

С 3434
0-375

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

На правах рукописи

А.А.Оглоблин

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С ИОНАМИ ЛИТИЯ

(055 - Физика атомного ядра и космических лучей)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук

Д у б н а
1970

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

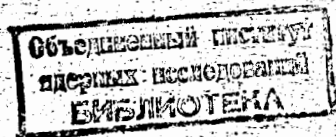
На правах рукописи

А.А.Оглоблин

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ С ИОНАМИ ЛИТИЯ

(055 - физика атомного ядра и космических лучей)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук



Дубна
1970

Работа выполнена в ордена Ленина Институте атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Официальные оппоненты:

действительный член АН СССР
действительный член АН СССР
доктор физико-математических
наук, профессор

Г.Н.Флеров
И.М.Франк

В.Г.Соловьев

Ведущее предприятие:

Украинский физико-технический институт

Автореферат разослан " " 1970 г.
Защита диссертации состоится " " 1970 г.
на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ
(г. Дубна, Московской обл.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Ученого совета

(О.А.ЗАБИЦКОГО)

В В Е Д Е Н И Е

Прогресс ядерной физики во многом зависит от возможности использовать для бомбардировки ядер новые частицы. Все изучавшиеся до сих пор ядерные реакции можно разделить на две группы: реакции, вызываемые легкими частицами (вплоть до He^4), и реакции с тяжелыми ионами (начиная с ядер бора и углерода). Реакции под действием ионов промежуточной массы Li^6 , Li^7 , Be^9 до настоящего времени практически не исследовались. Между тем взаимодействие этих "полутяжелых" ионов с другими ядрами может оказаться весьма своеобразным и во многом сильно отличающимся от изучавшихся до сих пор ядерных реакций.

Ожидаемое своеобразие реакций, вызываемых ионами лития, связано с тем, что ядра Li^6 и Li^7 принадлежат к числу наименее связанных стабильных ядер ($\epsilon_{\text{Li}^6} = 1,47$ Мэв; $\epsilon_{\text{Li}^7} = 2,47$ Мэв) и, как показывают многочисленные данные, обладают выраженной "молекулярной" (кластерной) структурой: $\text{Li}^6 = \alpha + d$ и $\text{Li}^7 = \alpha + t$.

Специфическая структура ядер лития должна привести к большой вероятности таких процессов, как расщепление Li^6 и Li^7 (например, $\text{Li}^6 \rightarrow \alpha + d$), обмен или замещение кластеров, и некоторых других. Наиболее интересным взаимодействием, которое в реакциях с ионами лития может играть существенную роль, является процесс передачи одной из "составных частей" ядер лития — α -частицы, дейтрона или тритона — путем простого механизма, аналогич-

более хорошо известным реакциям срыва нуклона (d, ρ) или (d, n). В результате реакции (Li^6, d), (Li^7, t), (Li^6, α) и (Li^7, α) будут приводить к преимущественному возбуждению уровней остаточного ядра, имеющих структуру остов + соответствующий кластер, подобно тому как реакции (d, p) и (d, n) отбирают одночастичные состояния ядер.

Возможность возбуждать кластерные уровни ядер делает реакцию с ионами лития уникальным инструментом ядерной спектроскопии. Можно надеяться, что изучение этих реакций приведет к такому же прогрессу в исследовании кластерной структуры ядра, какой был достигнут в изучении одночастичных состояний ядер с помощью реакций (d, p) и (d, n).

Начиная с 1960 г. ионы лития ускоряются на целом ряде генераторов Ван де Граафа. Многочисленные эксперименты на этих ускорителях не позволили, однако, выявить основные особенности литиевых реакций, так как энергия ионов была слишком мала - не более 6 Мэв. Из-за большого кулоновского барьера изучались только самые легкие ядра (до C^{12}) и в весьма ограниченном интервале энергий возбуждения. Полученные результаты были неоднозначны, и необходимость проведения экспериментов при больших энергиях (по крайней мере 15-20 Мэв) становилась очевидной.

Получение пучков ионов лития с достаточно большой энергией связано с серьезными трудностями. Первая такая попытка была предпринята в 1963 г. в Иельском университете (США) на линейном ускорителе тяжелых ионов. Однако из-за очень малых токов был обнаружен только развал Li^6 на α -частицу и нейтрон, а реакция передачи наблюдать не удалось. В 1963-1964 гг. была предпринята попытка ускорить ионы лития на 1,5-метровом циклотроне Аргонской национальной лаборатории (США). Но после нескольких выключений лития в камеру циклотрона эти опыты также были прекращены без получения каких-либо физических результатов. Только в 1967-1968 годах появились сообщения о начале работ с ионами лития при энергии 16-20 Мэв на тандемах в Институте Макса Планка (Гейдельберг, ФРГ) и Пенсильванском университете (США). К этому времени основная часть нашей работы была уже выполнена.

Настоящая работа проводилась на циклотроне Института атомной энергии им. И.В.Курчатова. Опыты по ускорению ионов лития были начаты в конце 1964 г. Первые физические результаты были сообщены на международных конференциях в Лясичиле (Швеция) [1] и Дубне [2] в 1966 г.

Основные результаты работы были доложены на ежегодных совещаниях по ядерной спектроскопии в Харькове (1967 г.) [3], Риге (1968 г.) [4], Бресте (1969 г.) [5], международном симпозиуме по структуре ядра в Дубне (1968 г.) [6-8] и опубликованы в статьях [9-17]. Обзор проведенных исследований был сделан на международной конференции по ядерным реакциям с тяжелыми ионами в Гейдельберге в июле 1969 г. [18].

Диссертация состоит из шести глав. В первой главе рассмотрена постановка задачи, во второй - методика исследований, третья глава посвящена реакциям передачи α -частицы (Li^6, d) и (Li^7, t), четвертая - реакциям передачи дейтрона и тритона, в пятой главе описаны другие изучавшиеся реакции с ионами лития, шестая глава посвящена анализу данных о кластерной структуре ядер.

МЕТОДИКА

Для выполнения программы систематического исследования реакций с ионами лития было необходимо решение большого комплекса научно-технических задач, главными из которых являются следующие три:

1. Создание эффективного источника ионов лития и осуществление их ускорения в циклотроне.

2. Создание регистрирующей системы, позволяющей детектировать частицы с хорошим разрешением в широком интервале энергий (до 40-60 Мэв) и под различными углами, включая самые малые.

3. Создание развитой системы многомерного анализа, позволяющей производить надежное отделение одних частиц от других и измерение их спектров.

В источнике ионов лития, применяемом на циклотроне ИАЭ им. И.В.Курчатова, использовался принцип дугового источника с разрядом в парах металлического лития. Чтобы жидкий литий не

попадал в разрядную камеру, создавалось принудительное распределение температуры вдоль тигля и паропровода. Тигель, паропровод и разрядная камера были полностью герметизированы, размеры эмиссионной щели минимальны ($1 \times 2 \text{ мм}^2$).

Параметры введенного пучка двухзарядных ионов были следующими: интенсивность — до 5 мка, энергия — Li^3 от 28 до 30,5 Мэв, Li^6 — от 26 до 36,5 Мэв. Энергетический разброс пучка был около 0,5 %.

Были применены две системы регистрации частиц — спектрометр тритонов [19] и телескоп счетчиков $\Delta E - E$ с камерой рассеяния.

В подавляющем большинстве измерений использовался телескоп счетчиков $\Delta E - E$. ΔE — счетчиком служила ионизационная камера с сеткой. E — счетчиком был $\text{Si}(\text{Li})$ — счетчик с толщиной чувствительного слоя до 3,5 мм. Энергетическое разрешение камеры составляло 4–6 %, полупроводникового счетчика 0,6 – 0,7 %. Особенностью разработанной камеры была возможность проводить измерения при самых малых углах, даже под 0° .

