


Рис.: Зависимость от энергии отношения $N(t) \times N(p)/N^2(d)$ в области центральных быстрот для центральных столкновений Au+Au и Pb+Pb. Моделирование при $b = 4$ фм для Au+Au, при $b = 3$ фм ($\sqrt{s_{NN}} < 17.4$ ГэВ) и при $b = 4.6$ фм ($\sqrt{s_{NN}} = 17.4$ фм) для Pb+Pb в бине по быстроте $|y| < 0.5$. $N(p)$ включает протоны, полученные без вклада от слабых распадов (две верхние линии, помеченные крестами) и без этого вклада (две нижние линии)

STAR:

Zhang D. Light Nuclei (d, t) Production in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ -200 GeV // Nucl. Phys. A / ed. by F. Liu, E. Wang, X.-N. Wang, N. Xu, B.-W. Zhang. — 2021. — Vol. 1005. — P. 121825. — arXiv: [2002.10677 \[nucl-ex\]](https://arxiv.org/abs/2002.10677).

NA49:

Anticic T. [et al.]. Production of deuterium, tritium, and He3 in central Pb + Pb collisions at 20A, 30A, 40A, 80A, and 158A GeV at the CERN Super Proton Synchrotron // Phys. Rev. C. — 2016. — Vol. 94, no. 4. — P. 044906. — arXiv: [1606.04234 \[nucl-ex\]](https://arxiv.org/abs/1606.04234).

Коллективные потоки: определение

Одночастичное распределение частиц, разложенное в ряд Фурье по азимутальному углу φ импульса частицы $\mathbf{p}$:

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

где $v_n = \langle \cos(n(\varphi - \Psi_{RP})) \rangle$, а усреднение происходит по всем рассматриваемым частицам во всех событиях.

Здесь первый коэффициент v_1 — **направленный поток**, а второй v_2 — **эллиптический поток**.

$$v_1^{(a)}(y) = \frac{\int d^2p_T \left(\frac{p_x}{p_T} \right) E \frac{dN_a}{d^3p}}{\int d^2p_T E \frac{dN_a}{d^3p}}, \quad v_2^{(a)}(y) = \frac{\int d^2p_T \left(\frac{p_x^2 - p_y^2}{p_T^2} \right) E \frac{dN_a}{d^3p}}{\int d^2p_T E \frac{dN_a}{d^3p}}$$

В THESEUS потоки рассчитываются через сумму по адронам.

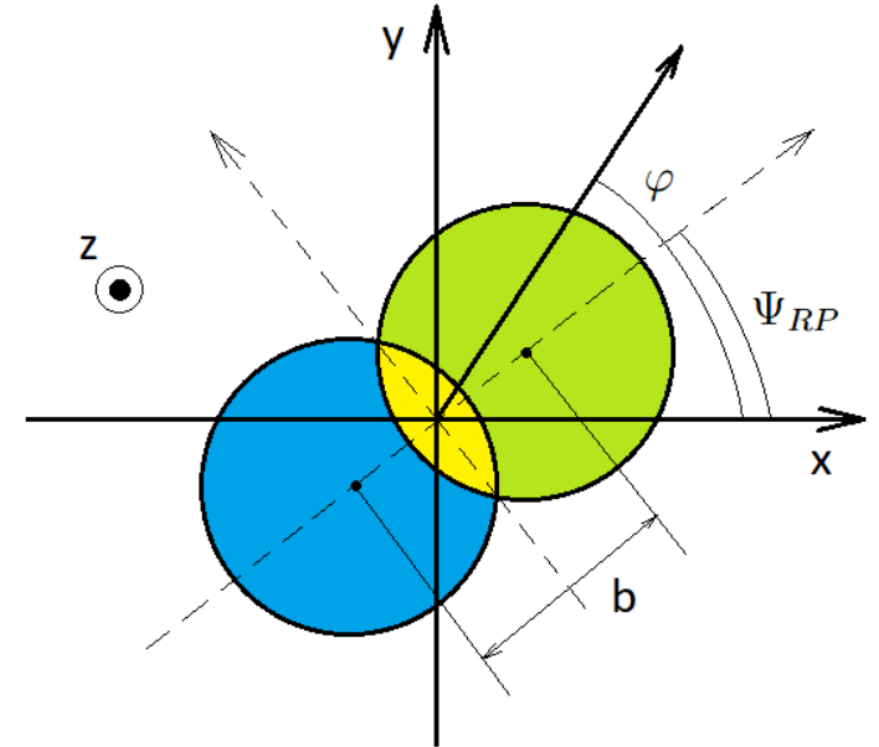


Рис.: Схема сталкивающихся ядер.

Направленный поток

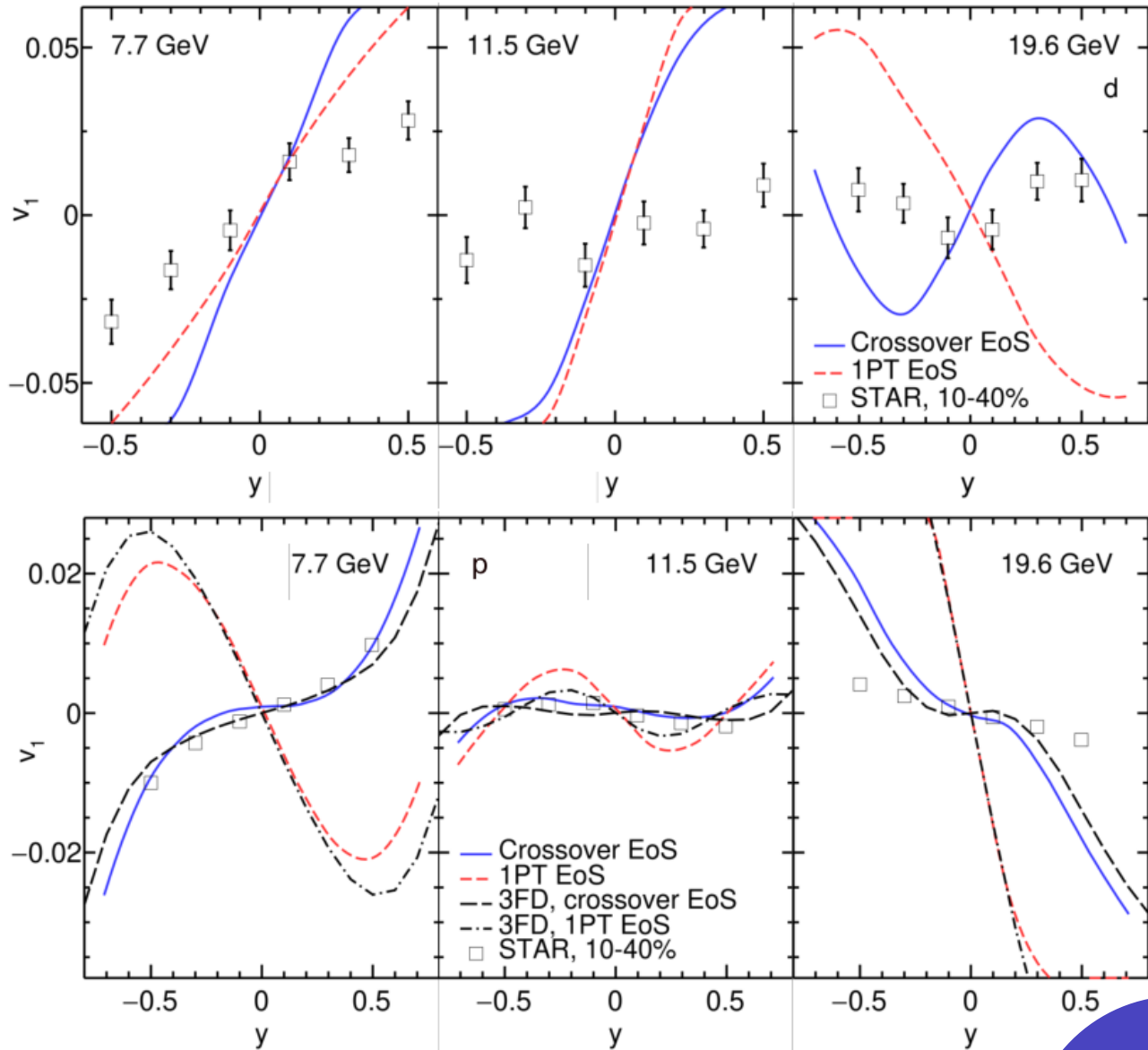


Рис.: Направленный поток для дейтронов (верхний ряд) и протонов (нижний ряд) в зависимости от быстроты в полуцентральных столкновениях ($b = 6$ фм) столкновений Au+Au, полученный для различных энергий и двух уравнений состояния: с фазовым переходом 1-го рода и с кроссовером.

Для сравнения приведены данные STAR:

Adam J. [et al.]. // Phys. Rev. C. — 2020. — Vol. 102, no. 4. — P. 044906.

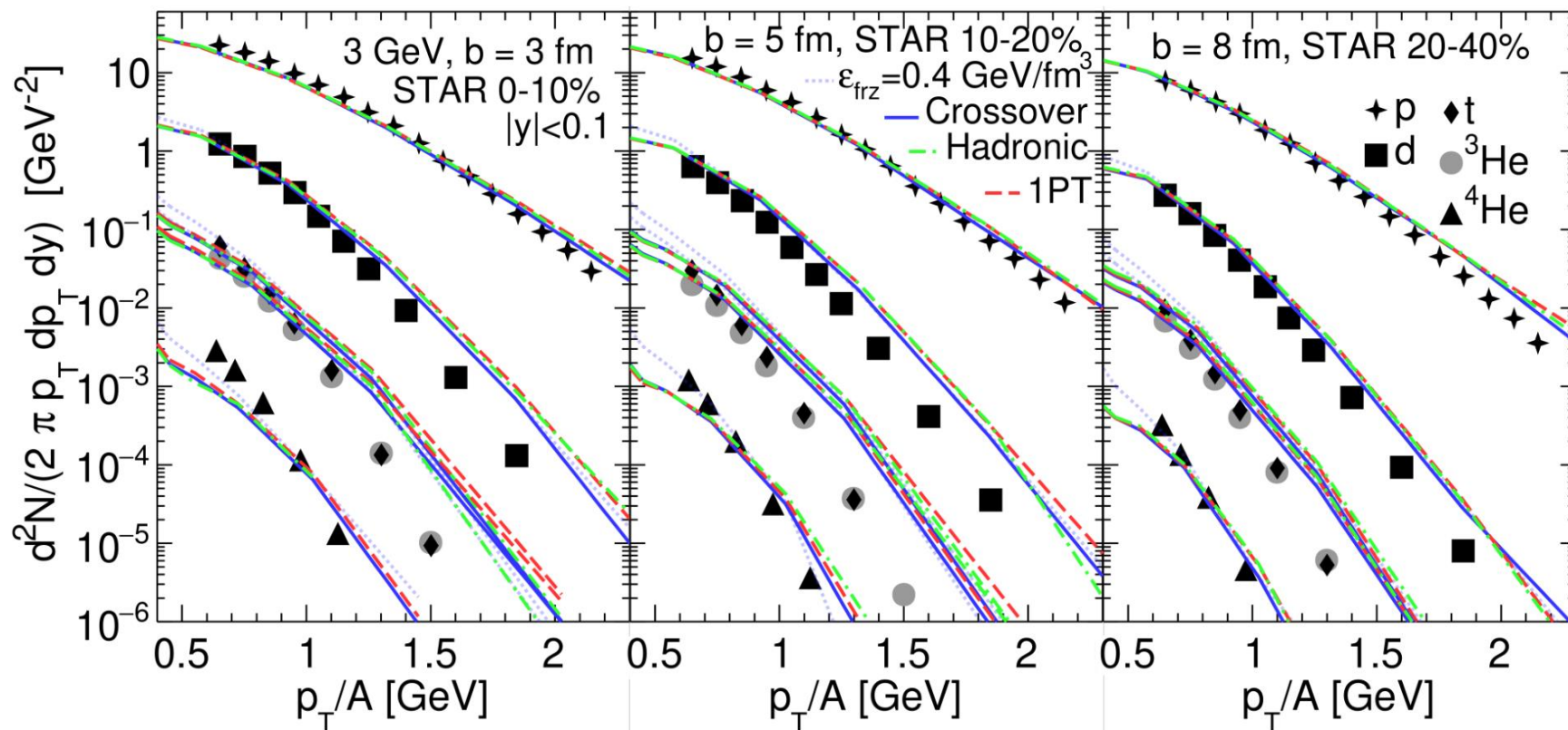
Adamczyk L. [et al.]. // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Vol. 112, no. 16. — P. 162301.

Модель не смогла должным образом описать потоки для дейтронов.

