

Дьячков В.В., Зарипова Ю.А.,
Юшков А.В.

**Измерения на пучках
ускорителей кинематических
треков как прямой метод
определения
мультикластерных
внутриядерных амплитуд**

Впервые разработан прямой метод обнаружения внутриядерных сгустков ядерной материи – кластеров на основе уникальных кинематических особенностей упругого рассеяния тождественных частиц, а также тяжелой ускоренной частицы на легком ядре-мишени на пучках ускорителей. Указанная уникальность, как это показано авторами, состоит в том, что угловое распределение упруго рассеянной α -частицы в лабораторной системе координат в случае рассеяния тождественных частиц ограничено углом $\theta_{\text{ACK}} = 90^\circ$, а при рассеянии тяжелой частицы на легком ядре-мишени ограничивается критическим углом $\theta_{\text{ACK}} < 90^\circ$. Данный экспериментальный метод однозначно доказал пространственную локализацию мультикластеров в объеме ядра. Уникальность метода состоит еще и в том, что в одном эксперименте измеряются все внутриядерные кластерные амплитуды. Метод продемонстрирован на абсолютном совпадении кинематик для кластеров, находящихся внутри ядра, и легких ядер-мишеней в виде свободных микрочастиц.

Ключевые слова: кластеры, кинематика тождественных частиц, клатреки, критический угол, упругое рассеяние альфа-частицы на легких кластерах.

Dyachkov V.V., Zaripova Y.A.,
Yushkov A.V.

**Measurements of kinematic
tracks on accelerator beam as
a direct method of determining
multicuster intranuclear
amplitudes**

For the first time the direct method of detection of intranuclear clusters of nuclear matter was developed. This method is based on the unique kinematic features of elastic scattering of identical particles and heavy accelerated particle on the light target nucleus. The specified uniqueness, as is shown by the authors, consists in that angular distribution of elastically scattered α -particles in the laboratory system in the case of the scattering of identical particles is limited to $\theta_{\text{lab}} = 90^\circ$, and the scattering of heavy particles on light target nucleus is limited by the critical angle $\theta_{\text{lab}} < 90^\circ$. The method unequivocally proved their spatial localization in the volume of the nucleus. The uniqueness of the method consists also in the fact that in one experiment all intranuclear clustered amplitudes are measured. The method is shown on absolute coincidence of kinematics for the clusters inside the nucleus, and light target nuclei in the form of free microparticles.

Key words: clusters, kinematics of identical particles, clutricks, critical angle, elastic scattering of alpha particles on light clusters.

Дьячков В.В., Зарипова Ю.А.,
Юшков А.В.

**Мультикластерлі ішкі ядролық
амплитудаларды тікелей
зерттеу әдісі секілді
кинематикалық тректерді
шоғырында есептеу**

Алғаш рет ядро материяның ядро ішіндегі түйіртпектері – кластерлері анықтау тікелей әдісі әзірленді. Тепе-тең бөлшектердің серпімді шашыратудың сонымен бірге жеңіл ядроға ауыр тездетілген бөлшегі үдеткіштердің шоғырында бірегей кинематикалық ерекшеліктеріне мынау әдісі негізделген. Авторлардың көрсетілгендей, көрсетілген қайталанбаушылық, тұр бұрыштағы үлестіруі тепе-тең бөлшектерді шашыратудың жағдайында зертханалық координаттар жүйесінде альфа-бөлшек $\theta_{\text{ACK}} = 90^\circ$ шектеледі, ал жеңіл ядроға ауыр бөлшекті шашыратуда сындық бұрыш $\theta_{\text{ACK}} < 90^\circ$ шектеледі. Бұл эксперименттік әдісі ядросының көлемі бірегей мультикластерлі кеңістіктік оқшаулау дәлелдеді. Әдісі бірегейлігі табылатындығында бір экспериментте барлық ядро ішіндегі кластердің амплитудасы өлшенген. Әдіс ядроға кластерлер және тегін микро бөлшектер түрінде жеңіл ядролардың кинематикалық абсолютті сәйкестік бойынша көрсетілді.