Накопление, анализ и первичная обработка поступающей от детекторов информации проводилась в измерительном центре циклотронной лаборатории ИАЭ [20].

В состав измерительного центра входят: четыре анализатора АИ-4096, способных работать как порознь, так и совместно; пульт управления экспериментом, на котором сосредоточены трубки для наблюдения спектров, световой карандаш и блоки управления анализаторами, мишенями и счетчиками; система связи с вычислительной машиной М-220; различные схемы предварительного отбора импульсов, выводные устройства и т.д.

В качестве стандартного режима был разработан так называемый программируемый анализ [21]. Один из анализаторов измеряет двумерные спектры $\Delta E - E$, а ячейки памяти, соответствующие определенному сорту частиц, маркируются с помощью светового карандаша. Второй анализатор, получая от первого разрешение на регистрацию, измеряет распределение по энергии для каждого сорта частиц. Система программируемого анализа по сравнению с обычными многомерными анализаторами имеет два основных достоинства: экономия памяти без ухудшения разрешения (по получаемому разре-

шению описанная система эквивалентна памяти объемом 128×256 каналов) и возможность измерять спектры вдоль произвольных кривых, не вводя первичную информацию в вычислительную машину.

Энергетическое разрешение было 300–400 кэв и определялось в основном толщиной мишеней. Точность измерения энергии возбуждения уровней составляла ± 100 кэв. Ошибка в определении углов не превышала $\pm 0,5^\circ$. Относительные ошибки в определении дифференциальных сечений определялись главным образом статистикой и точностью отделения данной группы от сплошного спектра или других линий.

ОБЩИЙ ХАРАКТЕР РАБОТЫ

К началу настоящей работы не было никаких данных о реакциях, называемых ионами лития с энергией свыше 5–6 Мэв, кроме процесса развала. Поэтому наша работа первоначально носила поисковый характер, постепенно переходя в систематическое исследование всех основных литиевых реакций при средних энергиях.

Основное внимание, естественно, было уделено реакциям, в которых ожидался механизм передачи кластеров: α — частичного в реакциях (Li^6, d), (Li^7, t), дейтронного в реакции (Li^6, α) и тритонного в реакции (Li^7, α). Программа работ была выбрана так, чтобы решить две основные задачи:

- 1) выяснить, действительно ли в этих реакциях играет основную роль механизм передачи;
- 2) получить данные о различных ядрах — как тех, для которых наиболее вероятно проявление кластерной структуры и предлагались соответствующие модели, так и тех, для которых такая структура не ожидалась.

В ходе работы выявилась необходимость для уточнения и дополнения получаемых данных изучать некоторые реакции, вызываемые легкими частицами, например реакцию (He^3, p), в которой так же, как и в (Li^6, α), может преобладать передача дейтрона. Были изучены и некоторые другие виды взаимодействия ионов лития с ядрами — расщепление в поле ядра, реакция (Li^6, t), упругое рассеяние, а также некоторые реакции, в которых Li^6 и Li^7 не ускорялись, а служили ядрами-мишенями и бомбардировались более легкими частицами. В таблице I перечислены исследовавшиеся в насто-

ячей реакции и ядра. Энергия ионов Li^6 была 26 Мэв и в некоторых случаях 36 Мэв, энергия ионов Li^7 — 30 Мэв.

Таблица I

| Реакции | Ядра-мишени |
|----------------------------|--|
| Передача α -частицы | |
| (Li^6, d) | $Be^9, C^{12}, C^{13}, O^{16}, Mg^{24}, Si^{28}, Ca^{40}$ |
| (Li^7, t) | $Li^6, Be^9, C^{12}, C^{13}, O^{16}, Ne^{20}, Mg^{24}, Si^{28}, Ca^{40}$ |
| Передача дейтрона | |
| (Li^6, α) | $Li^6, Li^7, Be^9, O^{12}, O^{16}, Mg^{24}$ |
| (He^3, p) | Be^9, C^{12}, O^{16} (E = 16 Мэв) |
| (α, d) | Be^9 (E = 36 Мэв) |
| Передача тритона | |
| (Li^7, α) | $Li^6, Li^7, Be^9, C^{12}, O^{16}, Mg^{24}, Al^{27}, Si^{28}$ |
| Расщепление | |
| Li^6 | Be, C, Fe, In, Au |
| Li^7 | C, In, Au |
| Упругое рассеяние | |
| Li^6 | Be^9, C^{12} |
| Li^7 | C^{12} |
| Прочие реакции | |
| (Li^6, t) | Be^9, C^{13} |
| (p, t) | Li^7 (E = 17 Мэв) |
| (α, t) | Li^6 (E = 40 Мэв) |

РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ α -ЧАСТИЦЫ (Li^6, d) и (Li^7, t)

Современное состояние теории не позволяет применить для анализа реакций многоуклонной передачи те методы, которые с успехом использовались для определения механизма реакций одноуклонного срыва (d, p) и (d, n), например сравнение экспериментальных данных с расчетами по методу искаженных волн. Однако в случае реакций (Li^6, d) и (Li^7, t) могут быть предложены некоторые качественные критерии, вполне достаточные для определения механизма этих реакций. Если в реакциях (Li^6, d) и (Li^7, t) преобладает механизм передачи α -частицы, то следует ожидать следующих эффектов:

- 1) спектры возбуждения в обеих реакциях должны быть примерно одинаковы;
- 2) должны выполняться правила отбора по моменту и четности, запрещающие возбуждение уровней $0^-, 1^+, 2^-$ и т.д. в четно-четных ядрах, и изотопическому спину, запрещающие переходы с $\Delta T \neq 0$ не только в реакции (Li^6, d), что тривиально, но и в реакции (Li^7, t);

3) должна наблюдаться корреляция между сечениями возбуждения отдельных уровней и α -частичными приведенными ширинами, полученными из рассеяния и резонансных реакций;

4) наконец, обычным критерием прямого механизма является избирательность в возбуждении отдельных состояний остаточного ядра и специфический характер угловых распределений.

Указанные эффекты отчетливо проявились во всех изученных реакциях (Li^6, d) и (Li^7, t). Это позволило сделать уверенный вывод о том, что процесс передачи α -частицы является основным механизмом этих реакций. В качестве примера на рис. I приводятся спектры реакций $O^{16}(Li^6, d)Ne^{20}$ и $O^{16}(Li^7, t)Ne^{20}$. Видно, что из всего многообразия уровней Ne^{20} интенсивно возбуждаются состояния двух вращательных полос: 0^+ (осн.) — 2^+ — 4^+ — 6^+ и $1^-(5,80 \text{ Мэв})$ — 3^- — 5^- — 7^- , причем те из них, которые могли быть исследованы в рассеянии $O^{16} + \alpha$, обнаружили большие α -частичные приведенные ширины [22]. Уровень 2^- , 4,97 Мэв практически не возбуждается.

Угловые распределения, типичный пример которых приведен на рис. 2, имеют характерный для прямых процессов вид. В реакции (Li^6, d) угловые распределения, как правило, обнаруживают дифракционную структуру и привычную для реакций срыва зависимость положения главного максимума от передаваемого момента. В реакциях (Li^7, t) угловые распределения обычно вытянуты вперед и бесструктурны. Сечения возбуждения уровней с одинаковой структурой (например, членов одной и той же вращательной полосы) оказались приблизительно пропорциональными фактору ($2I + 1$).