Может быть, это связано с критической точкой КХД фазовой диаграммы в этой области энергий

STAR preliminary data: Pandav, plenary talk at CPOD 2024, <https://conferences.lbl.gov/event/1376/contributions/8772/>

3 ГэВ: спектры по поперечному импульсу



Поперечный импульс:

$$p_T^2 = p_x^2 + p_y^2$$

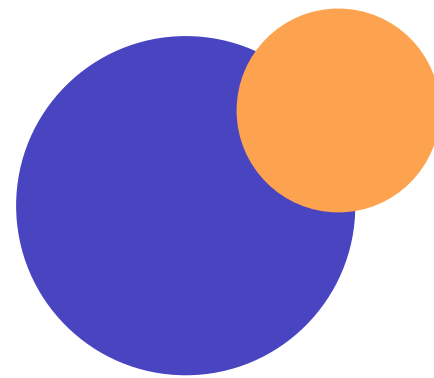


Рис.: Результаты THESEUS спектры по поперечному импульсу для протонов и легких ядер (дейтронов, тритонов, ^3He , ^4He) в бине $|y| < 0.1$ в сравнении с данными STAR (arXiv: 2311.11020 [nucl-ex]). Расчеты выполнены для трех различных уравнений состояния и при позднем замораживании ($\epsilon_{\text{frz}} = 0.2$ ГэВ/фм³). Для сравнения показаны результаты при стандартном замораживании ($\epsilon_{\text{frz}} = 0.4$ ГэВ/фм³) для уравнения состояния с кроссовером.

Моделирование с поздним замораживанием дает разумный и, в целом, лучший результат, чем со стандартным замораживанием. Нет зависимости от уравнения состояния – **вещество эволюционирует в адронной фазе.**

Завышение спектров при больших p_T – эта неточность связана с особенностью модели 3FD.

3 ГэВ: быстротные распределения

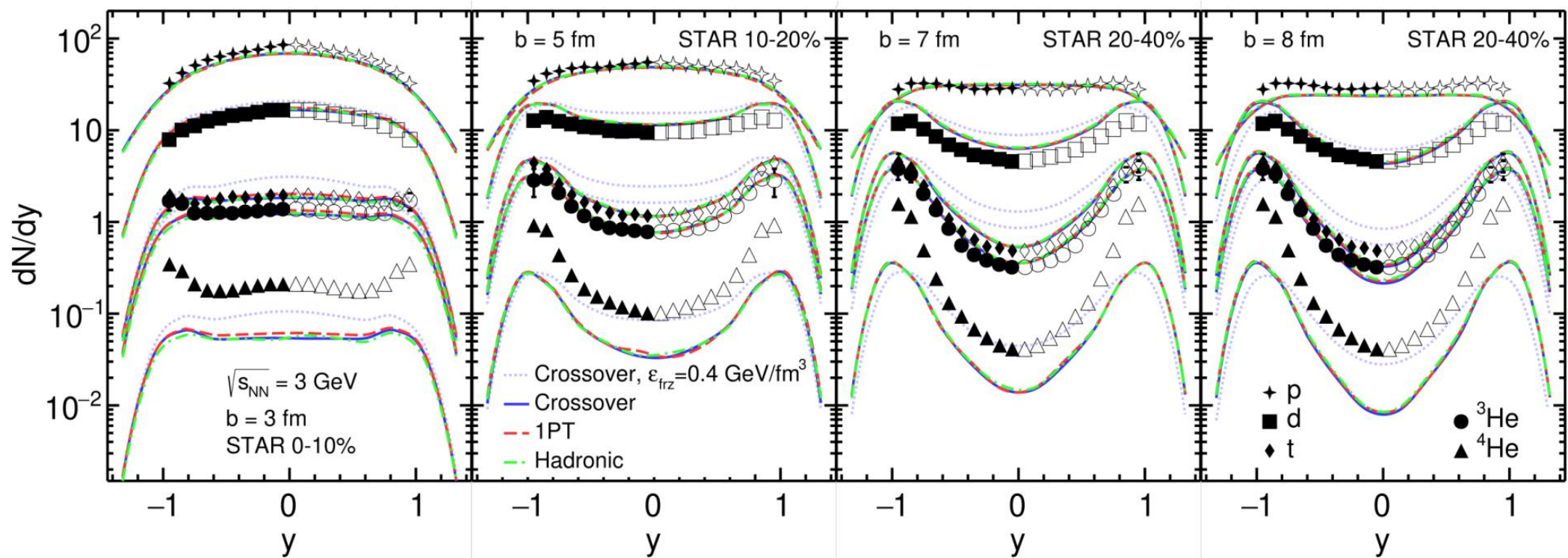


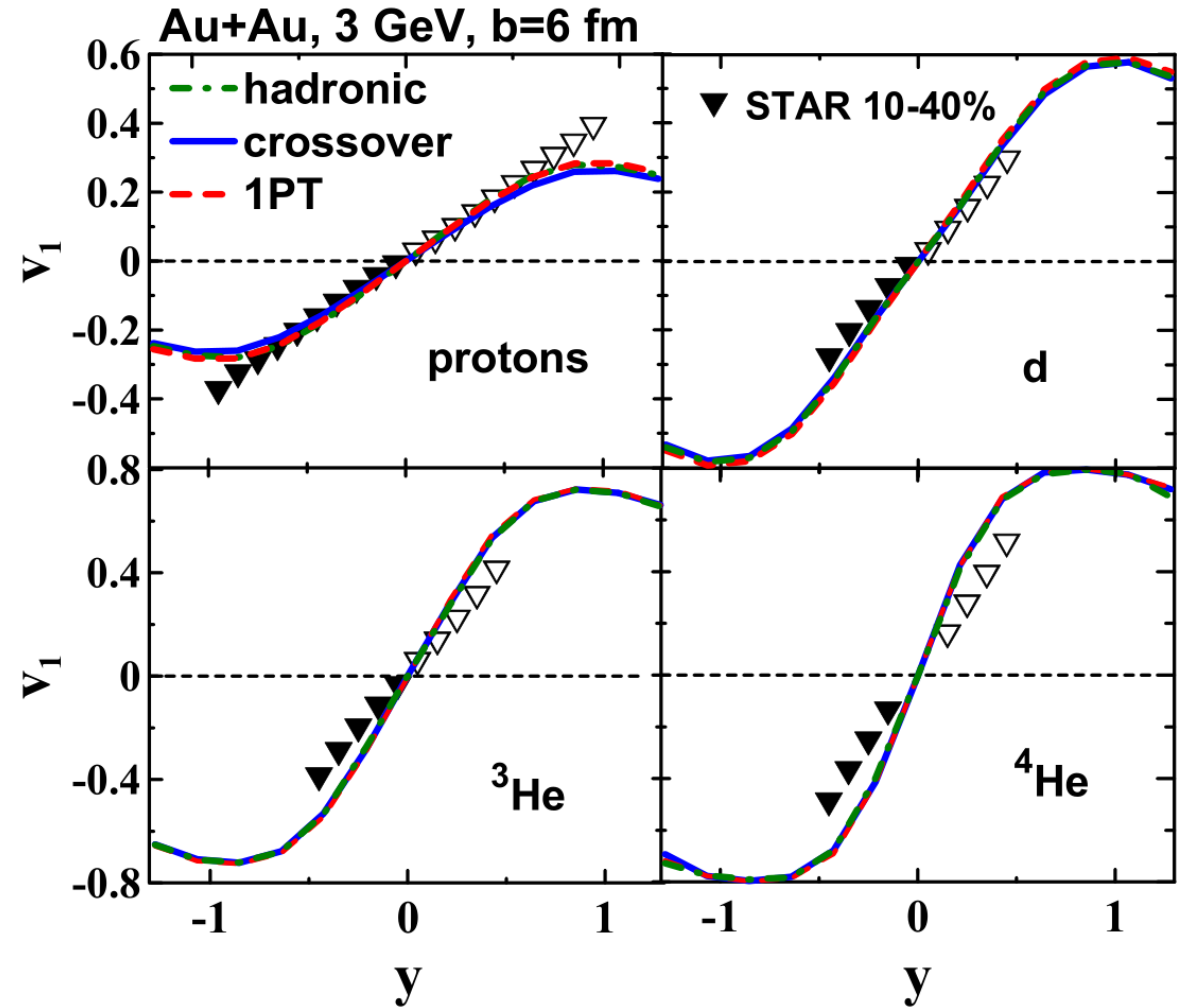
Рис.: Быстротные распределения для протонов и легких ядер (дейтронов, тритонов, ^3He , ^4He) в сравнении с данными STAR (arXiv: 2311.11020 [nucl-ex]). Расчеты выполнены для трех различных уравнений состояния и при позднем замораживании ($\epsilon_{\text{frz}} = 0.2 \text{ ГэВ/фм}^3$). Для сравнения показаны результаты при стандартном замораживании ($\epsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$) для уравнения состояния с кроссовером.

- Моделирование с поздним замораживанием дает разумный и, в целом, лучший результат, чем со стандартным замораживанием. Нет зависимости от уравнения состояния – **вещество эволюционирует в адронной фазе.**
- Хорошо описывается разница в формах распределений протонов и легких ядер в зависимости от центральности.
- Результаты при $b = 7 \text{ fm}$ and $b = 8 \text{ fm}$ иллюстрируют неопределенность выбора прицельного параметра, и $b = 7 \text{ fm}$ дает, в целом, лучший результат.
- Для d , t и ^3He больше подходит позднее замораживание ($\epsilon_{\text{frz}} = 0.2 \text{ ГэВ/фм}^3$), а для ^4He – стандартное ($\epsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$). ^4He лучше выживает при дожиге, т.к. это более пространственно компактный и сильносвязанный объект.

3 ГэВ: направленный поток

Рис.: Результаты THESEUS по направленному потоку v_1 протонов и легких ядер (d , ^3He , ^4He) в сравнении с данными STAR, вычисленные при трёх различных уравнениях состояния.

- Почти идеальное описание протонов STAR, за исключением периферических быстрот.
- Согласие с данными STAR ухудшается с увеличением атомного числа легкого ядра.
- Выбор уравнения состояния не оказывает почти никакого влияния на результат $\rightarrow$ в динамике доминирует адронная фаза.

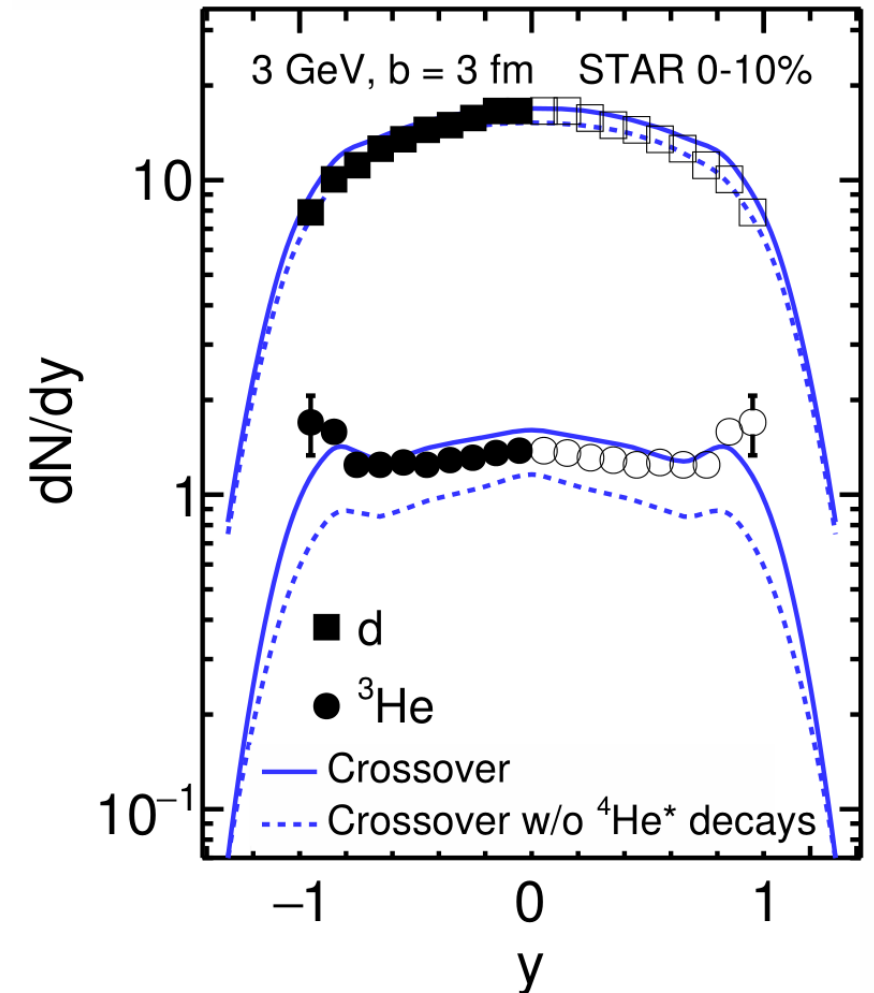


STAR:
Abdallah M. S. [et al.]. // Phys. Lett. B. —2022.—Vol.827. —P. 136941;
Abdallah M. S. [et al.]. // Phys. Lett. B. —2022.—Vol.827. —P.137003.