Түйін сөздер: кластерлер, бірдей бөлшектердің кинематикасы, клатректер, сын бұрышы, жеңіл кластерлер бойынша альфа бөлшектердің серпімді шашырау.

ИЗМЕРЕНИЯ НА ПУЧКАХ УСКОРИТЕЛЕЙ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ТРЕКОВ КАК ПРЯМОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МУЛЬТИКЛАСТЕРНЫХ ВНУТРИЯДЕРНЫХ АМПЛИТУД

Введение

Одной из фундаментальных проблем современной ядерной физики является поиск прямых доказательств существования внутри ядер различных легких кластеров (мультикластеров), часто называемых в литературе нуклонными ассоциациями [1]. Обнаружение пространственно обособленных внутриядерных кластеров – актуальная задача, которая будет решена только при разработке прямого, а не косвенного, метода доказательства наличия таких кластеров. Альтернативной концепцией, как известно, являются представления о динамических нуклонных корреляциях. Стимулирующими факторами к поиску прямого метода служит убежденность основателей ядерной физики Резерфорда и Мейтнер в том, что ядра состоят из альфа-частиц [2], а также многочисленные теоретические работы по структуре ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ [3,4], в которых эти изотопы прямо представляются как трехкластерные структуры.

Метод прямого выявления кластеров в ядрах

Целью данной работы явилась разработка прямого экспериментального метода обнаружения внутриядерных мультикластеров на основе уникальных кинематических особенностей [5] упругого рассеяния тяжелой ускоренной частицы на легком ядре-мишени (рисунок 1).

Указанная уникальность состоит в том, что угловое распределение упруго рассеянной «тяжелой» α -частицы в л.с.к. упирается в критический угол $\theta_{\text{крит}}$

$$\sin \theta_{\text{крит}} = a/A, \quad (1)$$

где a – масса налетающей (ускоренной) α – частицы; A – масса ядра-мишени (${}^1\text{H}$).

Идея метода состоит в том, что если ядро не однородная 3D-структура из нуклонов, а периодическая структура из пространственно обособленных кластеров типа дейтронов, тритонов, ядер ${}^3\text{He}$, альфа-частиц (ядер ${}^4\text{He}$) и даже ${}^{16}\text{O}$, тогда в энергетическом спектре упруго рассеянных α -частиц должны быть

пики, соответствующие уравнению (1), что особенно однозначно выделяется при использовании позиционно-чувствительных детекторов [6].

Для мультикластеров, перечисленных выше, при условии, что налетающей ускоренной частицей будут альфа-частицы, значения критического угла следующие: $\theta_{\text{крит}} = 90.0^\circ$ (реакция ${}^4\text{He}(\alpha, \alpha){}^4\text{He}$); 48.6° (реакция ${}^3\text{He}(\alpha, \alpha){}^3\text{He}$); 30.0° (реакция $\text{D}(\alpha, \alpha)\text{D}$); 14.5° (реакция ${}^1\text{H}(\alpha, \alpha){}^1\text{H}$). При наличии угла $\theta_{\text{крит}}$, естественно, в угловом распределении возникают стремительно нарастающие производные $dE/d\theta$, стремящиеся к бес-

конечности при приближении к $\theta_{\text{крит}}$ (рисунок 1). Это накладывает особо жесткие условия к угловой разрешающей способности спектрометра $\delta\theta$ рассеянных частиц, величину которой предварительно можно оценить как $\delta\theta \sim 0.2\text{--}0.5^\circ$, что в реальных измерениях на ускорителях выполняется крайне редко [7]. Такие же жесткие условия в нашем методе накладываются на шаг по углу $\Delta\theta \sim 0.2\text{--}0.5^\circ$, что также является редким явлением в экспериментах по рассеянию и реализовалось, по-видимому, лишь в работах одного из соавторов настоящей статьи [8].