Эти особенности качественно могут быть поняты, если принять во внимание различие внутренних четностей Li^6 и Li^7 и учесть возможность протекания реакции в объеме ядра. Несмотря на отсутствие количественной теории реакций (Li^6, d) и (Li^7, t), удалось выделить зависимость сечений от некоторых параметров и получить способ извлечения приближенных эквивалентов α -частичных приведенных ширин для качественного анализа структуры ядра. Обнаруженная резкая избирательность реакций (Li^6, d) и (Li^7, t) к возбуждению определенных классов уровней позволяет рассматривать такие уровни как α -частичные.

РЕАКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДЕЙТРОНА И ТРИТОНА

Открытие механизма срыва α -частицы в реакциях (Li^6, d) и (Li^7, t) делает вполне обоснованным предположение о том, что и в реакциях (Li^6, α) и (Li^7, α) может происходить передача дейтрона и тритона с преимущественным возбуждением дейтронных и тритонных состояний. Однако из-за сравнительно малой энергии связи дейтрона и тритона задача определения механизма реакции и отождествления кластерных состояний оказывается в большинстве случаев неоднозначной. По существу о реакциях (Li^6, α) и (Li^7, α) правильнее говорить как о процессах двух- и трехнуклонной передачи, частным случаем которых может явиться передача дейтронного и тритонного кластера. Целесообразно провести сравнение этих реакций с другими, в которых передается такая же комбинация нуклонов, на одних и тех же ядрах. Особый интерес представляет совместное исследование реакций передачи протона и нейтрона (Li^6, α), (He^3, p) и (α, d), так как они сильно различаются и по кинематике и по структуре налетающих частиц.

Измерения показали, что между реакциями (Li^6, α) и (He^3, p) наблюдается очень большое сходство как в угловых распределениях, так и в относительных сечениях возбуждения одних и тех же уровней (при условии $\Delta T = 0$). Пример угловых распределений приведен на рис. 3. Хорошо видна зависимость положения главного максимума от L . Реакция (α, d) обнаруживает довольно большие отличия от реакций (Li^6, α) и (He^3, p), которые не могут быть объяснены чисто кинематическими причинами. В таблице 2 приведены относительные сечения возбуждения некоторых уровней ядра N^{14} в реакциях (Li^6, α), (He^3, p) и (α, d) [23] на C^{12} .

Таблица 2

| E, Мэв | Уровень | | Конфигурация | $\sigma(0^\circ - 90^\circ) / 2I + 1$, отн. ед. | | |
|--------|---------|---|-------------------------------------|---|---------------|-----------------|
| | I^π | T | | (Li^6, α) | (He^3, p) | (α, d) |
| 0,00 | I^+ | 0 | (p) ⁻² | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 3,95 | I^+ | 0 | (p) ⁻² | 1,2 | 1,3 | 0,3 |
| 4,91 | 0^- | 0 | (p) ⁻³ (sd) ¹ | 2,6 | 3,6 | 1,6 |
| 5,10 | 2^- | 0 | | | | |
| 5,69 | I^- | 0 | (p) ⁻³ (sd) ¹ | 2,0 | 1,6 | 0,8 |
| 5,83 | 3^- | 0 | | | | |
| 6,21 | I^+ | 0 | (sd) ² | 3,7 | 5,2 | 1,2 |
| 6,44 | 3^+ | 0 | | | | |
| 7,03 | 2^+ | 0 | (p) ⁻² | 0,7 | 0,5 | 0,1 |
| 8,98 | 2^+ | 0 | (sd) ² | 5,0 | 4,0 | << 1,0 |

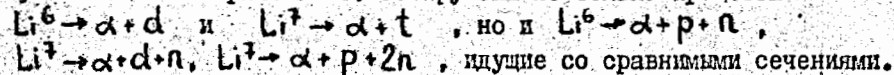
Реакции (Li^6, α) и (He^3, p) оказались избирательными к возбуждению определенных типов состояний, которые могут рассматриваться как двухнуклонные (например, имеющие (sd)²-конфигурацию), либо в некоторых случаях как кластерные "дейтронные". Пример избирательного возбуждения уровней остаточного ядра в реакции (Li^6, α) приведен на рис. 4.

Избирательность реакции (Li^7, α) оказалась несколько меньшей, что явно указывает на большую роль процесса трехнуклонной передачи при возбуждении большинства уровней. Лишь вблизи эффективного порога (т.е. величины $P_{эфф} = E_t + E_{кул}$, где E_t — энергия связи тритона в остаточном ядре, а $E_{кул}$ — кулоновский барьер системы ядро-мишень плюс тритон) наблюдались сильные переходы. Это явление оказалось общим для всех реакций передачи с ионами лития. На рис. 5 приведены типичные спектры и угловые распределения в реакции (Li^7, α), которые, как правило, довольно бесструктурны.

ПРОЧИЕ РЕАКЦИИ С ИОНАМИ ЛИТИЯ

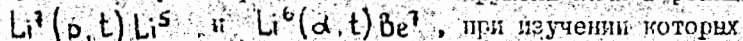
В задачи настоящей работы не входило детальное изучение всех возможных реакций с ионами лития. Тем не менее некоторые процессы удалось исследовать.

Было найдено, что наиболее вероятным процессом при взаимодействии Li^6 и Li^7 с другими ядрами является расщепление ядер лития на составные части. Сечение развала составляет значительную часть геометрического. Обнаружены не только процессы



Из полученных данных следует, что развал ядер происходит в результате "грашнелного" механизма, который связан с ядерным, а не кулоновским возбуждением. При этом расстояния максимального сближения сталкивающихся ядер, полученные на основании анализа угловых распределений, оказываются существенно большими, чем сумма радиусов ядра лития и ядра-мишени.

Кластерная структура ядер Li^6 и Li^7 и их малая энергия связи могут привести к тому, что в некоторых случаях будут происходить прямые реакции, отличающиеся от простой одноступенчатой передачи или развала. Особенно отчетливо такого рода процессы могут проявиться при взаимодействии ядер лития с более легкими частицами, когда возможно, например, замещение одного кластера на другой, выбивание кластера и аналогичные механизмы. По-видимому, такого рода процессы были обнаружены нами в реакциях



ядра лития использовались в качестве мишеней. Например, в реакции $Li^6(\alpha, t) Be^7$ интенсивно возбуждается уровень Be^7 4,53 Мэв ($7/2^-$), образование которого запрещено для механизма срыва (действительно, зеркальное состояние Li^7 очень слабо возбуждается в реакции (d, p) [24]). Вероятности возбуждения этого и других уровней Be^7 коррелируют с α -частичными приведенными широтами. Полученные результаты находятся в качественном согласии с предсказаниями дисперсионной теории прямых процессов [25].

В этой связи большой интерес представляет неожиданно открытая на ядрах Be^9 и C^{13} реакция (Li^6, t), оказавшаяся довольно избирательной к возбуждению уровней остаточного ядра и обнаружившая ряд особенностей. Ни один из рассмотренных механизмов: трехнуклонная передача, передача кластера He^3 , сложный прямой процесс, связанный с замещением слабо связанного нейтрона α -частичным кластером, — не описывает всех данных, хотя последний из упомянутых процессов качественно объясняет наиболее интенсивные переходы.