3 ГэВ: вклад нестабильных состояний

Рис.: Быстротные распределения дейтронов и ядер ^3He при центральных столкновениях Au+Au, полученные в сценарии с кроссовером. Результаты со вкладами от распадов нестабильных ядер $^4\text{He}^*$ (сплошные линии) и без них (пунктир). Данные STAR приведены для сравнения (arXiv: 2311.11020 [nucl-ex])

- Обнаружено (Phys. Rev. C 107, no.2, 024903 (2023), Particles 6, no.1, 440-450), что вклад от распадов $^4\text{He}^*$ в дейтроны пренебрежимо мал, но более существенен для тритонов и ядер ^3He при энергиях $\sqrt{s_{NN}} > 6$ ГэВ при периферических быстротах.
- При $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ предсказаны (V. Vovchenko, et al., Phys. Lett. B, 135746 (2020)), вклады $\sim 60\%$ для тритонов и ^3He даже при $y=0$. Наш расчет подтверждает: вклад $\sim 20\%$ для дейтронов и 50–100% (в зависимости от быстроты) для ^3He .
- Также показано, что поток v_1 дейтронов, тритонов и ядер ^3He оказался нечувствителен к вкладом от $^4\text{He}^*$.





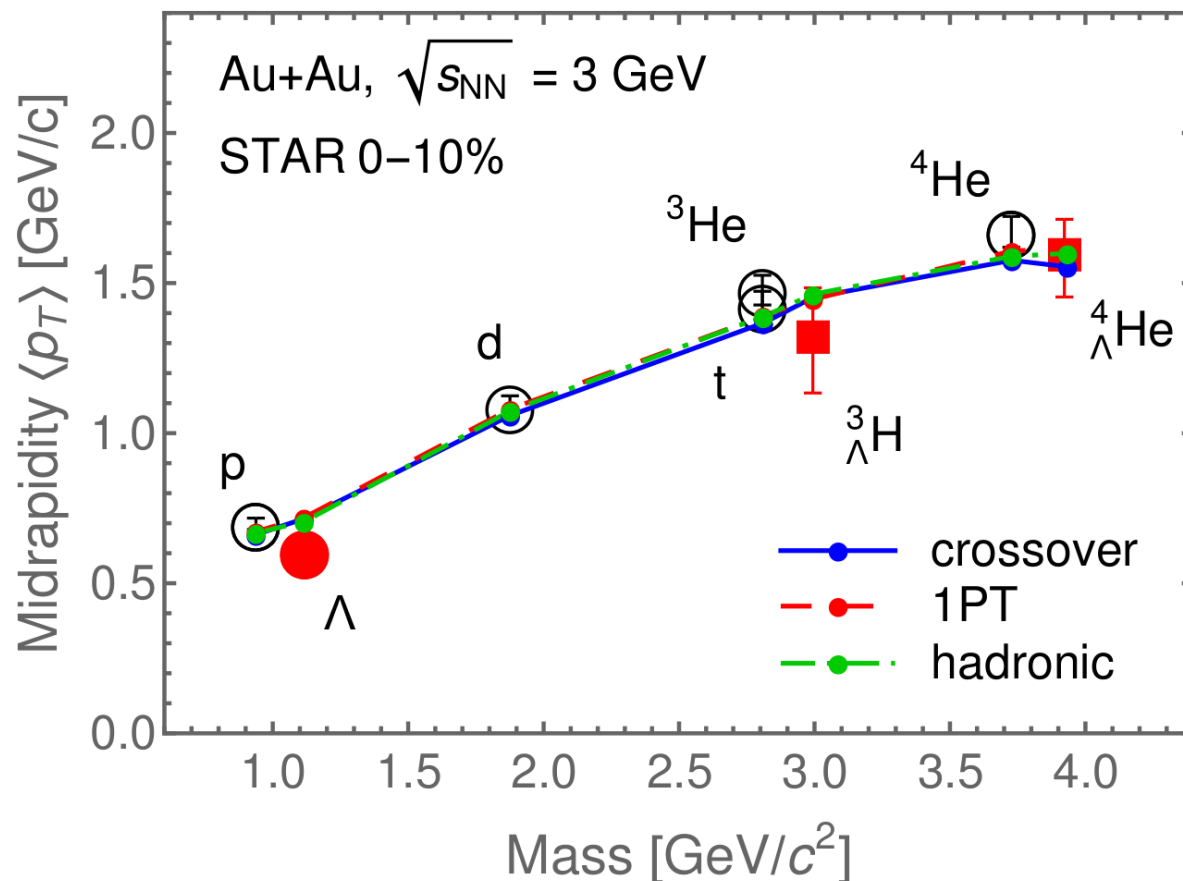
Результаты по моделированию гиперядер

Средний поперечный импульс

Рис.: Средний поперечный импульс в области центральных быстрот для p , Λ и различных видов легких ядер и гиперядер. Для сравнения приведены данные STAR. Расчеты выполнены для трёх уравнений состояния.

- Для p и Λ используется стандартное замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4$ ГэВ/фм³ с последующим дожигом UrQMD;
- Для d , t и ${}^3\text{He}$ используется позднее замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.2$ ГэВ/фм³;
- Для ${}^4\text{He}$ и ${}^4_\Lambda\text{He}$ используется стандартное замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4$ ГэВ/фм³.

Результаты хорошо согласуются с экспериментом, воспроизводятся даже небольшие отклонения от прямой.



STAR:

arXiv: 2311.11020 [nucl-ex]

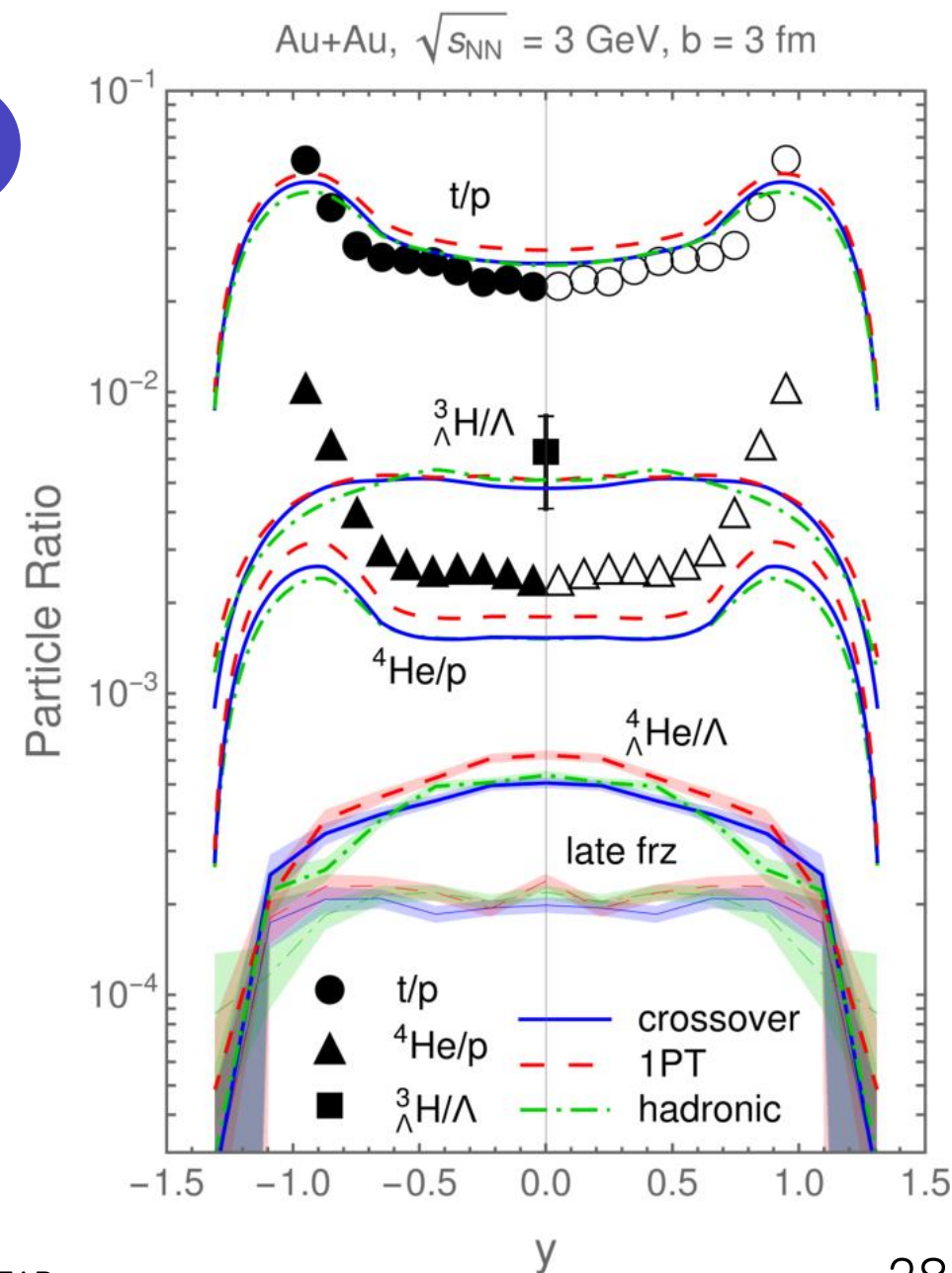
JiY. // EPJ Web Conf. — 2023. — Vol. 276. — P. 04003.

ОТНОШЕНИЯ ВЫХОДОВ ЧАСТИЦ

Рис.: отношения выходов частиц в зависимости от быстроты для t/p , ${}^3\text{He}/p$, ${}^3_\Lambda\text{H}/\Lambda$, ${}^4\text{He}/\Lambda$ в сравнении с данными STAR. Расчеты выполнены с тремя уравнениями состояния.

- Для p и Λ используется стандартное замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$ с последующим дожигом UrQMD;
- для t и ${}^3_\Lambda\text{He}$ используется позднее замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.2 \text{ ГэВ/фм}^3$;
- для ${}^4\text{He}$ и ${}^4_\Lambda\text{He}$ используется стандартное замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$;
- предсказание для ${}^4_\Lambda\text{He}$ со стандартным и поздним замораживанием.

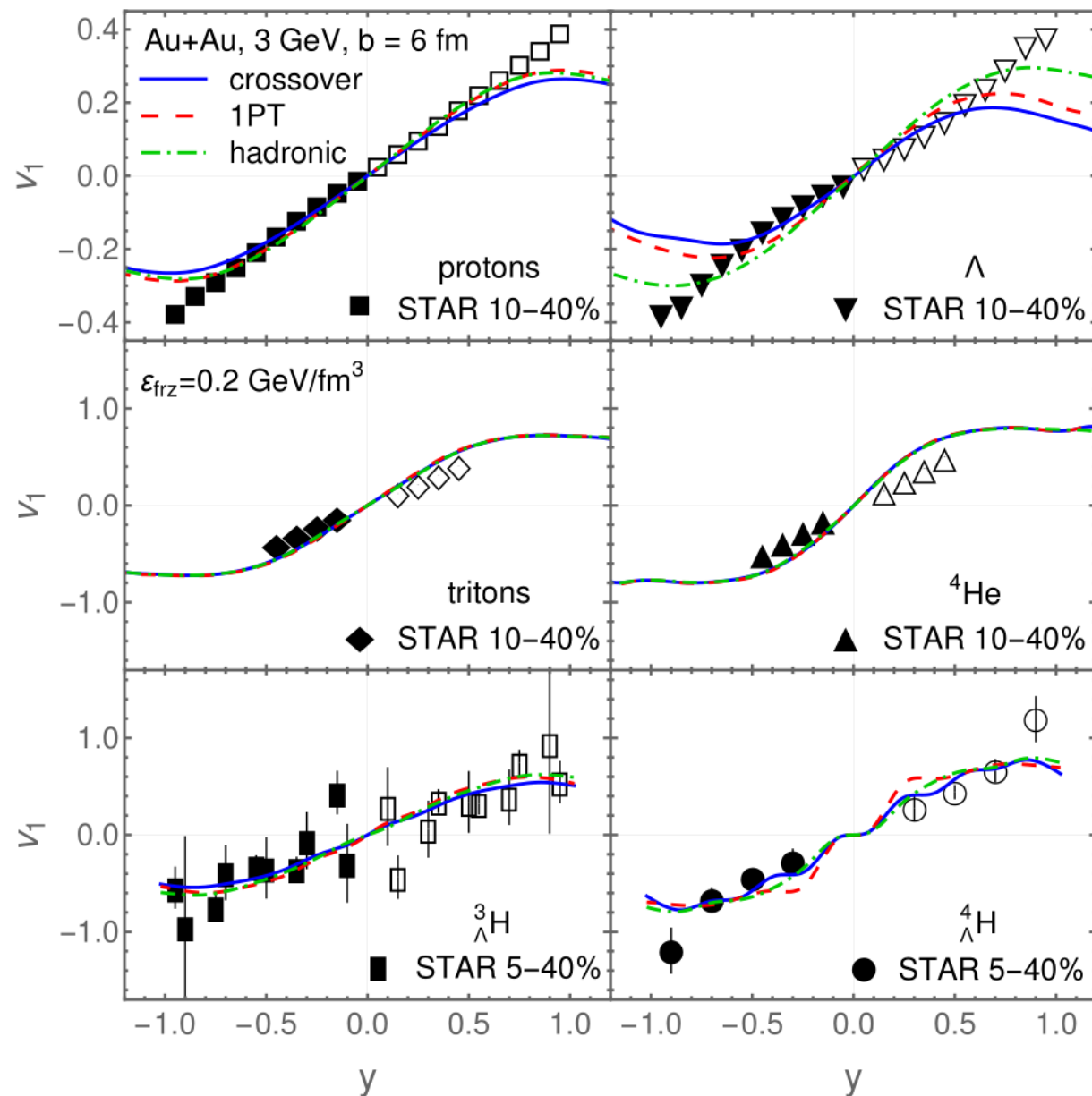
Небольшая переоценка отношения t/p по причине недооценки выхода протонов (Kozhevnikova, Ivanov, Phys. Rev. C 109, no.1, 014913 (2024)). Мало различия между различными уравнениями состояния → **ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОИСХОДИТ ПРЕИМУЩЕСТВЕННО В АДРОННОЙ ФАЗЕ.**



Направленный поток

Рис.: направленный поток v_1 для p , Λ и различных видов легких ядер и гиперядер в сравнении с данными STAR. Используются три различных уравнения состояния.

