

СВОЙСТВА ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ И ОБРАЗОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ НА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКАХ КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН/НИКА

С.П. Авдеев¹, Х.У. Абрамян¹, А.С. Ботвина², В. Карч¹, В.В. Киракосян³,
Л.В. Карнюшина¹, Э.М. Козулин³, А.Г. Литвиненко¹, Е. Норбек⁴,
В.Ф. Переседов¹, П.А. Рукояткин¹, В.И. Стегайлов⁵, О.В. Стрекаловский³

¹) ОИЯИ, Дубна, Россия;

²) Институт передовых исследований во Франкфурте на Майне, Франкфурт на Майне, Германия;

³) ОИЯИ, ЛЯР, Дубна, Россия;

⁴) Университет штата Айова, Айова, США;

⁵) ОИЯИ, ЛЯП, Дубна, Россия.

Аннотация Проекта ФАЗА (в рамках темы 02-1-1087-2009/2020)

Целью Проекта является исследование свойств горячих ядер (с энергией возбуждения более 3 МэВ на нуклон), образующихся в соударениях лёгких релятивистских ионов с тяжёлыми мишенями. Горячее ядро, расширяясь за счёт теплового давления, попадает в область фазовой неустойчивости (спинодальная область). В результате флуктуаций плотности гомогенная ядерная система распадается на ансамбль, состоящий из фрагментов и нуклонов. Ставится задача исследования пространственно-временных характеристик горячих ядер и коллективных потоков, образующихся в этих взаимодействиях.

Эксперименты проводятся с использованием релятивистских пучков лёгких ядер ускорителя Нуклотрон ОИЯИ и 4π-установки ФАЗА. Фундаментом этого проекта является громадный методический и физический опыт, приобретённый коллективом в реализации программы исследования ядерной мультифрагментации на пучках релятивистских лёгких ионов в течение последнего десятилетия. Приём данных в режиме событие-за-событием осуществляется с использованием системы VME. При реализации настоящего Проекта будет реализован перевод триггерной системы со стандарта SAMAC на стандарт VME, который имеет лучшие временные характеристики, что обеспечит более эффективное использование времени на пучке Нуклотрона.

Наши надежды на получение новых результатов в реализации данного Проекта опираются на хорошую теоретическую поддержку института перспективных исследований во Франкфурте на Майне. Эта поддержка и сотрудничество будет осуществляться в совместной подготовке и проведении экспериментов, в анализе данных, как в Дубне, так и вне ОИЯИ.

Горячие ядра исследуются во многих лабораториях мира с помощью ядро-ядерных соударений [1-4]. Однако, при этом разогрев сопровождается возбуждением коллективных степеней свободы: ядра вращаются, сжимаются, деформируются. Исследование этих динамических эффектов интересно само по себе, однако они затрудняют получение информации о термодинамических

свойствах ядерных систем. Картина значительно упрощается, когда используются пучки релятивистских лёгких частиц. Коллективные степени свободы при этом возбуждаются слабо, и энергия образующихся ядер оказывается практически целиком тепловой. Лёгкие релятивистские пучки дают уникальные возможности для исследования термодинамики горячей ядерной системы. Отметим, что детальная информация о процессе множественной эмиссии фрагментов имеет важные астрофизические приложения [5], так как температура на поверхности нейтронных звёзд близка к температуре ядер, испытывающих многотельный распад. Точное знание поведения ядер с низкой плотностью и температурой 5-10 МэВ необходимо для понимания динамики сверхновых.

Экспериментальная методика базируется на 4 π -установке ФАЗА, включающей 30 $dE \times E$ телескопов для регистрации заряженных частиц. Каждый телескоп состоит из цилиндрической ионизационной камеры (dE) и Si(Au)-детектора для измерения полной энергии фрагмента. Мишень (плёнка из золота 1,5 мг/см²) расположена в центре вакуумной камеры установки.

Основную часть полного телесного угла установки составляет детектор множественности фрагментов, который состоит из 58 счётчиков с плёночными (около 36 мг/см²) сцинтилляторами CsI(Tl). Сортировка событий по множественности позволяет «менять» среднюю энергию возбуждения фрагментирующего ядра. Кроме того, этот детектор даёт представление о пространственной картине событий.

Каждое событие длиной 352 байт содержит коды амплитуд всех телескопов-спектрометров и фото-умножителей детектора множественности фрагментов. Запись осуществляется в режиме «событие-за-событием» в стандарте VME. В настоящем Проекте мы планируем перевести на стандарт VME триггерную систему установки.

