

Эксперимент BECQUEREL: статус и перспективные задачи

Публикации, 23 ноября 2020

Представляем вашему вниманию статью А. А. Зайцева, П. И. Зарубина, А. И. Малахова «Эксперимент BECQUEREL: статус и перспективные задачи». Статья опубликована в *третьем номере* бюллетеня «Новости ОИЯИ» за 2020 год.

Фрагментация релятивистских ядер, наблюдаемая в ядерной эмульсии (ЯЭ), служит источником ансамблей легчайших ядер, представляющих интерес для современной ядерной физики и ядерной астрофизики. ЯЭ позволяет изучать образование таких ансамблей во всей полноте с рекордным угловым разрешением и идентификацией изотопов He и H. Самые первые исследования взаимодействий релятивистских ядер состоялись в конце 1940-х гг. при анализе слоев ЯЭ, облучавшихся в стратосфере. Тогда же были обнаружены события развала ядер космического происхождения, содержащие группы следов релятивистских α -частиц, сконцентрированных в узком угловом конусе. Проявляясь как природное явление, они отражают α -частичную кластеризацию в ядерной структуре, являющуюся объектом исследований по настоящее время.

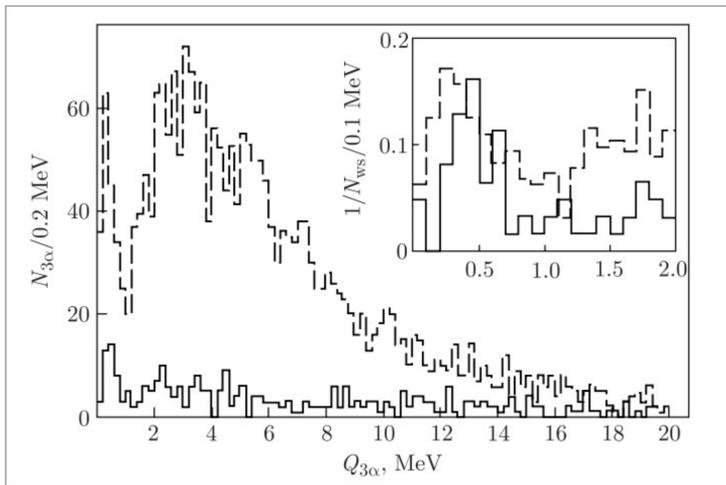
В 1970-х гг. начались облучения стопок ЯЭ легкими ядрами на синхрофазотроне (ОИЯИ) и Bevalac (LBL), а в 1990-х гг. — средними и тяжелыми ядрами на AGS (BNL) и SPS (ЦЕРН). Отмечалось проявление ядерной структуры в конусе предельной фрагментации. Однако электронные эксперименты в этом направлении наталкиваются на принципиальные сложности, обусловленные квадратичной зависимостью ионизации от зарядов ядер, крайне малой угловой расходимостью релятивистских фрагментов и зачастую примерным совпадением по магнитной жесткости с ядрами пучка. Поэтому результаты, полученные в 1970–1990-х гг. методом ЯЭ, и сохранившиеся файлы данных в аспекте состава релятивистской фрагментации от легких до самых тяжелых ядер не утратили актуальности, а облученные слои могут применяться для углубленных исследований.

С начала 2000-х гг. метод ЯЭ применяется на нуклотроне ОИЯИ в эксперименте BECQUEREL для изучения в релятивистском подходе кластеризации легких стабильных и радиоактивных ядер. Особенности изотопов $^{7,9}\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10,11}\text{C}$, $^{12,14}\text{N}$ выявились в вероятностях каналов их диссоциации. Идентификация релятивистских распадов ^8Be и ^9B указала на возможность поиска троек α -частиц в состоянии Хойла (HS) в релятивистской диссоциации.

^8Be и HS рассматриваются как простейшие состояния α -частичного конденсата Бозе–Эйнштейна. Как 4α -конденсат рассматривается шестое возбужденное состояние 0^+_6 ядра ^{16}O при 660 кэВ над 4α -порогом. Его α -распад мог бы идти в последовательности $^{16}\text{O}(0^+_6) \rightarrow ^{12}\text{C}(0^+_2) \rightarrow ^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 2\alpha$ или же $^{16}\text{O}(0^+_6) \rightarrow ^8\text{Be}(0^+) \rightarrow 4\alpha$. Кроме того, ядра ^9B и HS могут служить основами в ядерных молекулах ^9Br , ^9Ba и $^{12}\text{C}(0^+_2)$ р. Как и α -конденсатным состояниям, нестабильным состояниям с нечетным числом протонов могут отвечать возбуждения сразу над соответствующими порогами, имеющие электромагнитные ширины распадов.

Все эти состояния могут единообразно исследоваться в периферических взаимодействиях релятивистских ядер. Согласно ширинам ядра ^8Be , ^9B и HS являются полноценными фрагментами релятивистской диссоциации. Продукты их распада образуются при пробегах от нескольких тысяч (^8Be и HS) до нескольких десятков (^9B) атомных размеров, т. е. за время на много порядков большее, чем время возникновения других фрагментов. Не будучи непосредственно наблюдаемыми, ^8Be , ^9B и HS должны проявляться как пары и тройки релятивистских фрагментов He и H с наименьшими углами разлета вследствие наименьшей энергии распада.