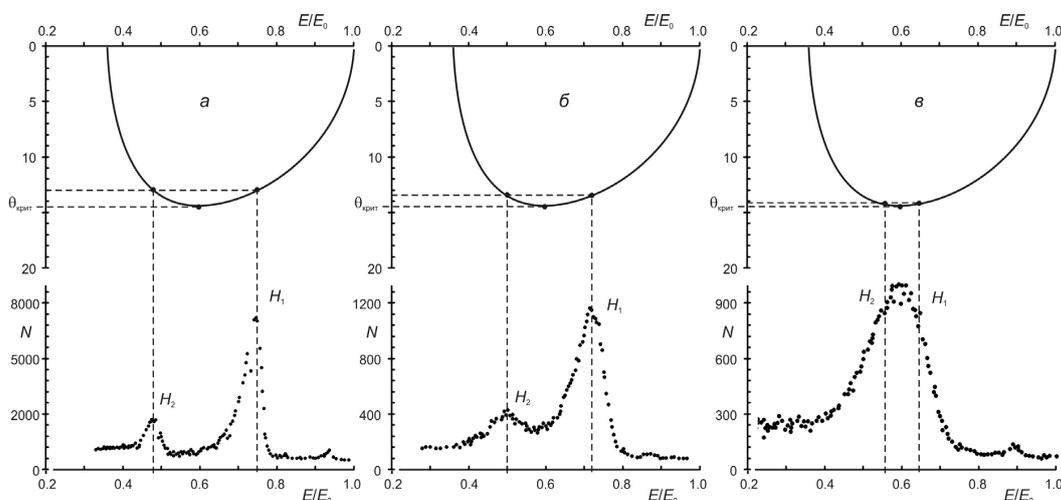


Рисунок 1 – Кинематические особенности упругого рассеяния тяжелой ускоренной α -частицы на легком ядре-мишени – ${}^1\text{H}$ (протоне): а) реакция ${}^1\text{H}(\alpha, \alpha){}^1\text{H}$, угол 13° для полиэтиленовой мишени – $(\text{CH}_2)_n$; б) угол 13.5° ; в) то же для угла 14°

Следующим принципиально важным условием для успешной реализации метода является правильный выбор зондирующей частицы. Тщательный анализ показал, что таким зондом оптимально является только α -частица. В самом деле, этот «крепкий орешек» имеет энергию связи $\varepsilon = 28,297$ МэВ [9]. Первый возбужденный уровень у нее лежит на высоте $E^* = 20.2$ МэВ, плотность ядерной материи у α -частицы $\rho = 0.90$ Фм $^{-3}$ [9], спин основного состояния $I^\pi = 0^+$, параметр квадрупольной ядерной деформации $\beta_2 = 0.17$. Такой плотный сферический компактный, но тяжелый, по отношению к предполагаемым кластерам, зонд, по-видимому, идеален для решения поставленной задачи. Действительно, из рисунка 2 видно, что в мишени ${}^{24}\text{Mg}$, при ее бомбардировки α -частицами с энергией 29.0 МэВ, сразу же обнаруживаются классические составляющие ядерной структуры – нуклоны.

Необходимым требованием к поиску внутриядерных мультикластеров является правиль-

ный подбор энергии налетающих α -частиц E_α . В наших первых экспериментах это $E_\alpha = 29.0$ МэВ, что соответствует длине де-бройлевской волны $\lambda_\alpha = 0.84$ Фм. В таблице 1 приведены данные по размерам ядра ${}^{24}\text{Mg}$ и ядер-кластеров $p(n)$, d , t , ${}^3\text{He}$ и α -частицы. Видно, что все условия для их зондирования внутри объема ядра при этой энергии ${}^{24}\text{Mg}$ соблюдены.