- Для p и Λ используется стандартное замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$ с последующим дожигом UrQMD;
- Для t , ${}^4\text{He}$, ${}^3_\Lambda\text{H}$ and ${}^4_\Lambda\text{He}$ используется позднее замораживание $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.2 \text{ ГэВ/фм}^3$;
- Хорошее согласие для p и Λ , особенно в области центральных быстрот.
- Нет зависимости результатов для (гипер)ядер от уравнения состояния.
- Для гиперядер результаты находятся в согласии с экспериментом в рамках статистических погрешностей.



Abdallah M. S. [et al.]. // Phys. Lett. B. — 2022. — Vol. 827. — P. 136941,
 Abdallah M. S. [et al.]. // Phys. Lett. B. — 2022. — Vol. 827. — P. 137003,
 Aboona B. [et al.]. // Phys. Rev. Lett. — 2023. — Vol. 130, no. 21. — P. 212301.

Направленный поток

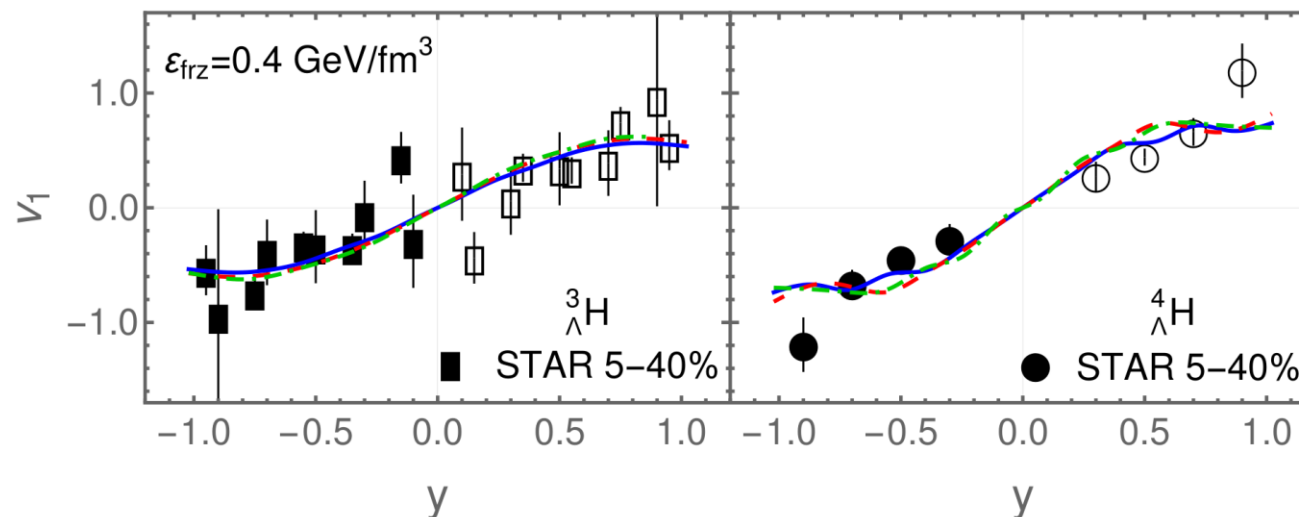


Рис.: Направленный поток v_1 для гиперядер в сравнении с данными STAR. Используются три различных уравнения состояния.

- Используется стандартное замораживание с $\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4 \text{ ГэВ/фм}^3$.
- Нет существенного отличия по сравнению с результатами с поздним замораживанием → **барионный направленный поток формируется на ранней стадии эволюции системы.**

Выводы

Выводы:

- Представлен новый подход к образованию легких (гипер)ядер, в котором рождение легких (гипер)ядер и адронов рассматривается единым образом. Этот подход реализован в обновленной версии генератора THESEUS-v2. Это более экономный способ описания образования легких (гипер)ядер по сравнению с коалесценцией и поэтому обладающий большей предсказательной способностью.
- С помощью новой версии генератора, THESEUS-v2, получены выходы легких ядер (быстротные распределения) в столкновениях Au+Au и Pb+Pb при энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 19.6$ ГэВ и при различных центральностях столкновений, а также p_T и m_T -спектры, коллективные потоки. Для моделирования стадии дожига легких (гипер)ядер использовалось позднее замораживание, характеризуемое параметром плотности энергии $\varepsilon_{frz} = 0.2$ ГэВ/фм³. Сделан вывод о том, что дейтроны, тритоны и ядра ³He лучше моделируются с поздним замораживанием, а ядра ⁴He — со стандартным, что отражает разницу в их энергиях связи. В целом, THESEUS-v2 даёт хоть и неидеальный, но разумный результат.
- Исследован вклад от распадов нестабильных ядер ⁴He*: при энергиях $\sqrt{s_{NN}} > 6$ ГэВ при центральных быстротах в дейтроны пренебрежимо мал, но существенен для тритонов и ядер ³He, а на периферийных быстротах он более значителен. При энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ такой вклад более существенен: ~20% для дейтронов и 50–100% (в зависимости от быстроты) для ³He, что согласуется с более ранним предсказанием.
- Было проведено моделирование легких гиперядер, аналогичное легким ядрам, а также Λ -гиперонов в столкновениях Au+Au при При энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ, которое дало хорошее описание экспериментальных данных STAR.

Научная новизна

В настоящей работе разработан новый подход к моделированию легких (гипер)ядер в столкновениях тяжелых ионов, основанный на термодинамическом описании в рамках полномасштабного 3D моделирования ядерных столкновений, в котором адроны и легкие (гипер)ядра рассматриваются единообразно. Этот подход реализован в обновленной версии генератора THESEUS, предназначенного для моделирования столкновений тяжелых ионов при умеренно релятивистских энергиях.

В этом подходе не требуются феноменологические параметры, как в коалесцентных моделях, или обширные входные данные, как это необходимо в динамических моделях. Температуры и химические потенциалы не фитируются, как в статистической модели или Blast-Wave, а рассчитываются в модели 3FD (Three-Fluid Dynamics), исходя из начальных данных и уравнения состояния. Следовательно, такой подход существенно увеличивает предсказательную силу моделирования.

Разработанный новый подход впервые применен к анализу данных по легким ядрам в столкновениях Au+Au и Pb+Pb при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 19.6$ ГэВ и при различных центральностях. В диссертации изучены быструтные распределения, p_T , m_T -спектры, направленный v_1 и эллиптический v_2 потоки. Полученные результаты находятся в разумном согласии с имеющимися на данный момент экспериментальными данными коллабораций NA49 и STAR. Найденные расхождения с данными физически объяснены несовершенствами описания динамики столкновений в разработанной модели.

Также проведено аналогичное исследование для гиперядер, таких как гипертретий $^3_\Lambda\text{H}$ и гипергелий $^4_\Lambda\text{He}$, в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ. Таким образом, данная диссертационная работа имеет научную новизну как в разработке метода, так и его применения к описанию данных.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная обновленная версия генератора THESEUS и проведенное в данной работе с помощью неё исследование легких ядер дает возможность делать предсказания для будущих экспериментов при умеренно релятивистских энергиях столкновения тяжелых ионов. Это может помочь в планировании таких экспериментов, в частности, на новом ускорительном комплексе NICA в Дубне.

Кроме того, термодинамический подход к образованию легких ядер сам по себе имеет теоретический интерес. Полученные разумные результаты показывают, что термодинамический подход в рамках гидродинамической модели применим к описанию рождения не только различных адронов, но и таких деликатных объектов, как легкие (гипер)ядра, энергии связи которых много меньше энергии возбуждения ядерной среды.

Поскольку в 3FD и THESEUS отсутствуют критическая точка и флуктуации, характерные для неравновесной спинодальной фазы, генератор THESEUS дает некоторый реперный расчет выходов легких ядер, заметное превышение выходов (гипер)ядер над результатами которого в некоторой области энергий столкновения может указывать на присутствие интересных физических явлений.

Основные положения, выносимые на защиту (1)

- Разработанная новая версия генератора THESEUS позволяет моделировать легкие (гипер)ядра на основе термодинамического подхода принципиально новым способом по сравнению с имеющимися на данный момент моделями и имеет преимущество в простоте входных параметров и предсказательной силе.
- Термодинамический подход в сочетании с гидродинамическим описанием динамики ядро-ядерных столкновений Au+Au и Pb+Pb при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 19.6$ ГэВ дает удовлетворительное описание экспериментальных данных (NA49 и STAR) по рождению легких ядер (дейтроны, тритоны, ядра гелия ^3He и ^4He).
- Термодинамический подход дает удовлетворительное описание экспериментальных данных (STAR) по рождению легких гиперядер (таких как гипертритий $^3_{\Lambda}\text{H}$ и гипергелий $^4_{\Lambda}\text{He}$) в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ.

Основные положения, выносимые на защиту (2)

- Выходы легких ядер слабо зависят от уравнения состояния ядерной материи в рассмотренной области энергий. В то же время направленный поток протонов и легких ядер оказался очень чувствительным к уравнению состояния при $\sqrt{s_{NN}} \geq 7.7$ ГэВ, что указывает на присутствие фазового перехода в кварк-глюонную плазму при этих энергиях столкновения.
- Вклад от распадов нестабильных состояний $^4\text{He}^*$ сильно влияет на выходы легких ядер при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ и оказывается несущественным при $\sqrt{s_{NN}} \geq 7.7$ ГэВ.
- Для хорошего описания легких ядер с массовым числом $A = 2$ и 3 требуется позднее (по сравнению со стандартным для адронов) замораживание, а для ^4He предпочтительно стандартное.

Список публикаций

- A1. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Light-nuclei production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV within a thermodynamical approach: Bulk properties and collective flow // Phys. Rev. C. — 2024. — Vol. 109, no. 1. — P. 014913. — arXiv: [2311.08092 \[nucl-th\]](#).
- A2. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Production of light hypernuclei in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3$ GeV within a thermodynamic approach // Phys. Rev. C. — 2024. — Vol. 109, no. 3. — P. 034901. — arXiv: [2401.04991 \[nucl-th\]](#).
- A3. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B., Karpenko I., Blaschke D., Rogachevsky O. Update of the Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator: light-nuclei production in heavy-ion collisions // Phys. Rev. C. — 2021. — Vol. 103, no. 4. — P. 044905. — arXiv: [2012.11438 \[nucl-th\]](#).
- A4. Blaschke D., Röpke G., Ivanov Y., Kozhevnikova M., Liebing S. Strangeness and light fragment production at high baryon density // Springer Proceedings in Physics / ed. by D. Elia, G. E. Bruno, P. Colangelo, L. Cosmai. — 2020. — Vol. 250. — P. 183–190. — arXiv: [2001.02156 \[nucl-th\]](#).
- A5. Blaschke D., Friesen A. V., Ivanov Y. B., Kalinovsky Y. L., Kozhevnikova M., Liebing S., Radzhabov A., Röpke G. QCD Phase Diagram at NICA Energies: K^+/π^+ Horn Effect and Light Clusters in THESEUS // Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement. — 2021. — Vol. 14, no. 3. — P. 485–489. — arXiv: [2004.01159 \[hep-ph\]](#).
- A6. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Light-nuclei production in heavy-ion collisions within a thermodynamical approach // Phys. Rev. C. — 2023. — Vol. 107, no. 2. — P. 024903. — arXiv: [2210.07334 \[nucl-th\]](#).
- A7. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Light-Nuclei Production in Heavy-Ion Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6.4 - 19.6$ GeV in THESEUS Generator Based on Three-Fluid Dynamics // Particles. — 2023. — Vol. 6, no. 1. — P. 440–450.

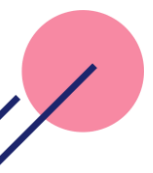


Итог



Суммируя все вышесказанное, можно заключить, что термодинамический подход дает удовлетворительное описание всего массива данных по рождению легких (гипер)ядер в ядро-ядерных столкновениях при энергиях столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 19.6$ ГэВ. Это описание в совокупности не хуже, чем то, что достигается в подходах, основанных на коалесценции, и требует значительно меньшее число дополнительных параметров.