Были исследованы некоторые реакции, возникающие при взаимодействии ядер лития между собой. Из-за кластерной структуры обоих участвующих в реакции ядер могут проявиться некоторые интересные эффекты. Так, если исследовать под малыми углами взаимодействие $Li^7 + Li^6$ и регистрировать α -частицы, то при ядре-мишени Li^7 идет процесс передачи дейтрона $Li^7(Li^6, \alpha) Be^9$, а при ядре-мишени Li^6 — процесс передачи тритона $Li^6(Li^7, \alpha) Be^9$. В каждой из этих реакций должны возбуждаться, вообще говоря, разные системы уровней, но если существуют уровни с конфигурацией $\alpha + d + t$, то они будут одинаково хорошо образовываться в обеих реакциях.

Измерения показали, что самые интенсивные группы в спектрах обеих реакций действительно соответствуют одним и тем же энергиям возбуждения Be^9 — 17,9 и 21 Мэв. Учитывая тот факт, что оба эти состояния лежат вблизи порога развала $Be^9 \rightarrow \alpha + d + t$ (19,2 Мэв), можно считать весьма вероятным наличие у них структуры типа "трехатомной ядерной молекулы".

Проведенные исследования позволили впервые получить систематические экспериментальные данные о кластерах в легких ядрах.

Одним из наиболее важных результатов работы является открытие области кластерных состояний в sd -оболочке. Было показано, что ядро O^{16} в состоянии 6,05 Мэв имеет структуру $C^{12} + \alpha$, что соответствует конфигурации 4 частицы - 4 дырки: $(p_{3/2})^{-4}(sd)^4$. На этом уровне базируется полоса вращательных состояний $2^+ - 4^+ - 6^+$, также являющихся α -частичными. Аналогичная полоса $0^+ - 2^+ - 4^+ - 6^+$, начинающаяся с основного состояния, существует и в ядре Ne^{20} . Очевидно, что эти уровни имеют конфигурацию $(sd)^4$, т.е. $4p-0h$.

Эксперименты на ядре-мишени C^{13} показали, что в ядре O^{17} существует последовательность состояний $1/2^- - 5/2^- - 3/2^- - 9/2^- - 7/2^- - 13/2^-$, отвечающих структуре 4 частицы - 3 дырки: $(p_{3/2})^{-3}(sd)^4$. Совокупность полученных данных вполне надежно подтверждает гипотезу о слабой связи систем $4p-nh$ [26] для ядер с $A = 16 + 20$. Слабость взаимодействия четырех частиц с дырками является основным допущением α -частичной модели [27]. Эксперименты с реакциями (Li^6, d) и (Li^7, t) , в которых происходит прямая передача α -частицы, непосредственно доказывают α -частичный характер уровней типа $4p-nh$. В ядре Ne^{20} был обнаружен второй тип α -частичных уровней, составляющих вращательную полосу отрицательной четности $1^- - 3^- - 5^- - 7^-$ (начиная с уровня 5,80 Мэв). В ядре O^{16} аналога нечетной α -частичной полосы Ne^{20} не найдено. Это явление в принципе может быть объяснено квазимолекулярной моделью ядер O^{16} и Ne^{20} [28, 29].

Указанные α -частичные состояния являются, пожалуй, единственными из всех уровней с энергией возбуждения ≤ 10 Мэв в диапазоне $A = 16 + 40$, которые можно надежно приписать структуре остов + кластер. Общий результат, полученный при исследовании передачи α -частицы, дейтрона и тритона с образованием нижних состояний ядер sd -оболочки, заключается в том, что сечения этих процессов, как правило, малы, а возбуждаемые уровни носят

обычный оболочечный или коллективный характер. Не вполне ясно осталось обнаруженное усиление переходов при передаче α -частицы в состоянии 3^- .

Один из наиболее интересных результатов для этой области ядер состоит в том, что вращательные уровни $0^+ - 2^+ - 4^+ - 6^+$ Mg^{24} и Si^{28} не являются α -частичными. Олиный, некластерный, характер этих уровней служит примером обнаруженного общего явления, состоящего в том, что кластеры в sd -оболочке не возникают, если она была уже частично заполнена. Взаимодействие с нуклонами, находящимися в том же состоянии, разрушает передаваемый кластер. Так, с очень малым сечением возбуждаются основные и нижние состояния ядер S^{32} и P^{31} в реакциях передачи $Si^{28} + \alpha \rightarrow S^{32}$ и $Si^{28} + t \rightarrow P^{31}$, совсем не наблюдается переход $Mg^{24} + d \rightarrow Al^{26}$ (осн.)

По-видимому, отсутствуют α -частичные вращательные состояния и у ядра Ti^{44} , которое аналогично Ne^{20} (" α -частица" сверх дважды замкнутой оболочки).

О кластерной структуре ядер p -оболочки получены следующие результаты. Вся совокупность данных подтверждает существование у Li^6 и Li^7 α -частичного остова. Какова степень корреляции внешних нуклонов в дейтронный и тритонный кластер, остается не вполне ясным. Для нижних состояний Be^9 обнаружена большая вероятность конфигурации $\alpha + \alpha + n$. Добавление еще одного нуклона, как показывает изучение реакций $Li^7(Li^7, \alpha) Be^{10}$ и $Li^6(Li^7, t) B^{10}$, по-видимому, "портит" α -частичную структуру Be^8 . Получены косвенные данные, согласующиеся с предположением о том [30], что ядро C^{12} имеет α -частичную структуру в основном состоянии и уровнях построенной на нем вращательной полосы и в состоянии $0^+(7,65 \text{ Мэв})$.

Почти во всех изучавшихся реакциях была наблюдается четкая корреляция между положением самих интенсивных групп в спектре и величиной эффективного кластерного порога:

$$\Gamma_{эф}^{(i)} = \epsilon(B \rightarrow A+i) + E_{кул}(A+i),$$

где $\epsilon(B \rightarrow A+i)$ есть порог развала остаточного ядра B на ядро-мишень A и кластер i , $E_{кул}$ - кулоновский барьер для системы $A+i$.

Идея о пороговых состояниях была выдвинута А.И.Базем [31]. Эта гипотеза предсказывает появление групп кластерных состояний при энергиях возбуждения, несколько меньших $P_{эф}$. В некоторых случаях $P_{эф}$ может быть выше за счет центробежного барьера.

Пороговый эффект был наблюден при передаче всех трех кластеров — дейтрона, тритона и α -частицы. Он не носит кинематического характера (т.е. не связан с какой-либо особенностью при $Q = E + E_{\alpha}$), а отражает существование вблизи порога ядерных состояний со специфической структурой.

Были обнаружены пороговые состояния с более сложной структурой, чем остов плюс кластер. Уже говорилось об уровнях типа "трехатомной молекулы" $\alpha + t + d$, найденных в ядре Be^9 в окрестностях порога $Be^9 \rightarrow \alpha + t + d$. Есть некоторые указания, что многокластерную структуру имеют и уровни $I_{4,3} - I_{4,6}$ Мэв в O^{16} , расположенные вблизи порога $O^{16} \rightarrow 4\alpha$.

При больших энергиях возбуждения наблюдались и другие кластерные состояния. В ядре O^{16} обнаружены α -частичные состояния в области гигантского резонанса (21 - 25 Мэв). Наиболее интенсивно возбуждающееся состояние (21,2 Мэв) соответствует провалу в кривой сечения фотопоглощения в соответствии с теорией о квазисвязанных состояниях [32].

Полученные данные позволяют говорить о четырех основных областях существования кластеров в легких ядрах:

1) нижние состояния некоторых ядер р-оболочки, кластерная структура которых определяется в основном выделенной ролью α -частицы;

2) уровни свободной sd-оболочки, где кластеры возникают в результате слабой связи частиц и дырок;

3) кластерные пороговые состояния;

4) квазисвязанные состояния в области гигантского резонанса.