На рисунке 2 представлены кривые кинематики упругого рассеяния налетающих α -частиц с энергией $E_\alpha = 29.0$ МэВ на матричном ядре ${}^{24}\text{Mg}$, с возбуждением основного и первого коллективного уровня 2^+ . Здесь же даны кинематические кривые на внутриядерных кластерах в этом ядре, указанных в таблице 1. Видно, что в эксперименте получены ожидаемые своеобразные кластерные треки, которые мы в дальнейшем будем называть «клатреки». Ясно, что именно клатреки являются прямым доказательством наличия в ядре ${}^{24}\text{Mg}$ всех искомым кластеров.

Таблица 1 – Ядерные размеры легких изотопов [10]

Тип ядер-кластеров	^{24}Mg	p	d	t	^3He	α
Ядерные радиусы, Фм	3.06	0.88	2.14	1.76	1.97	1.68
Диффузность края ядра, Фм	1.26	–	–	–	–	1.45

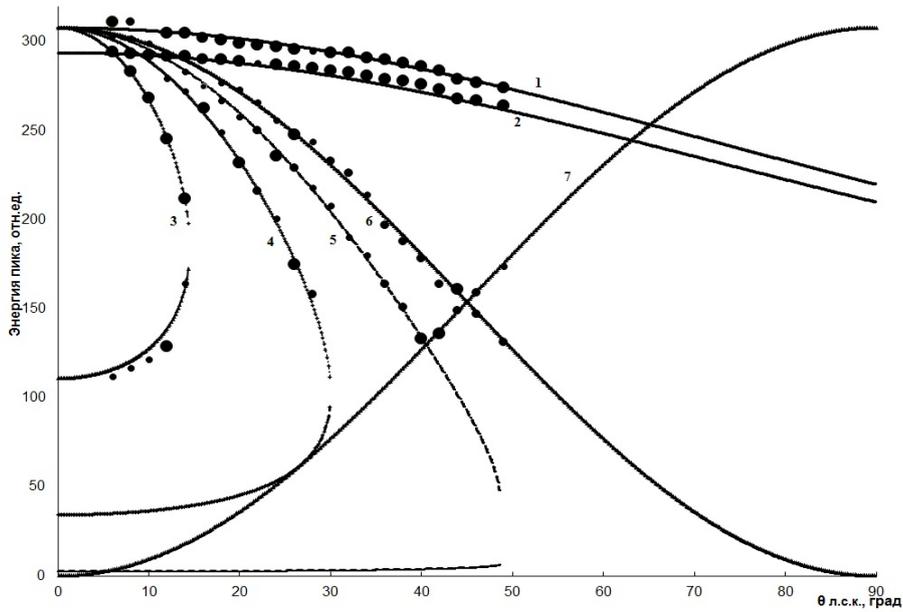


Рисунок 2 – Прямое обнаружение внутриядерных кластеров при бомбардировке ядра ^{24}Mg альфа-частицами с энергией 29.0 МэВ при помощи клатреков: 1,2 – реакции $^{24}\text{Mg}(\alpha,\alpha)^{24}\text{Mg}$ (уровень 0^+) и $^{24}\text{Mg}(\alpha,\alpha)^{24}\text{Mg}$ (уровень 2^+); 3 – $^1\text{H}(\alpha,\alpha)^1\text{H}$; 4 – $\text{D}(\alpha,\alpha)\text{D}$; 5 – $^3\text{He}(\alpha,\alpha)^3\text{He}$; 6 – $^4\text{He}(\alpha,\alpha)^4\text{He}$; 7 – ядра отдачи из реакции 6.