Термодинамический подход требует всего один дополнительный параметр (плотность энергии позднего замораживания), компенсирующий неспособность UrQMD описывать эволюцию легких (гипер)ядер на стадии дожига. С ростом энергии столкновения качество термодинамического описания легких (гипер)ядер ухудшается, что, видимо, связано с быстрым уменьшением их множественности. При малых множественностях ухудшается применимость описания, основанного на макроканоническом ансамбле, т.е. термодинамики. Поэтому лучшее описание достигается при нижних энергиях рассмотренного диапазона.

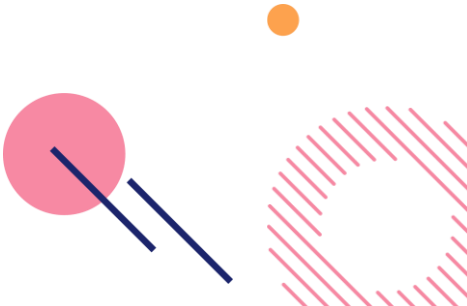




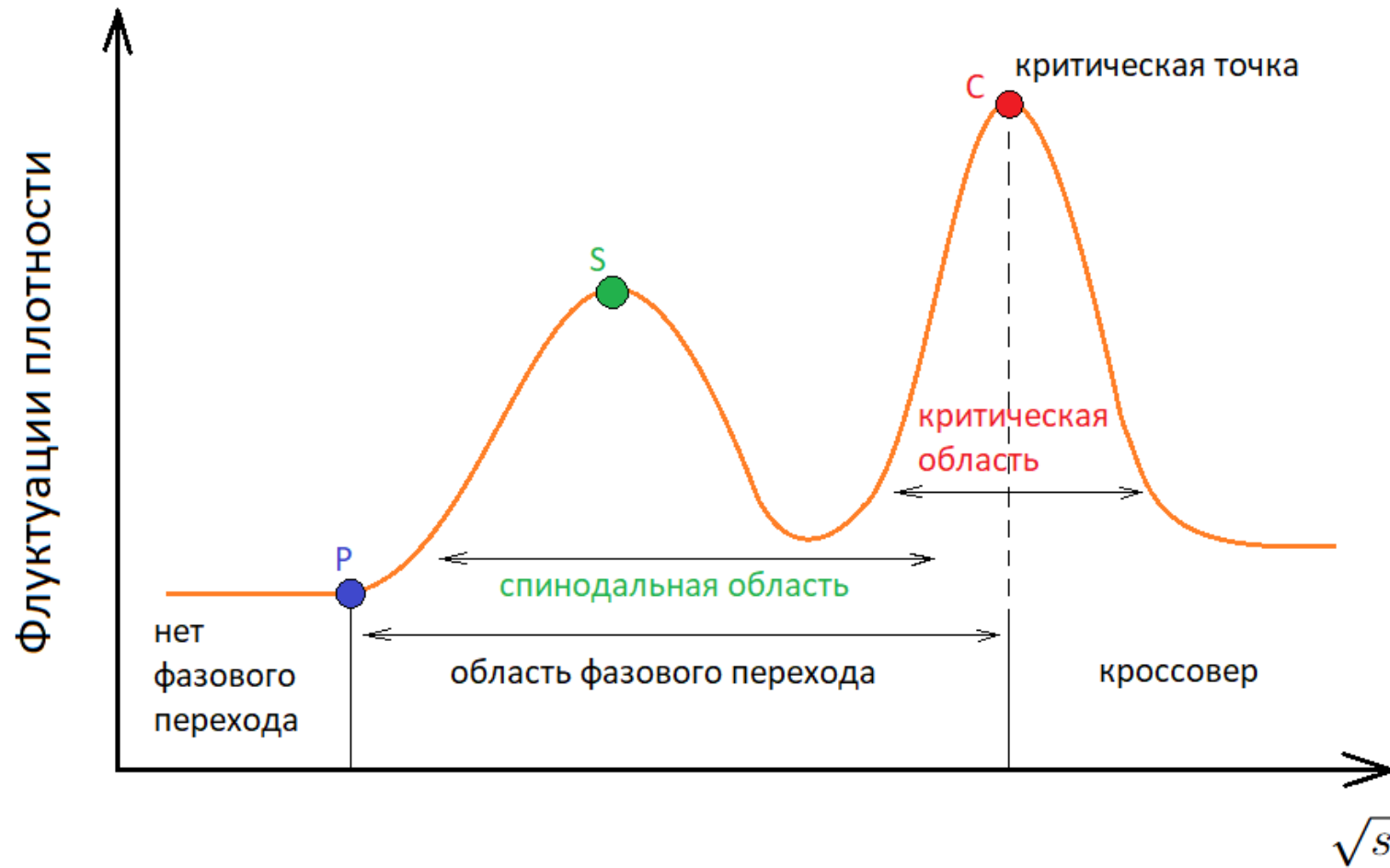
Спасибо за внимание !



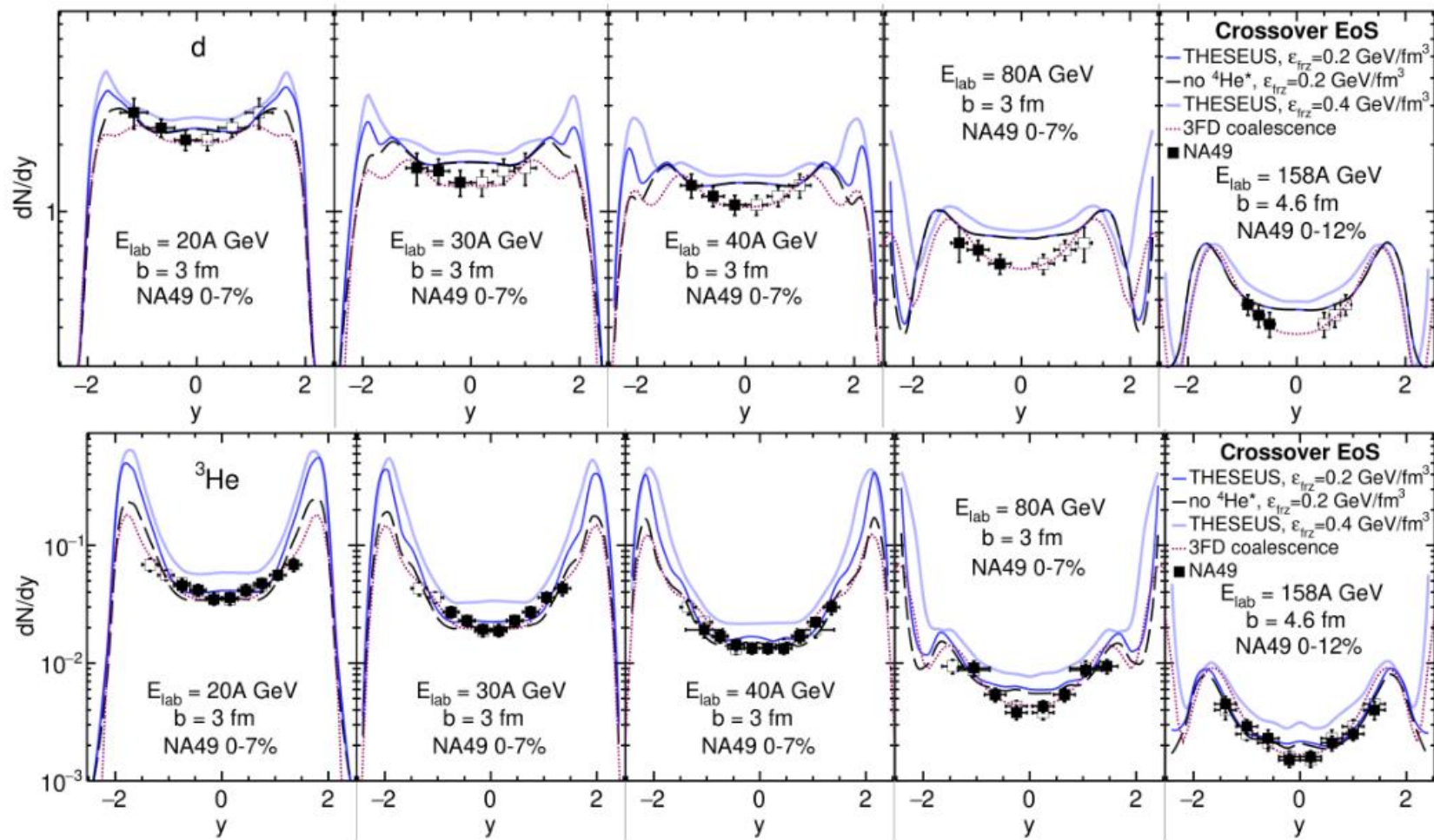
Дополнительные материалы



Спинодальная область



Быстротные распределения (подробнее)

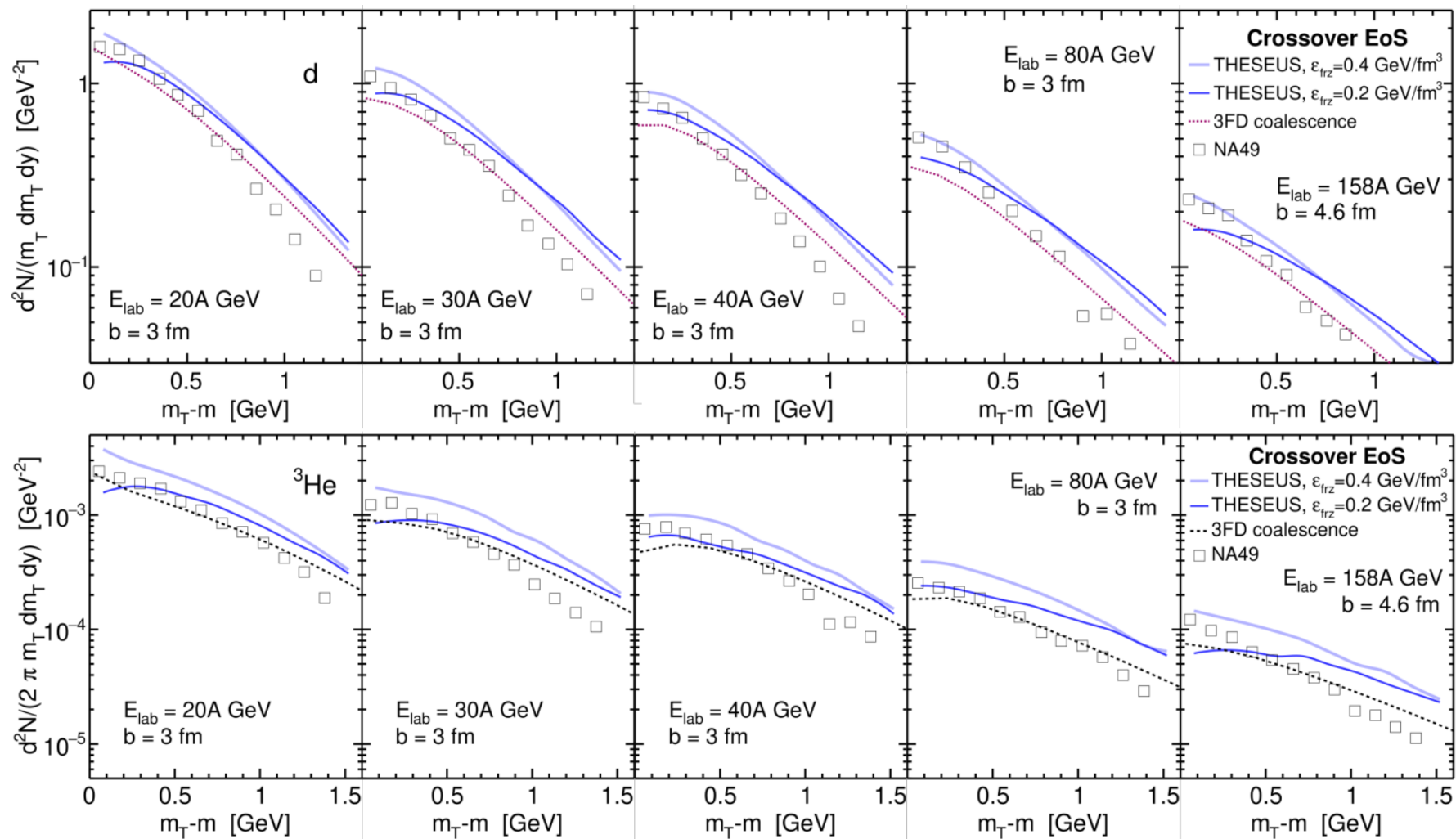


Ivanov Y. B., Soldatov A. A. Eur. Phys. J. A. — 2017. — Vol. 53, no. 11. — P. 218

Anticic T. [et al.]. Phys. Rev. C. — 2016. — Vol. 94, no. 4. — P. 044906.