Схематически эти типы уровней (а также некоторые другие, о которых шла речь) изображены на рис. 7.

Сравнение полученных экспериментальных данных о кластерах с результатами многочисленных теоретических работ показало, что правильные предсказания были сделаны тремя теориями, относящимися к различным областям кластеризации в ядрах. Это теория Арими

о слабой связи в sd-оболочке [26], теория Базя о пороговых уровнях [31] и теория Хилле [32] о квазисвязанных состояниях в области гигантского резонанса. В то же время предсказания многих кластерных моделей ядер не были подтверждены.

Проведенные исследования показывают, что реакции с ионами лития образуют своеобразную область ядерных реакций, занимающую промежуточное положение среди процессов с легкими частицами и тяжелыми ионами. Изучение этих реакций позволяет получить сведения о структуре ядра, которые трудно или невозможно получить иным путем. Интерес к исследованиям с ионами лития интенсивно растет и за рубежом. Об этом красноречиво говорят следующие данные.

| Ускоритель | Энергия ионов лития, Мэв | Год начала работ с ионами лития |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Циклотрон ИАЭ | 36 (Li^6), 30 (Li^7) | 1966 |
| EN -тандем, Гейдельберг | 20 | 1967 |
| EN -тандем, Филадельфия | 18 | 1968 |
| EN -тандем, Сакле | 20 | 1969 |
| MP -тандем, Гейдельберг | 35-40 | 1969 |
| FN -тандем, Аргонн | 30 | 1969 |
| Циклотрон, Беркли | - | 1970 (планируется) |
| Тройной MP-тандем, Брукхейвен | - | планируется 1971-72 |

Такой широкий фронт работ позволяет ожидать в ближайшем будущем появления новых важных результатов в этой перспективной области исследования.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

I. Настоящая работа явилась первым систематическим исследованием новой области ядерных взаимодействий — реакций с ионами лития. Были изучены все основные ядерные реакции, возникающие при взаимодействии ионов Li^6 и Li^7 с ядрами в диапазоне энергий 25-35 Мэв.

2. Впервые в чистом виде был обнаружен и исследован механизм прямой передачи α -частицы, являющийся основным в реакциях (Li^6, d) и (Li^7, t). Был изучен механизм реакций (Li^6, α) и (Li^7, α), который оказался более сложным. В некоторых случаях в этих реакциях также происходит передача кластера-дейтрона или тритона.

3. Была открыта неизвестная до сих пор ядерная реакция (Li^6, t), отличающаяся рядом интересных особенностей. Одним из основных ее механизмов может быть сложный прямой процесс, связанный с замещением кластеров. Наиболее определенные из имевшихся до сих пор данные о существовании подобных процессов были получены при изучении взаимодействия ядер лития с более легкими ядрами (H^1, He^4).

4. Был исследован процесс расщепления Li^6 и Li^7 при взаимодействии с другими ядрами. Получены также первые данные об упругом рассеянии ионов лития.

5. Впервые получены систематические экспериментальные данные о кластерах в легких ядрах. Открыта область α -частичных состояний в sd -оболочке, связанных со слабостью взаимодействия 4 частицы - дырки, и установлен α -частичный характер ряда вращательных состояний O^{16} , O^{17} и Ne^{20} .

6. Получены данные о возможной квазимолекулярной природе ядра Ne^{20} во вращательных состояниях 1^- 3^- 5^- 7^- .

7. Было показано, что возникновение кластеров в нижних состояниях более тяжелых ядер sd -оболочки маловероятно.

8. Полученные данные показали, что кластерная структура ядер p -оболочки связана в основном с особой ролью α -частицы. Был обнаружен эффект исчезновения кластерной структуры при переходе от Be^9 к Be^{10} и B^{10} .

9. Открыты пороговые кластерные состояния: дейтронные, тритонные, α -частичные. Кроме того, найдены пороговые уровни и более сложной структуры, например типа "трехатомной молекулы".

10. Существование кластерных состояний в некоторых ядрах было обнаружено и при самых высоких из исследовавшихся энергий возбуждения - 20-25 Мэв, в частности в области гигантского дипольного резонанса.

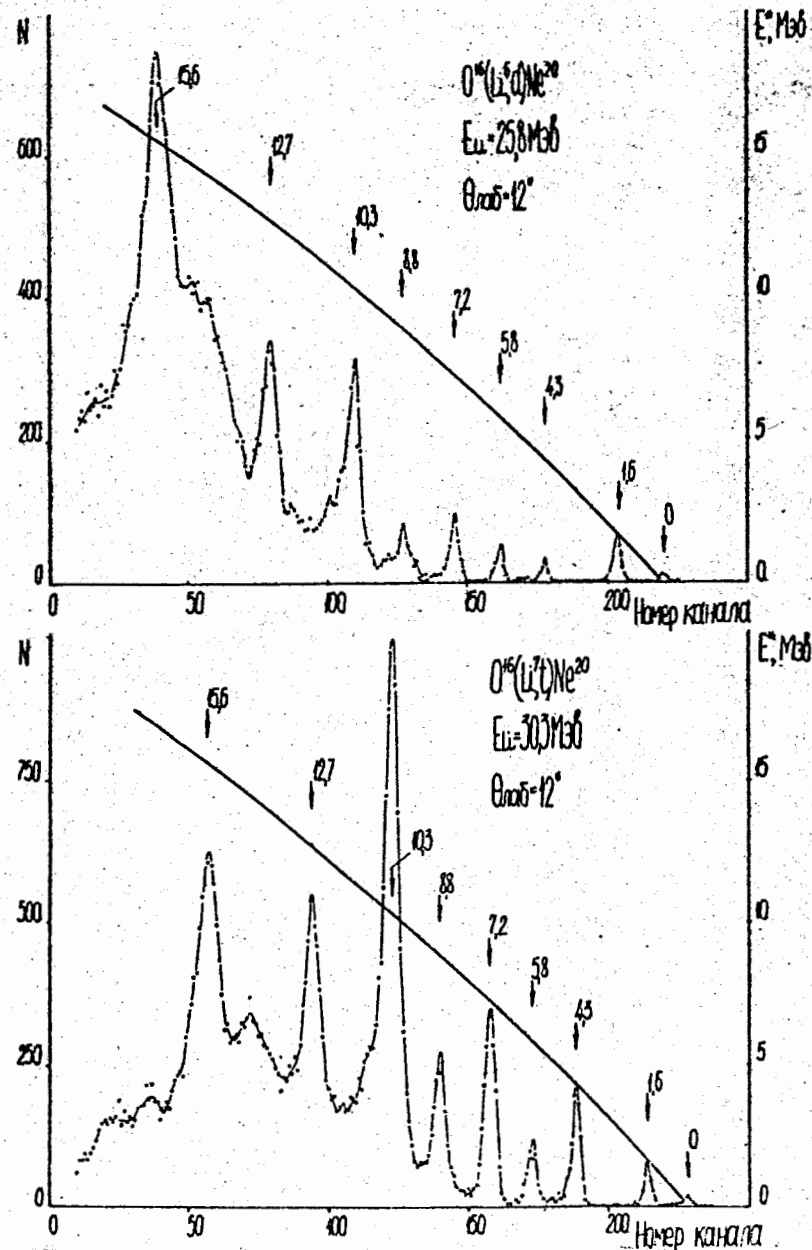


Рис. 1. Спектры дейтронов и тритонов в реакциях $\text{O}^{16}(\text{Li}^6, d)\text{Ne}^{20}$ и $\text{O}^{16}(\text{Li}^7, t)\text{Ne}^{20}$.