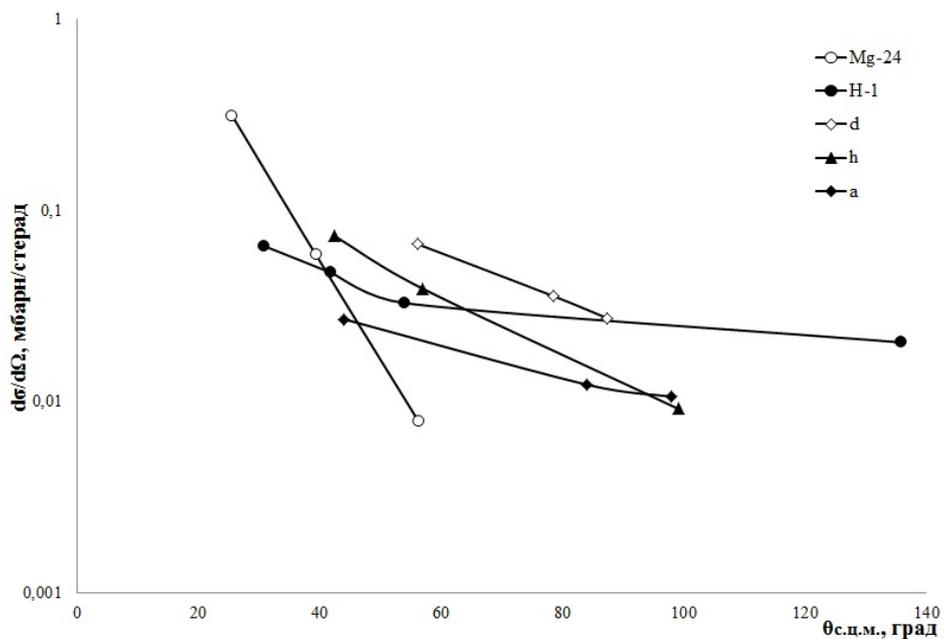


Рисунок 3 – Соотношения мультикластерных внутриядерных амплитуд

На рисунке 3 даны относительные амплитуды волновых функций мультикластеров указанных выше. С точностью до 30% они оказались равными ожидаемым величинам.

Заключение

Априори казалось, что в эксперименте будут обнаружены только клатреки, соответствующие альфа-частичным кластерам, так как ранее было доказано [11] экспериментально, что данное ядро состоит из шести альфа-кластеров. Неожиданно очень ярко проявились нуклоны, а также и все

остальные мультикластеры. Это навело на мысль о возможности в одном эксперименте с большой точностью измерить относительные амплитуды всех мультикластеров. Необходимо только учесть, что, если толщина мишени для ядер ^{24}Mg равна N_A , то для нуклонов $N_p=24N_A$, для дейтронов $N_d=12N_A$, кластеров $^3\text{He}=h$; $N_h=8N_A$; наконец, для альфа-кластеров $N_\alpha=6N_A$.

Если поставить цель экспериментально обнаружить только один тип кластеров, в этом случае следует воспользоваться, разработанной нами ранее, методикой рассеяния тождественных частиц в особой постановке эксперимента [12].