Используя имеющиеся угловые измерения событий когерентной диссоциации $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ и $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$, метод инвариантной массы несложно распространить на идентификацию релятивистских распадов состояния Хойла. В последнем случае распады HS могут проявиться в диссоциации $^{16}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{C}^* \rightarrow 3\alpha$ + α . Оба распределения по инвариантной массе 3α -троек $Q_{3\alpha}$ проявляют сходство (рисунок). В обоих случаях наблюдаются пики распределений в области $Q_{3\alpha} < 0,7$ МэВ, где ожидается сигнал HS. На этой основе вклад распада HS в $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ составляет $(11 \pm 3)\%$, а в случае $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ — $(22 \pm 2)\%$.



Распределение числа 3α -троек $N_{3\alpha}$ по инвариантной массе $Q_{3\alpha}$ в 316 «белых» звездах $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$ (сплошная линия) и в 641 «белой» звезде $^{16}\text{O} \rightarrow 4\alpha$ (штриховая линия) при 3,65А ГэВ; на вставке — увеличенная часть $Q_{3\alpha} < 2$ МэВ, нормированная на числа «белых» звезд N_{ws}

Будучи апробированным при изучении легких ядер, подобный отбор применим к диссоциации более тяжелых ядер для поиска более сложных состояний. В свою очередь, продуктами α -частичного или протонного распада этих состояний могли бы служить состояния Хойла или ^9B и затем ^8Be . Возможен вариант распада с возникновением больше одного состояния из этой тройки. Начальным этапом поисков в любом случае должен служить отбор событий, содержащих релятивистские распады ^8Be . С использованием имеющейся статистики по ядрам Si и Au идентифицированы десятки распадов ^8Be и ^9B . В то же время число 3α -троек, относимых к распадам состояния Хойла, составляет единицы, что требует наращивания статистики до современного эквивалента ^8Be . Тогда станет осуществим поиск возбужденного состояния $^{16}\text{O}(0^+_6)$. На этом пути нет принципиальных проблем, поскольку имеется достаточное количество ранее облученных слоев ЯЭ, при поперечном сканировании которых требуемая статистика α -ансамблей достижима.

Полученные результаты позволяют оценить перспективы представленного подхода в современных проблемах ядерной физики. Среди важнейших из них — проверка теоретических представлений о материи, возникающей в результате соединения нуклонов в кластеры, не имеющие возбужденных состояний до порога связи. Это легчайшие ядра ^4He (α -частицы), а также дейтроны (d), тритоны (t) и ядра ^3He , или гелионы (h). Предсказана эволюция состава легчайших изотопов при ядерной плотности менее нормальной и температуре несколько мегаэлектронвольт. Прохождение через такую фазу может оказаться необходимым на пути к синтезу тяжелых ядер. Идентификация изотопов $^{1,2,3}\text{H}$ и $^3,4}\text{He}$ методом многократного рассеяния позволяет расширить анализ кластерных состояний в направлении свойств разреженной материи.

Стоит надеяться, что быстрый прогресс в анализе изображений позволит придать совершенно новый размах использованию метода ЯЭ при исследовании ядерной структуры в релятивистском подходе. Решение поставленных задач требует инвестиций в современные автоматизированные микроскопы и воссоздание на современном уровне технологии ЯЭ. Вместе с тем такое развитие будет базироваться на классическом методе ЯЭ, основы которого были заложены семь десятилетий тому назад в физике космических лучей. Весь этот комплекс проблем, объединенных проблемой идентификации релятивистских нестабильных состояний, был представлен на недавнем тематическом совещании по кластерной физике [1,2]. Предложения по развитию эксперимента BECQUEREL в рамках темы ОИЯИ по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительном комплексе нуклотрон–NICA были рассмотрены на январской сессии ПКК по ядерной физике.

Список литературы

- 1 Topical Workshop "Light Clusters in Nuclei and Nuclear Matter: Nuclear Structure and Decay, Heavy Ion Collisions, and Astrophysics", Trento, Italy, 2019. <https://indico.ectstar.eu/event/52/>.
- 2 Artemenkov D.A., Bradnova V., Chernyavsky M.M., Firu E., Haiduc M., Kornegrutsa N.K., Malakhov A.I., Mitsova E., Neagu A., Peresadko N.G., Rusakova V.V., Stanoeva R., Zaitsev A.A., Zarubina I.G., Zarubin P.I. Unstable States in Dissociation of Relativistic Nuclei. Recent Findings and Prospects of Researches. Preprint. <https://arxiv.org/abs/2004.10277>

Контакты
Обратная связь
Путеводитель
Визит в ОИЯИ

Работа в ОИЯИ
Бизнес с ОИЯИ

Диссертационные советы
Информация о мероприятиях ОИЯИ в Indico

COVID-19

Государства-члены

Ассоциированные члены