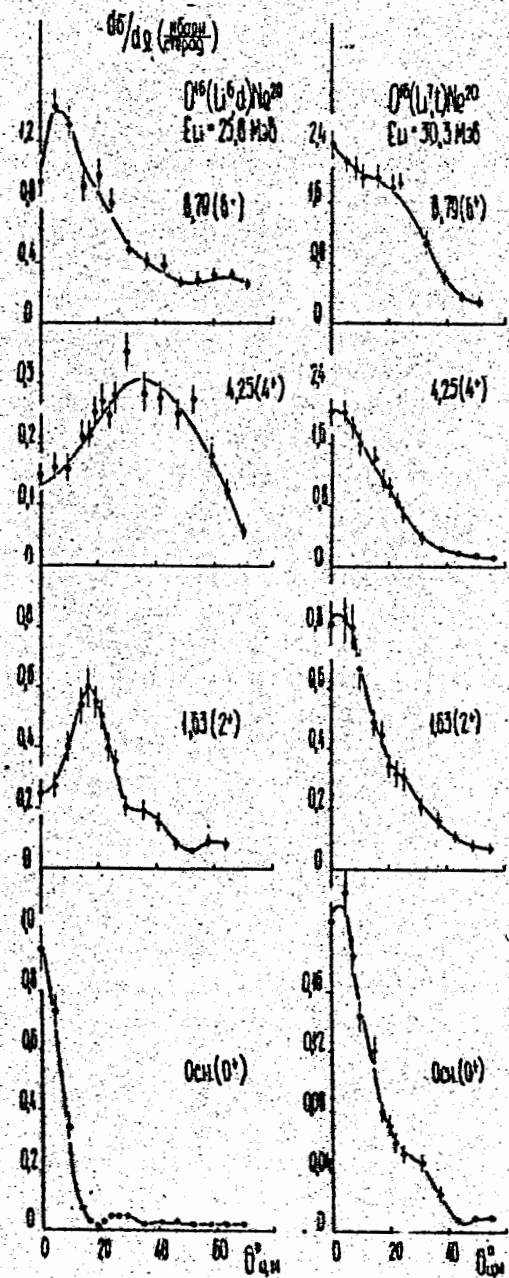


Рис. 2. Угловые распределения дейтронов и тритонов в реакциях $O^{16}(Li^6, d)Ne^{20}$ и $O^{16}(Li^7, t)Ne^{20}$

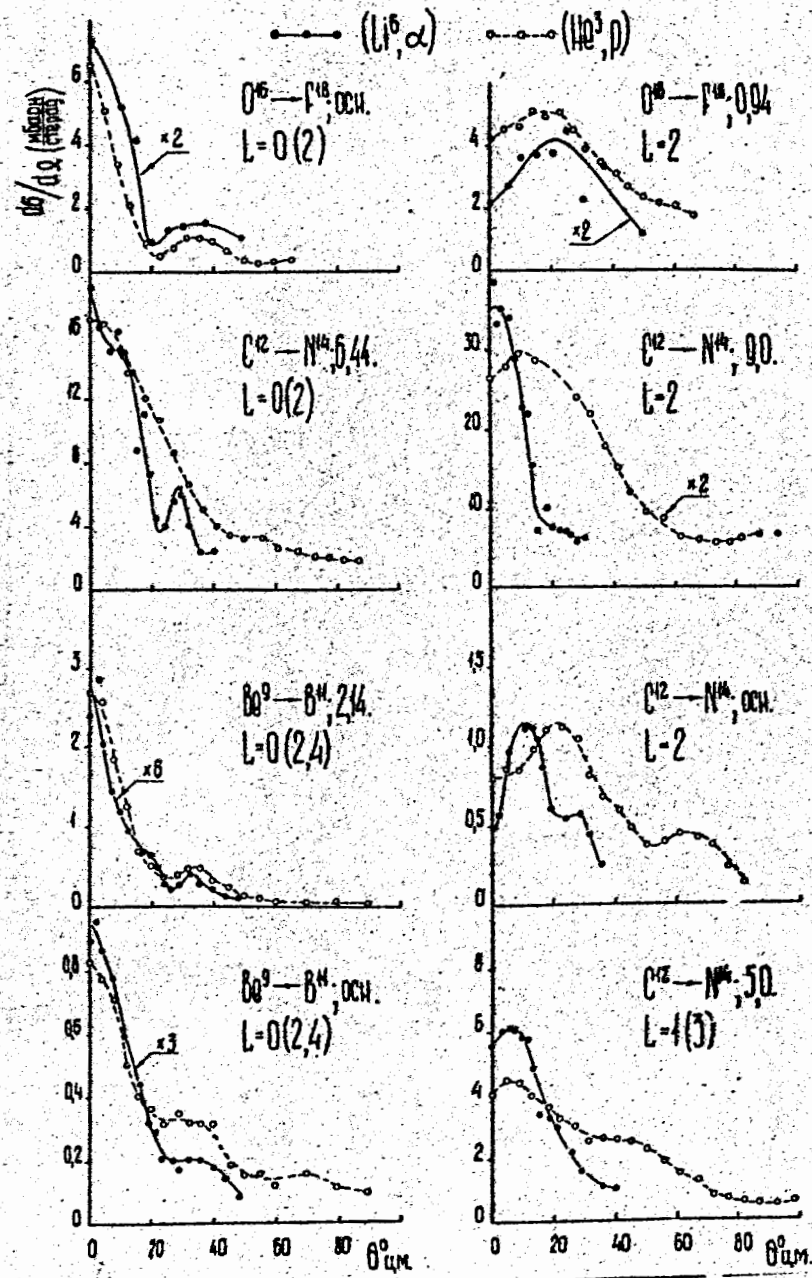


Рис. 3. Угловые распределения в реакциях (Li^6, α) и (He^3, p) .

Рис. 4. Спектр α -частиц в реакции $^{12}\text{C}(\text{Li}^6, \alpha)^{14}\text{N}$.