Литература

- 1 Неудачных В.Г., Смирнов И.Ф. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. - М.: Наука, 1969, 414 с.
- 2 Galiulin R.V. Галиулин Р.В. Кристаллографическая геометрия. Изд. 3-е. - М.: Либроком, 2009, 134 с.
- 3 Zhusupov M.A., Ibraeva E.T., Kabatayeva R.S., Krassovitskiy P.M. Interaction of α particles with ^6Li and ^7Li nuclei at low energies // Russian Academy of Sciences: Physics, 2010, Vol. 74, Issue 6. pp. 885-889.
- 4 Burkova N.A., Zhusupov M.A., Kabatayeva R.S. A potential description of α -particle elastic scattering by the ^6Li and ^7Li nuclei // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2012, Vol. 76, Issue 10. pp. 1066-1069.
- 5 Nemets O.F., Gofman Yu.V. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. - Киев: Наукова думка, 1975, 415 с.
- 6 Dyachkov V.V., Yushkov A.V., Shakirov A.L. Alpha-particle spectrometry using position-sensitive solid-state track detectors // Instruments and Experimental Techniques. Nuclear Experimental Techniques, 2013, Vol. 56, № 5. pp. 521-524.
- 7 Кутербеков К.А., Юшков А.В. Метод измерения угловых характеристик камеры рассеяния // Приборы и техника эксперимента, 1986, №3. - С.35-37.
- 8 Юшков А.В., Леднов Д.А. Вульбергтовское рассеяние альфа-частиц на ядрах // Известия АН СССР. Серия физическая, 1993, Т.57, №1. С.107-114.
- 9 Жусупов М.А., Юшков А.В. Физика атомных ядер. - Алматы, 2007. 736 с.
- 10 <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/radchart/radmain.html>
- 11 Yushkov A.V., Pavlova N.N., Ivanov A.M., Toktarov K.A. Юшков А.В., Павлова Н.Н., Иванов А.М., Тохтаров К.А. Некоторые закономерности в изотопических изменениях формы легких, средних и тяжелых ядер // Известия АН СССР. Серия физическая, 1979, Т.43, № 11. С. 2317-2323.
- 12 Зарипова Ю.А. Новый кинематический метод экспериментального обнаружения рассеяния на кластерах // Сборник тезисов Международной конференции студентов и молодых ученых «Фараби адеми». Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан. 13-16 апреля 2015. с. 31.

References

- 1 Neudachin V.G., Smirnov Yu.F. Nuklonnye associacii v legkikh yadrah. - M.: Nauka, 1969, 414 s.
- 2 Galiulin R.V. Kristallograficheskaya geometriya. Izd. 3-e. - M.: Librokom, 2009, 134 s.
- 3 Zhusupov M.A., Ibraeva E.T., Kabatayeva R.S., Krassovitskiy P.M. Interaction of α particles with ^6Li and ^7Li nuclei at low energies // Russian Academy of Sciences: Physics, 2010, Vol. 74, Issue 6. pp. 885-889.
- 4 Burkova N.A., Zhusupov M.A., Kabatayeva R.S. A potential description of α -particle elastic scattering by the ^6Li and ^7Li nuclei // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2012, Vol. 76, Issue 10. pp. 1066-1069.
- 5 Nemets O.F., Gofman Yu.V. Spravochnik po yadernoy fizike. - Kiev: Naukova dumka, 1975, 415 s.
- 6 Dyachkov V.V., Yushkov A.V., Shakirov A.L. Alpha-particle spectrometry using position-sensitive solid-state track detectors // Instruments and Experimental Techniques. Nuclear Experimental Techniques, 2013, Vol. 56, № 5. pp. 521-524.
- 7 Kuterbekov K.A., Yushkov A.V. Metod izmereniya uglovykh kharakteristik kamery rasseyaniya // Pribory i tehnika eksperimenta, 1986, №3. S.35-37.
- 8 Yushkov A.V., Lednov D.A. Vul'f-breggovskoe rasseyaniye al'fa-chastits na yadrah // Izvestiya AN SSSR. Seriya fizicheskaya, 1993, T.57, №1. S.107-114.
- 9 Zhusupov M.A., Yushkov A.V. Fizika atomnykh yader. - Almaty, 2007. 736 s.
- 10 <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/radchart/radmain.html>
- 11 Yushkov A.V., Pavlova N.N., Ivanov A.M., Toktarov K.A. Nekotorye zakonovernosti v izotopicheskikh izmeneniyakh formy legkikh, srednikh i tyazhelykh yader // Izvestiya AN SSSR. Seriya fizicheskaya, 1979, T.43, № 11. S. 2317-2323.
- 12 Zariyova Yu.A. Novyy kinematicheskyy metod eksperimentalnogo obnaruzheniya rasseyaniya na klasterakh // Sbornik tezisev Mezhdunarodnyy konferencii studentov i molodykh uchenykh «Farabi alemi». Kazakhskiy Natsionalnyy Universitet imeni al-Farabi, Almaty, Kazakhstan. 13-16 aprelya 2015. s. 31.