Рис.: Быстротные распределения легких ядер. Приведены результаты со стандартным замораживанием $\epsilon_{frz} = 0.4$ ГэВ/фм³ (бледно-голубые линии) и поздним $\epsilon_{frz} = 0.2$ ГэВ/фм³ (синие линии), без вклада возбужденных низколежащих резонансов $^4\text{He}^*$ (черные линии), экспериментальные данные NA49 и результат чистой 3FD.

Спектры по поперечным массам



Поперечная масса:

$$m_T^2 = m^2 + p_x^2 + p_y^2$$

Ivanov Y. B., Soldatov A. A. Eur. Phys. J. A. — 2017. — Vol. 53, no. 11. — P. 218

Anticic T. [et al.]. Phys. Rev. C. — 2016. — Vol. 94, no. 4. — P. 044906.

Рис.: Спектры по поперечным массам для дейтронов (верхний ряд) и ^3He (нижний ряд) в центральных столкновениях Pb+Pb при различных энергиях, рассчитанные с уравнением состояния с кроссовером. Показаны результаты, рассчитанные со стандартным замораживанием $\epsilon_{\text{frz}} = 0.4$ ГэВ/фм 3 (бледно-голубые линии) и поздним $\epsilon_{\text{frz}} = 0.2$ ГэВ/фм 3 (синие линии), результаты 3FD (фиолетовые пунктирные линии) и экспериментальные данные NA49.

3 ГэВ: направленный поток

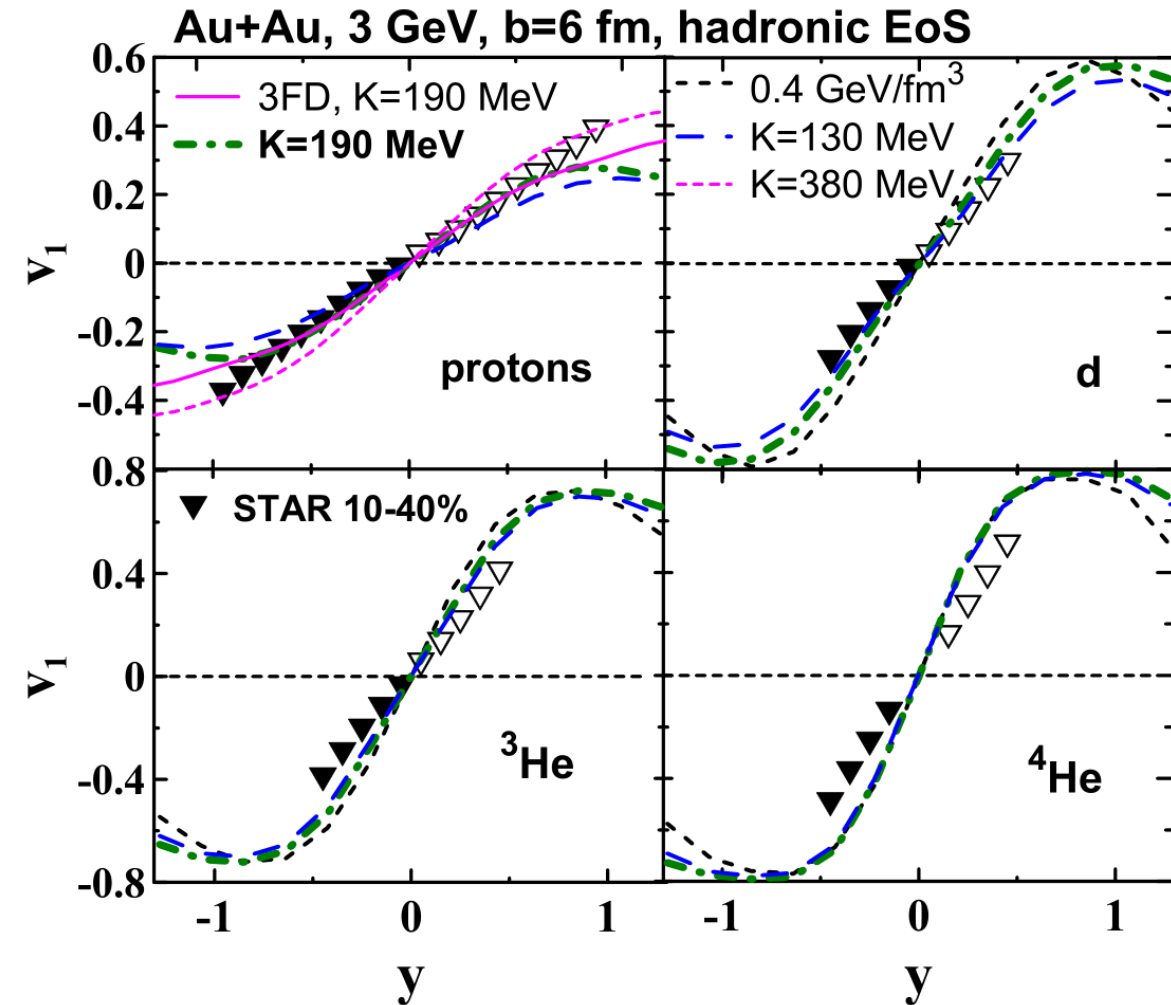
Рис.: Результаты THESEUS по v_1 протонов и легких ядер (d, ^3He , ^4He) для различных вариантов адронного уравнения состояния: стандартного ($K = 190$ МэВ), очень «мягкого» ($K = 130$ МэВ) и «жесткого» ($K = 380$ МэВ).

- Для легких ядер используется позднее замораживание ($\varepsilon_{\text{frz}} = 0.2$ ГэВ/фм³) и стандартное ($\varepsilon_{\text{frz}} = 0.4$ ГэВ/фм³).
- Показан поток v_1 протонов, полученный из чистой 3FD-модели (без дожига).
- Жесткость характеризуется коэффициентом несжимаемости ядерной материи:

$$K = 9n_0^2 \frac{d^2}{dn^2} \left(\frac{\varepsilon(n, T=0)}{n} \right)_{n=n_0},$$

где $\varepsilon(n, T=0)$ — плотность энергии ядерной материи при $T=0$, n_0 — нормальная ядерная плотность. Стандартное значение для адронного уравнения состояния: $K = 190$ МэВ (довольно «мягкое»).

- Стандартное значение $K = 190$ МэВ кажется наиболее оптимальным.



Эллиптический поток

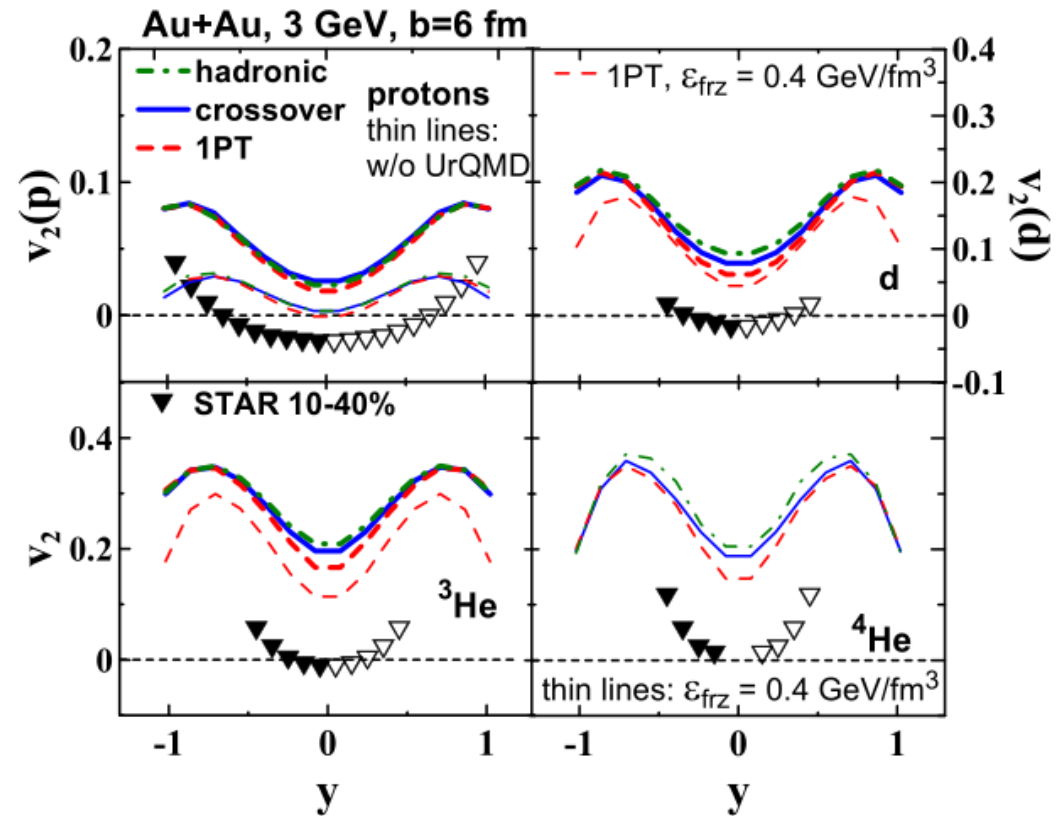


Рис. 26: Эллиптический поток протонов и легких ядер в зависимости от быстроты в полуцентральных ($b = 6$ фм) столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ. Представлены результаты для трёх различных уравнений состояния. Для дейтронов и ${}^3\text{He}$ используется позднее замораживание, а для ${}^4\text{He}$ — стандартное. Также для них приведен расчёт с переходом 1-го рода со стандартным замораживанием. Протоны рассчитаны со стандартным замораживанием и дожигом UrQMD. Также для них показан результат без дожига. Данные STAR взяты из работы [33; 152]. Экспериментальные точки обозначены закрашенными символами, а отраженные симметрично нулевой быстроты — незакрашенными.

Эллиптический поток

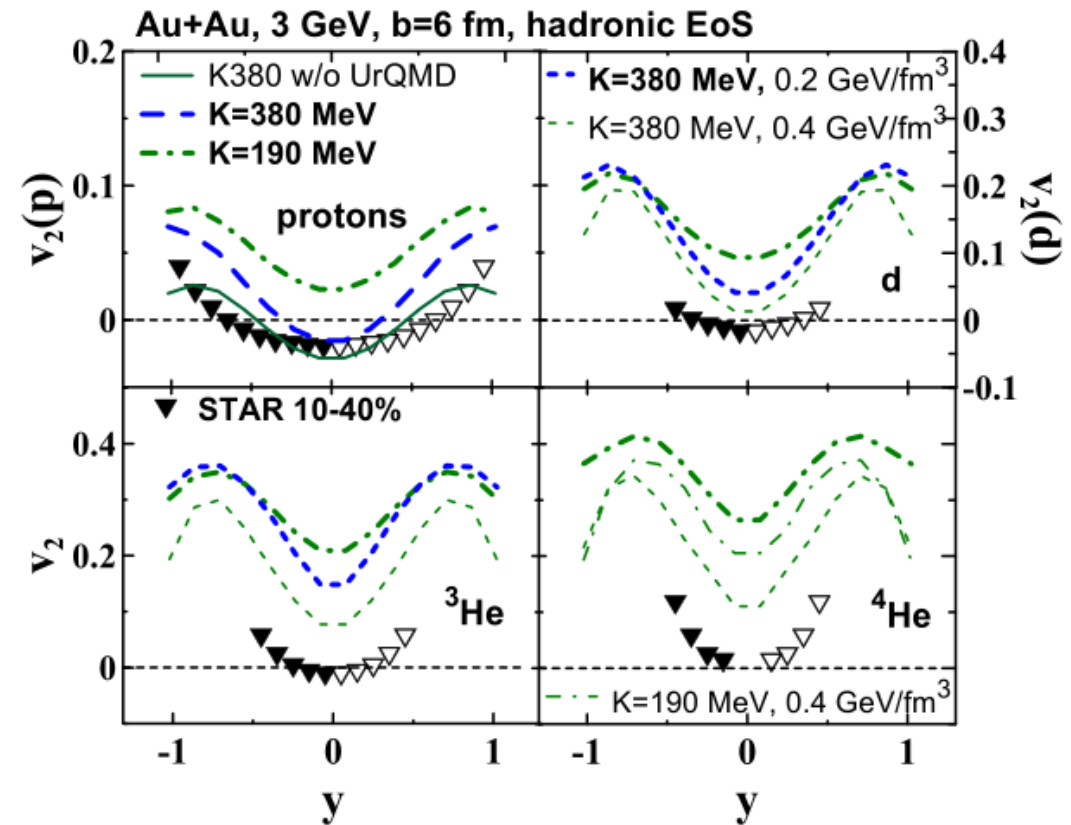


Рис. 27: То же, что и на Рисунке 26, но для различных вариантов адронного уравнения состояния. Результаты для стандартного адронного уравнения состояния ($K = 190$ МэВ) показаны для позднего замораживания для всех легких ядер жирной штрихпунктирной линией и для стандартного замораживания для ^4He – тонкой штрихпунктирной линией. Также показаны результаты для "жесткого" уравнения состояния ($K = 380$ МэВ): для дейтронов и ^3He при позднем замораживании и для всех легких ядер при стандартном замораживании. Расчет для протонов выполнен при стандартном замораживании и последующем дожиге UrQMD, а также показан протонный поток для "жесткого" уравнения состояния ($K = 380$ МэВ) до дожига (сплошная линия).