В процессе эксперимента на пучке одновременно измеряются тридцать двумерных спектров ($dE \times E$) фрагментов промежуточной массы (ФПМ: $3 \leq Z \leq 20$). При этом чётко видны локусы, отвечающие регистрации фрагментов от гелия до магния. Перекрывание локусов практически исключено. Система из тридцати телескопов установки обеспечивает надежное проведение спектроскопических, а также корреляционных измерений для фрагментов по относительному углу (в диапазоне углов от 10° до 180°) или относительной скорости.

Перечислим основные результаты, полученные коллаборацией ФАЗА к настоящему времени:

1. Впервые доказано экспериментально, что для горячих ядер (энергия возбуждения выше, чем 400 МэВ), рождаемых на релятивистских лёгких пучках (протоны, дейтроны, α -частицы), испарение частиц сменяется процессом тепловой ядерной мультифрагментации [6]. Это такой тип распада возбуждённых ядер, при котором происходит множественная эмиссия фрагментов промежуточной массы. Они – тяжелее α -частиц, но легче осколков деления.
2. Это процесс «взрывного» типа, происходящий за время $\tau_{\text{em}} \approx 10^{-22}$ с. Столь короткое время впервые установлено в работах группы ФАЗА путём тонкого анализа корреляции генетически связанных фрагментов по относительной скорости.

3. Установлено, что процесс тепловой мультифрагментации имеет *два характеристических объёма*. Первый, $V_t \approx 3V_0$, система имеет на этапе формирования фрагментов. Эта конфигурация подобна “седловой” точке для деления. Вторая характерная конфигурация (kinetic freeze-out) аналогична точке разрыва в обычном делении. Ей отвечает объём $V_f \approx (5.0 \pm 0.5)V_0$, заполненный отделившимися друг от друга фрагментами.
4. Типичная температура процесса (4-6 МэВ) существенно меньше, чем T_c – критическая температура для фазового перехода «жидкость-газ». Величина T_c определена авторами путём анализа зарядового распределения фрагментов: $T_c = (17 \pm 2)$ МэВ.

Коллаборация ФАЗА успешно изучала “статистические” свойства горячих ядер, используя при анализе данных Московско-Копенгагенскую статистическую модель мультифрагментации. Эта модель была существенно модифицирована на основе наших экспериментальных данных. Следующим предметом исследований является *динамика процесса* множественной эмиссии фрагментов. Эта задача будет предметом наших экспериментов и в 2019-2021 гг.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- 1) Проведение новых измерений корреляционной функции по относительной скорости (относительным углам) фрагментов промежуточной массы для соударений релятивистских лёгких ионов с тяжёлой мишенью. При анализе полученных экспериментальных данных будет получена детальная информация о временной шкале процесса и о конфигурации системы в момент дезинтеграции.
- 2) Будут осуществлены экспериментальные исследования наличия термализации в горячем спектре мишени перед развалом и определены скорости источника.
- 3) Планируется определение радиальных потоков в функции заряда фрагмента.

ПУБЛИКАЦИИ ГРУППЫ ФАЗА ЗА ПОСЛЕДНИЕ ТРИ ГОДА

1. «Source velocity at relativistic beams of 4He», Известия РАН, серия физическая, 2016, том 80, № 3, с. 365;
2. «Study of the source velocity with the light relativistic ions at CBM», CBM Progress Report 2016, 2017, 187;
3. «Source velocity at relativistic beams of 4He», J. Astrophys. Aerospace Technol. 2017, Vol. 5, № 2, 48;
4. «Time scale of the thermal multifragmentation in 4He(4 GeV) + Au collisions», Известия РАН, серия физическая, 2018, том 82, № 6, с. 711;

5. «Time scale of the thermal multifragmentation in $4\text{He}+\text{Au}$ at FAIR energies», CBM Progress Report 2017, 2018, 162;
6. «Radial flow in the interaction of relativistic deuterons with a gold target», LXVIII International conference “NUCLEUS 2018”, book of abstracts, July 2-6, 2018, Voronezh, 73.

Результаты работ докладывались на международных конференциях:

1. Международная конференция по ядерной физике **Ядро-2017**.
12-15 сентября 2017 года, Алматы, Казахстан.
2. 2nd International Conference on Atomic and Nuclear Physics.
November 08-09, 2017 at Las Vegas, USA;
3. 68 Международная конференция **Ядро-2018**.
2-6 июля 2018 года, Воронеж, Россия.
4. 4th International conference on Atomic and Nuclear Physics.
October 26-27, 2018, Boston, USA.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-02-00499).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. - R. Wada et al., Phys. Rev. C 99, 024616 (2019)
2. - M. Fidelus et al., Phys. Rev. C 89, 054617 (2014)
3. - H. Imal et al., Phys. Rev. C 91, 034605 (2015)
4. - S. Barlini et al., Phys. Rev. C 87, 054607 (2013)
5. - A.S. Botvina and I.N. Mishustin, 2010, Nucl. Phys. A 843 98.