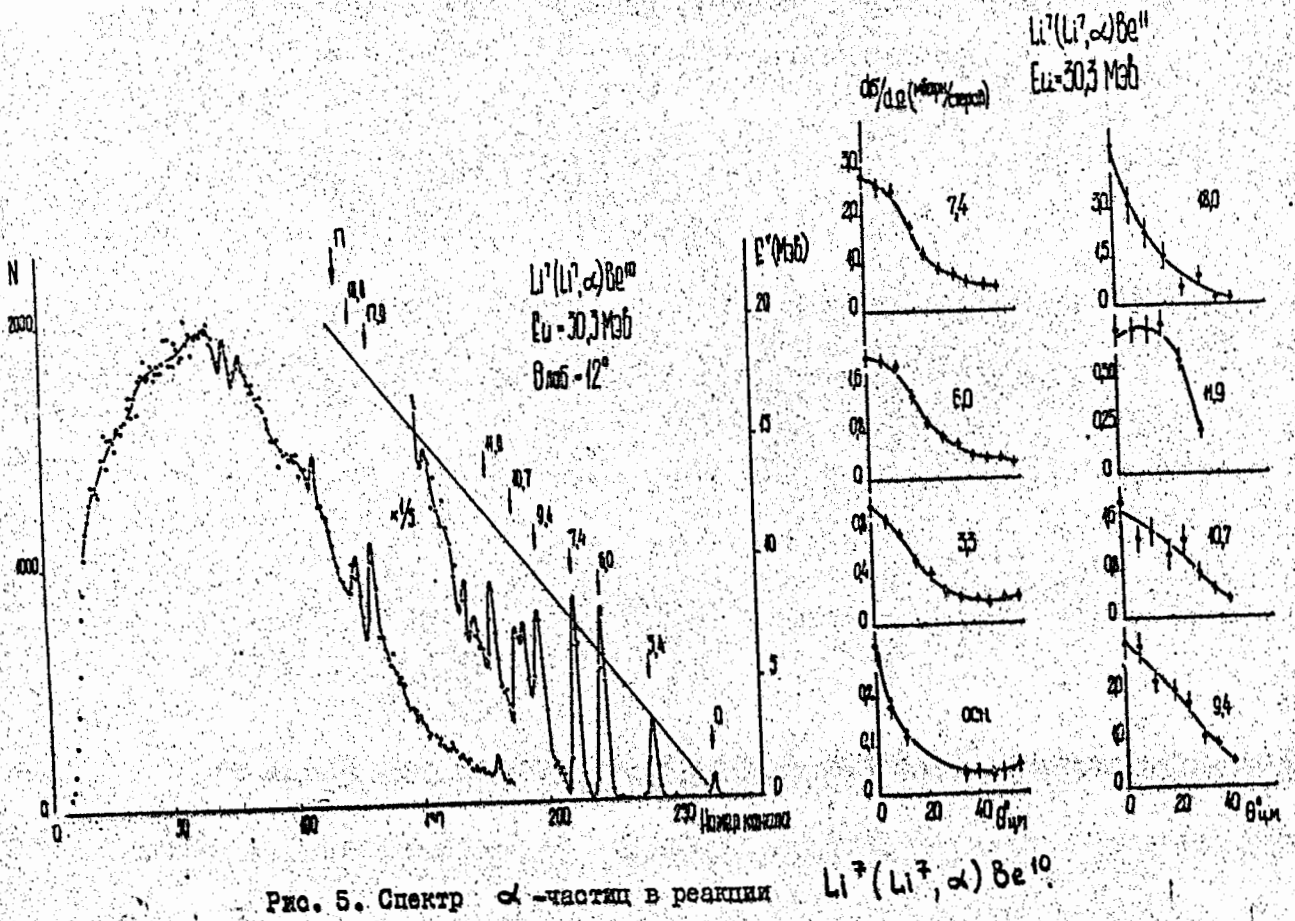
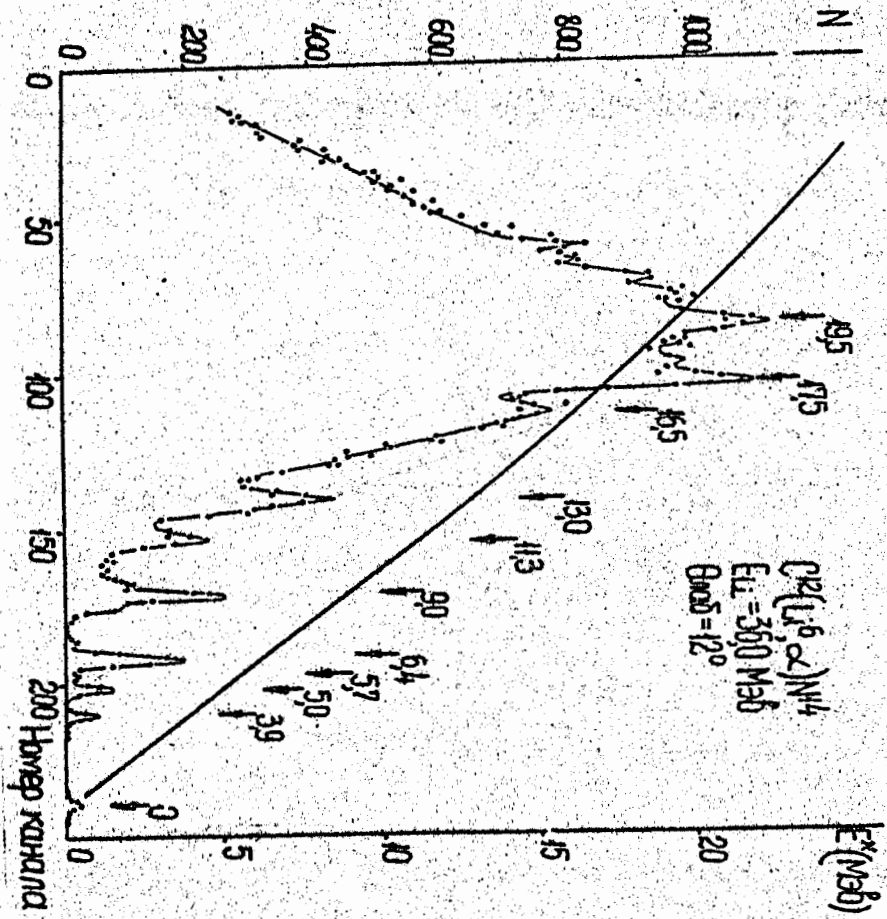


Рис. 5. Спектр α -частиц в реакции $^7\text{Li}(\text{Li}^7, \alpha)^{10}\text{Be}$.

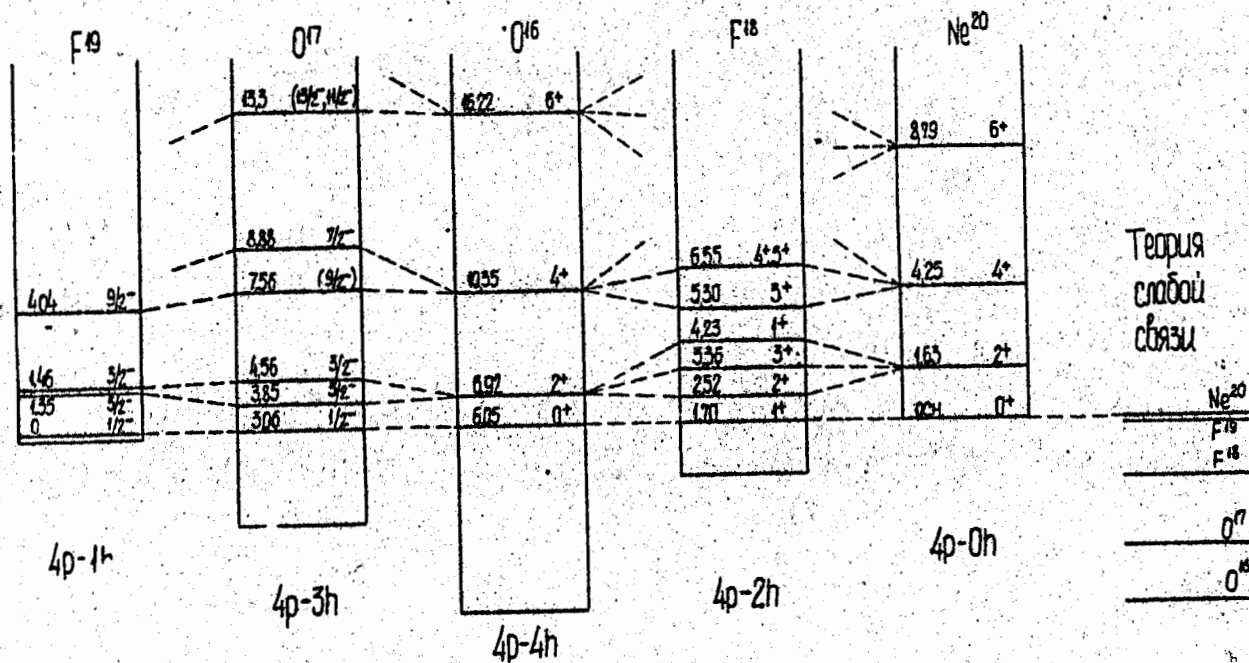


Рис. 6. Систематика уровней 4 частицы - несколько дырок.