Личный вклад



Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. Автор принимала активное участие во всех этапах работы. Её вклад является определяющим в разработке и тестировании программного кода, существенным в проведении численных расчётов и получении физических результатов. Автор неоднократно лично представляла полученные результаты на международных конференциях. Также автор принимала активное участие в подготовке публикаций. Все выносимые на защиту результаты получены при определяющем участии автора.

Выступления

1. Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy ion collisions, and astrophysics, The European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Тренто, Италия, 2019.

Название доклада: "Production of light clusters in generator THESEUS".

2. 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021), Колимбари, Крит, Греция.

Название доклада: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions in Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator (THESEUS)".

3. 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA 2022), МИФИ, Москва, Россия

Название доклада: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6.4\text{--}19.6$ GeV in THESEUS generator based on 3-fluid dynamics".

4. 11th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2022), Колимбари, Крит, Греция

Название доклада: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6.4\text{--}19.6$ GeV in 3-fluid dynamics".

5. Workshop on physics performance studies at NICA (NICA-2022), МИФИ (виртуальная через ZOOM), Москва, Россия

Название доклада: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 6.4\text{--}19.6$ GeV in THESEUS generator based on 3-fluid dynamics".

6. 12th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2023), Колимбари, Крит, Греция

Название доклада: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at the energy range of $\sqrt{s_{NN}} = 3\text{--}19.6$ GeV in generator THESEUS based on 3-fluid dynamical model".

7. JINR Association of Young Scientists and Specialists Conference "Alushta-2023", ОИЯИ, Алушта, Россия

Название доклада: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at NICA energies in generator THESEUS based on 3-fluid dynamical model".

8. Workshop on physics performance studies at NICA (NICA-2024), (виртуальная через ZOOM), Москва, Россия

Название доклада: "Proton, Lambda and light (hyper)nuclei production in Au+Au collisions at 3 GeV. Bulk properties and directed flow".

9. 61st meeting of the PAC for Particle Physics (2025), Дубна, Россия, стендовый доклад.

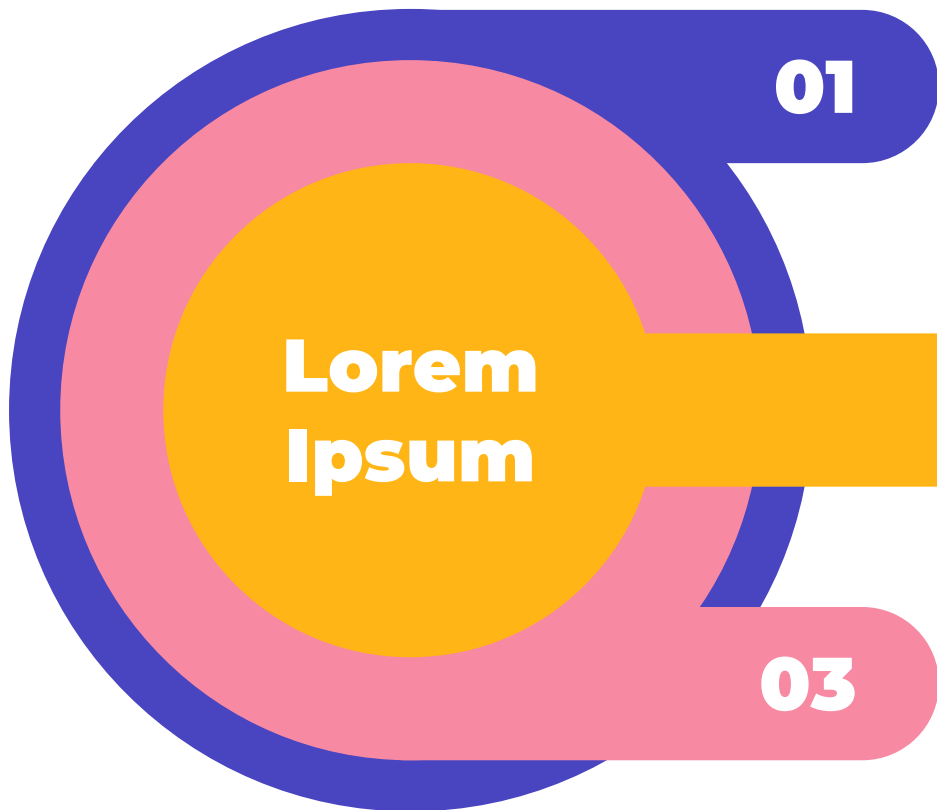
Название: "Modelling of light (hyper)nuclei production in heavy-ion collisions at NICA energies based on generator THESEUS".

10. Методический семинар: EMMI Nuclear and Quark Matter seminar (GSI), онлайн, 2021.

Тема семинара: "Update of the Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator (THESEUS) and light-nuclei production in heavy-ion collisions".

11. Общелабораторный семинар ЛФВЭ, 2025.

Тема семинара: "Моделирование легких ядер и гиперядер в столкновениях тяжелых ионов в термодинамическом подходе при помощи генератора THESEUS"(по материалам кандидатской диссертации).



01

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor

02

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor

03

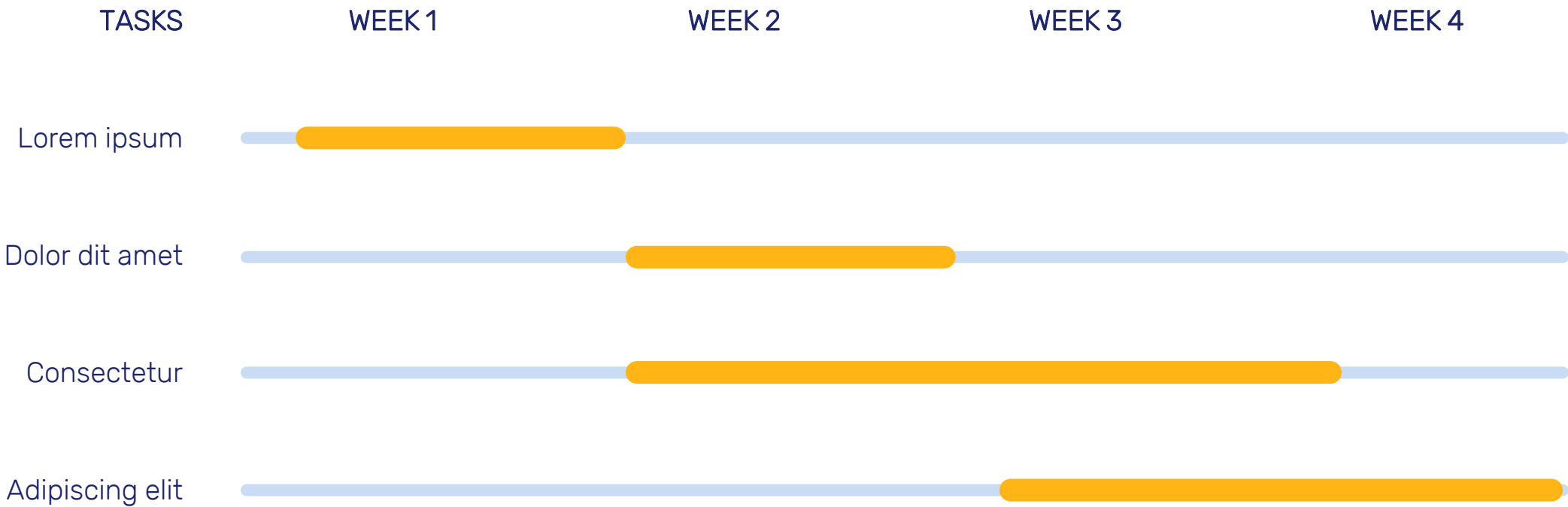
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor



SCHEDULE SLIDE

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit





Icon

You can resize these icons keeping the quality.

You can change the stroke and fill color; just select the icon and click on the paint bucket/pen.



Icon

You can resize these icons keeping the quality.

You can change the stroke and fill color; just select the icon and click on the paint bucket/pen.



SECTION BREAK

SLIDE TITLE

01.

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor
sit amet, consectetur
adipiscing elit, sed
do eiusmod tempor

02.

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor
sit amet, consectetur
adipiscing elit, sed
do eiusmod tempor

03.

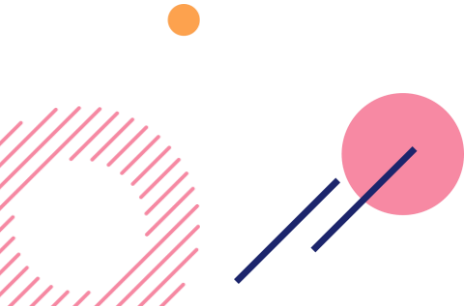
Lorem ipsum

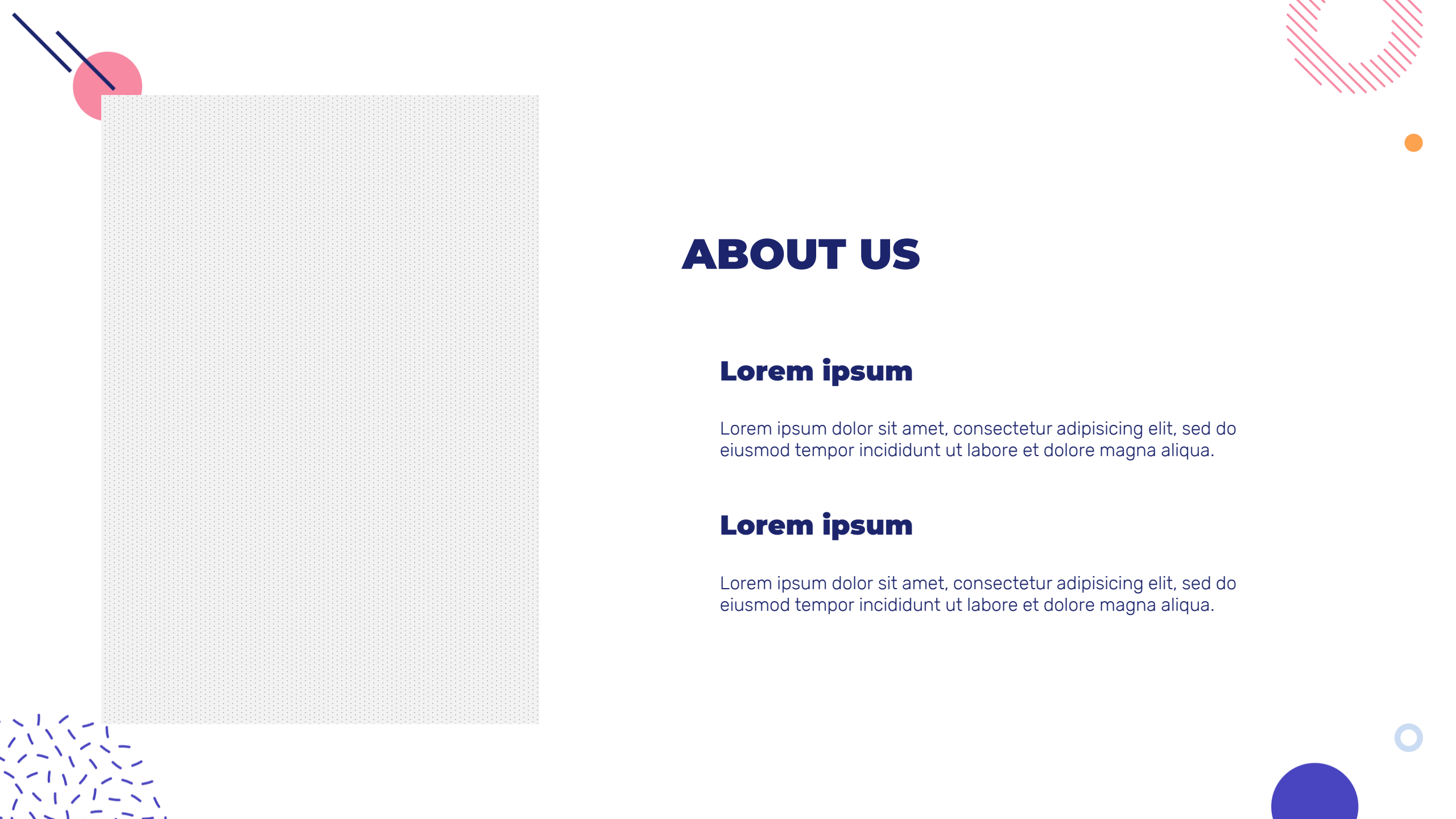
Lorem ipsum dolor
sit amet, consectetur
adipiscing elit, sed
do eiusmod tempor

04.

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor
sit amet, consectetur
adipiscing elit, sed
do eiusmod tempor





ABOUT US

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.



SLIDES TITLE

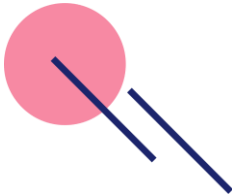
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.

Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.





Enter Your Title Here

Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipisicing elit, sed do
eiusmod tempor incididunt ut labore



Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.



Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.



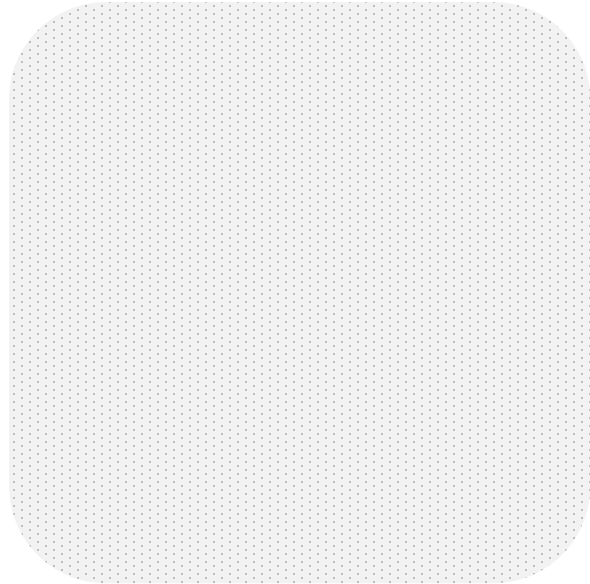
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.



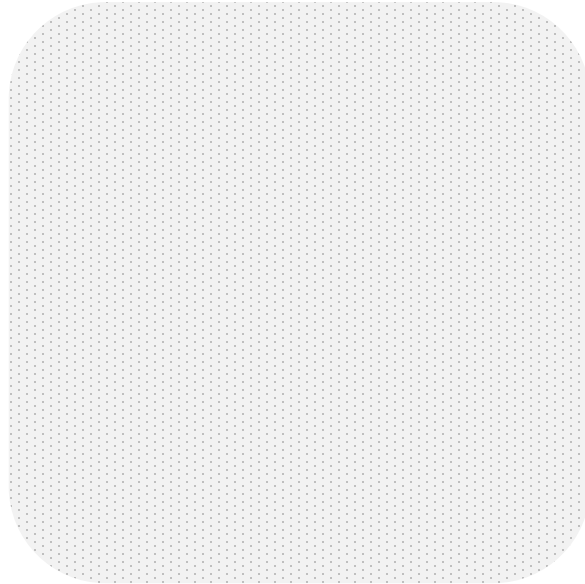
SLIDES TITLE HERE

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit



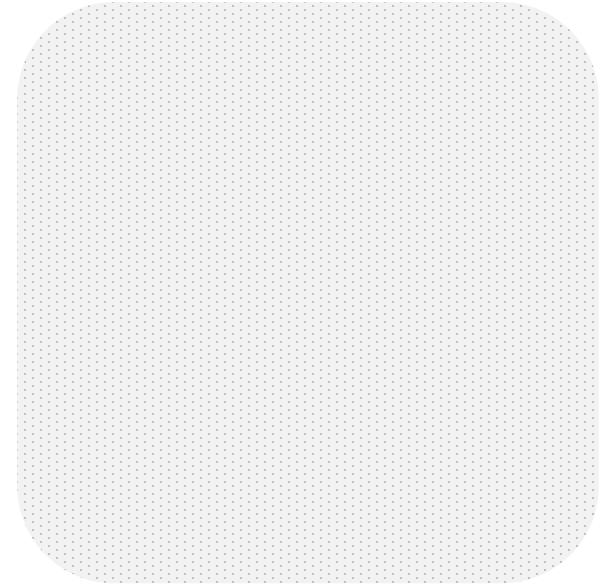
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipiscing elit, sed do
eiusmod tempor incididunt ut labore et
dolore magna aliqua.



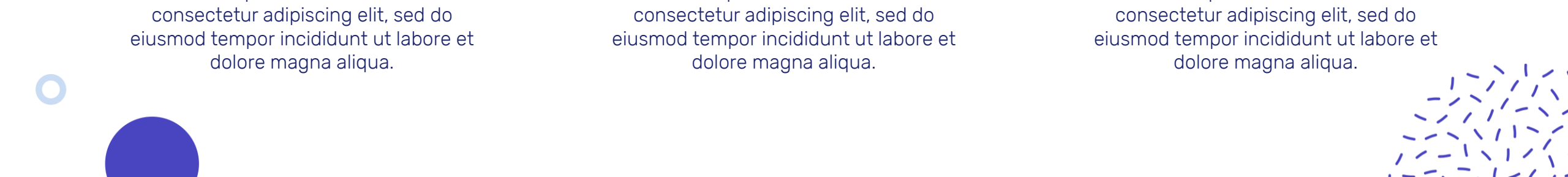
Lorem ipsum

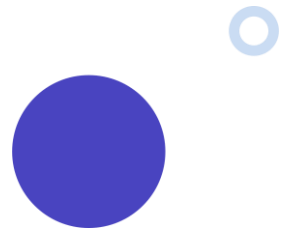
Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipiscing elit, sed do
eiusmod tempor incididunt ut labore et
dolore magna aliqua.



Lorem ipsum

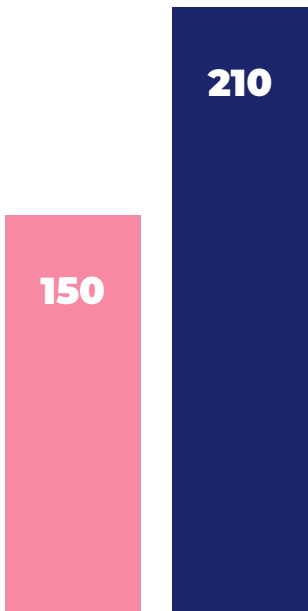
Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipiscing elit, sed do
eiusmod tempor incididunt ut labore et
dolore magna aliqua.





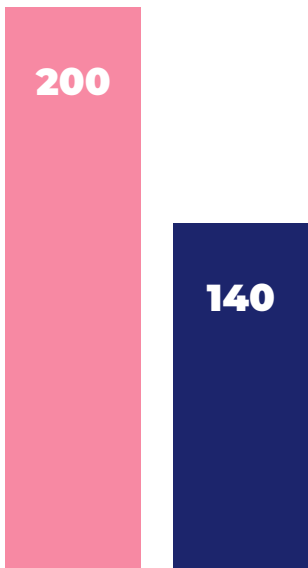
DATA ANALYSIS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit



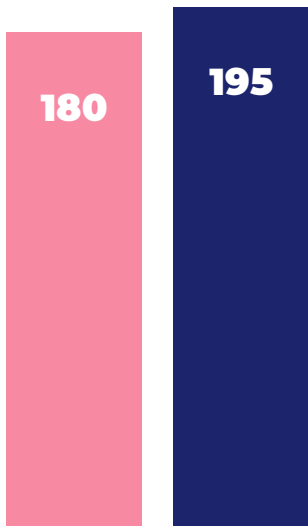
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit



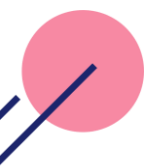
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit



Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit



Lorem ipsum



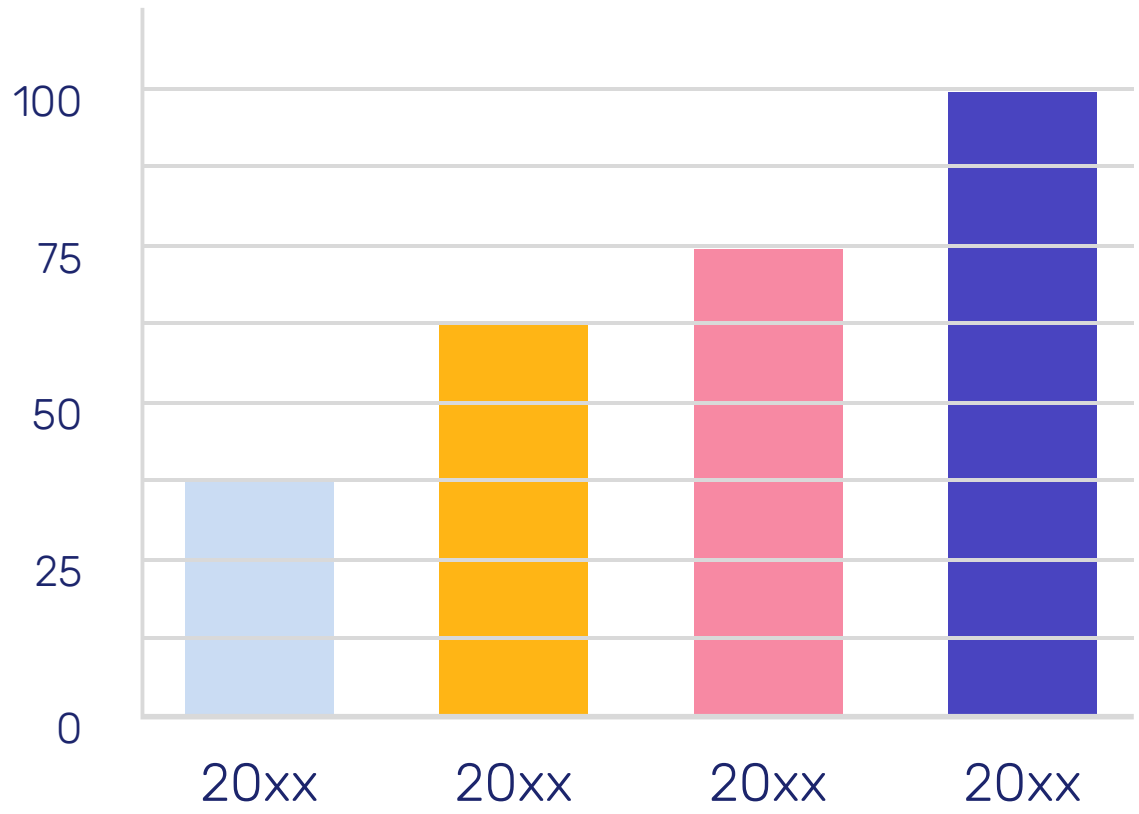
Lorem ipsum





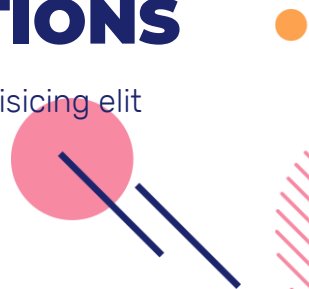
Place subtitle text here

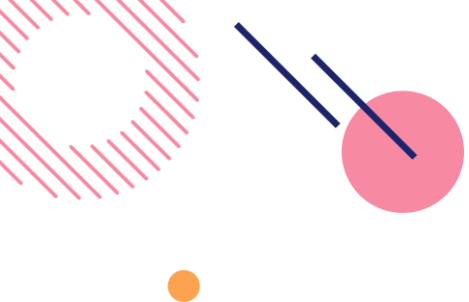
Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipisicing elit, sed do
eiusmod tempor incididunt ut labore



BASED ON PROJECTIONS

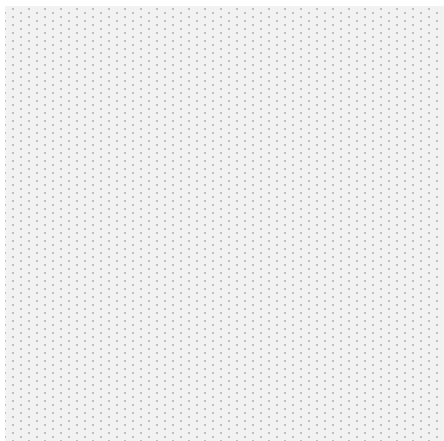
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit





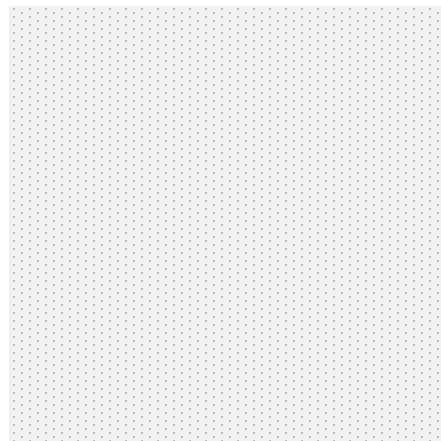
KEYWORD SLIDE TITLE

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit



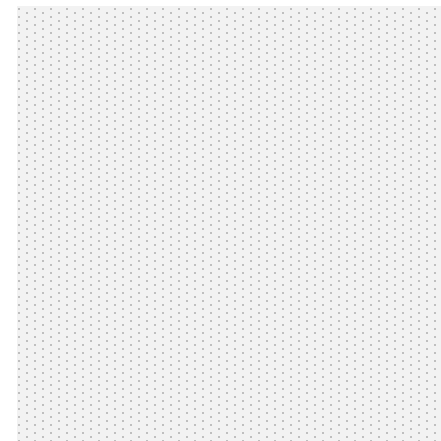
Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipisicing elit



Lorem ipsum

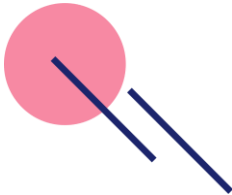
Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipisicing elit



Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetur adipisicing elit





Subject Title



Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.



Lorem ipsum

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua.