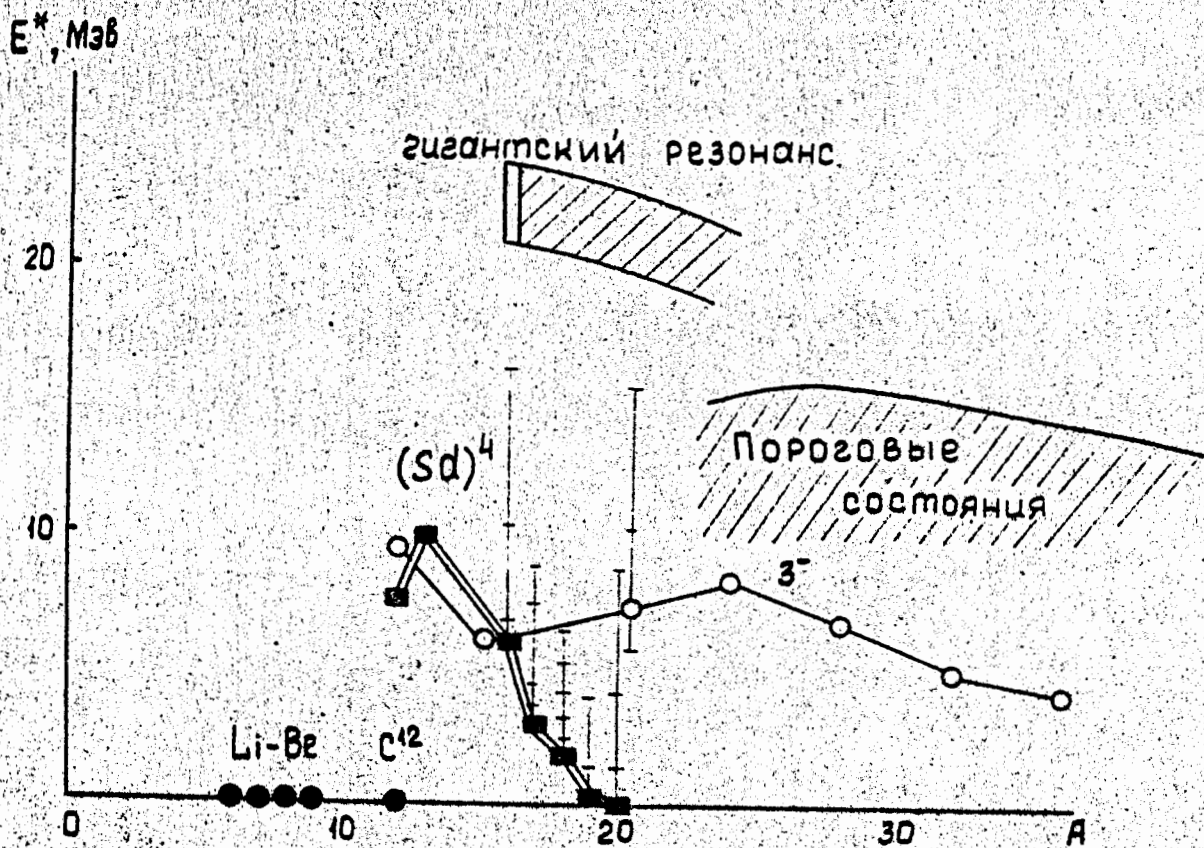


Рис. 7. Систематика α -частичных состояний в легких ядрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.I.Chuev, V.V.Davidov, A.A.Ogloblin, S.B.Sakuta, *Arkiv for Fysik*, 36, 263 (1967).
2. В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. Доклад на Международной конференции по физике тяжелых ионов, Дубна, 1966.
3. В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. Тезисы 17-го совещания по ядерной спектроскопии (Харьков, 1967).
4. В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. Тезисы 18-го совещания по ядерной спектроскопии (Рига, 1968).
5. А.А.Оглоблин, Тезисы 19-го совещания по ядерной спектроскопии (Ереван, 1969).
6. В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. Международный симпозиум по структуре ядра (Дубна, 4-11 июля 1968г.), стр. 152.
7. К.П.Артемов, В.З.Гольдберг, В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, В.П.Рудаков, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. Там же, стр. 153.
8. А.А.Оглоблин. В сб. "Proceeding of International Symposium on Nuclear Structure in Dubna", Vienna, IAEA, 1969.
9. А.А.Оглоблин, В.И.Чуев. "Ядерная физика", 2, 670 (1965).
10. В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. "Ядерная физика", 7, 758 (1968).
11. В.З.Гольдберг, В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. "Известия АН СССР, сер. физ.", XXXIII, 566 (1969).
12. В.З.Гольдберг, В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. "Известия АН СССР, сер. физ.", XXXIII, 579 (1969).
13. В.З.Гольдберг, В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. "Известия АН СССР, сер. физ.", XXXIII, 586 (1969).
14. В.В.Давыдов, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, В.И.Чуев. "Известия АН СССР, сер. физ.", XXXIII, 597 (1969).
15. Ю.А.Глухов, Б.Г.Новацкий, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, Д.Н.Степанов. "Известия АН СССР, сер. физ.", XXXIII, 601 (1969).
16. Ю.А.Глухов, Б.Г.Новацкий, А.А.Оглоблин, С.Б.Сакута, Д.Н.Степанов. "Известия АН СССР, сер. физ.", XXXIII (1969).
17. P.I.Vasiliev, N.I.Venikov, D.V.Zevjakin, A.A.Ogloblin, E.N.Khalidin, B.I.Khoroshavin, V.I.Chuev, N.I.Chumakov. *Nucl. Instr. and Meth.*, 71, 201 (1969).
18. А.А.Оглоблин. В сб. "Proceedings of International Conference on Nuclear Reactions with Heavy Ions", Heidelberg, 1969.
19. А.А.Оглоблин, В.И.Чуев, ПТЭ, № 5, 37 (1961).
20. А.А.Виноградов, А.А.Курашов, А.А.Оглоблин, В.В.Парамонов, П.Е.Перов, Н.П.Ситин, А.А.Чесалов. Препринт ИАЭ - 1876. Москва, 1969.
21. А.А.Курашов, А.А.Оглоблин, В.В.Парамонов, ПТЭ, № 1, 91 (1967).
22. W.F.Hunt, M.K.Metha, R.H.Davis. *Phys.Rev.*, 160, 782 (1967).
23. C.D.Zafirator, J.S.Lilley, F.W.Slee. *Phys.Rev.*, 154, 887 (1967).
24. E.W.Hamburger, I.R.Cameron. *Phys.Rev.*, 117, 781 (1961).
25. И.С.Шапиро. Теория прямых ядерных реакций, М., Госатомиздат, 1963.
26. A.Arima, H.Horiuchi, T.Sebe. *Phys.Lett.*, 24B, 129 (1966).
27. Th.Kanelloroula, K.Wilderhuth. *Nucl.Phys.*, 7, 150 (1958).
28. H.Horiuchi, K.Ikeda. *Progr.Theor.Phys.*, 40, 277 (1968).
29. V.V.Davydov, I.M.Pavlichenkov. *Phys.Lett.*, 22E, 551 (1969).
30. Д.М.Брянк. В сб. "Структура сложных ядер", М., Атомиздат, 1966.
31. A.Baz. *Adv. in Phys.*, 8, 349 (1959).
32. V.Gillet, M.A.Melkanoff, J.Raynal. *Nucl.Phys.*, A97, 631 (1967).