

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.142.3

ЯДЕРНЫЕ МОЛЕКУЛЫ *)*Д. Бромли*

При определенных энергиях протоны и нейтроны в ядрах образуют кластеры, движущиеся друг относительно друга по простым орбитам. Такие ядерные молекулы позволяют познать новые характеристики строения ядра и ядерных сил.

Широко известна тенденция к объединению атомов в молекулы, сопровождаемому обменом или перераспределением их валентных (внешних) электронов. Ядра, располагающиеся в центре атомов, имеют размеры примерно в 100 000 раз меньше размеров атомов. В настоящее время показано, что ядра тоже могут образовывать молекулы: при специальных условиях в ходе взаимодействий при высоких энергиях ядра на короткое время соединяются друг с другом под действием эффективных связей. Остается открытым вопрос о том, являются ли эти связи результатом обмена между ядрами валентными протонами и нейтронами или их перераспределения между атомными ядрами. Такие короткоживущие ядерные молекулы вскрывают совершенно новый тип ядерной структуры и динамики, к постижению которого физики в настоящее время лишь приступают.

Структура и устойчивость как атомных, так и ядерных молекул зависит от характеристик фундаментальных сил, управляющих взаимодействиями электронов, протонов и нейтронов. Атомные молекулы существуют за счет равновесия двух дальнедействующих сил электромагнитной природы: ковалентного притяжения электронных оболочек и электростатического отталкивания положительно заряженных ядер атомов. Расстояния между атомами в молекуле таковы, что силы притяжения и отталкивания взаимно компенсируются. Обычно атомные молекулы относительно устойчивы и не разрушаются, если не вступают в какое-нибудь достаточно энергичное взаимодействие. В ядерных молекулах достигается менее устойчивое равновесие между аналогичным дальнедействующим электростатическим отталкиванием и гораздо более мощными ядерными силами, определяющими движение протонов и нейтронов. Ядерные силы не действуют на электроны и не принимают, следовательно, непосредственного участия в образовании атомных молекул. Силы, действующие в ядерных молекулах, являются настолько более мощными, чем в атомных, что ядра в ядерных молекулах все время случайным образом балансируют между распадом на части под действием электростатического отталкивания и слиянием в одно ядро под действием ядерных сил притяжения.

*) Bromley D. Allan. Nuclear Molecules.— Scientific American, December 1978, v. 239, No 2, pp. 42—53.— Перевод А. М. Камаева.

Д. А. Бромли — профессор физики Йейлского университета и директор университетской лаборатории ядерных структур.

Для образования ядерной молекулы два ядра должны быть сближены настолько, чтобы короткодействующие ядерные силы превзошли далекодействующие электростатические. Обычно в природе атомные ядра не располагаются так близко друг к другу, чтобы короткодействующие ядерные силы достигали достаточной для образования ядерных молекул величины. Возможно, ядерные молекулы будут обнаружены в глубинах гигантских звезд, где третья фундаментальная сила природы — гравитационная — может оказаться достаточной (для преодоления электростатического отталкивания) величины и сталкивать ядра друг с другом.

Хотя в природе ядерные молекулы еще не найдены, в лабораторных условиях они уже получены при столкновении ускоренных ядер с ядрами покоящейся мишени. В ускорителях частиц кинетическая энергия налетающего ядра может быть увеличена настолько, что оно, несмотря на электростатическое отталкивание, пронесется, приближаясь вплотную к ядрам мишени. Тогда при определенных условиях, по-видимому, образуются ядерные молекулы — пара ядер, колеблющихся и быстро вращающихся друг относительно друга короткое время до тех пор, пока они не разлетятся в разные стороны или не сольются в одно ядро.

Ядерные молекулы — существенные образования, поскольку их время жизни (около 10^{-21} с) много больше времени соударения ядер (около 10^{-23} с), хотя и недостаточно для того, чтобы над ними можно было производить измерения такого же типа, как выполняемые над стабильными атомными молекулами. Однако большую информацию о ядерных молекулах можно получить косвенным путем, изучая влияние их образования и распада на «поперечное сечение» или вероятность возникновения тех или иных продуктов при столкновении двух ядер определенной энергии. Если с изменением энергии сталкивающихся ядер происходит плавное изменение поперечного сечения, то это означает отсутствие долгоживущих образований; ядра, как при упругом соударении, столкнувшись, моментально разлетаются, подобно двум бильярдным шарам.

С другой стороны, если поперечное сечение имеет резонансную структуру или пики при определенных значениях энергии, то это означает, что ядра могут оставаться в тесной близости друг с другом сравнительно долгое время. Если при этом выполняются и другие условия, которые я буду обсуждать позднее, то такие резонансы могут быть идентифицированы как признаки образования ядерных молекул. Основываясь на принципе неопределенности Гейзенберга, можно вычислить время жизни такой молекулы непосредственно по ширине соответствующего резонанса. Ширина пика представляет собой неопределенность энергии ядерной молекулы, а принцип неопределенности связывает большое время жизни с узким резонансом (малая неопределенность энергии) и малое время жизни — с широким резонансом (большая неопределенность).

В 1960 г. Э. Алмквист, Дж. А. Кухнер и я в Чок-Риверской Ядерной лаборатории в Канаде обнаружили резонансы в столкновениях между ядрами углерода-12 (^{12}C), что послужило первым доказательством существования ядерных молекул. Для сталкивания ядер углерода друг с другом мы использовали первый тандемный электростатический ускоритель Ван-де-Граафа. При определенных энергиях мы наблюдали резонансы в реакциях с вылетом таких продуктов столкновений как протоны, фотоны, α -частицы и нейтроны. Резонансы имели характерную ширину около 120 кэВ (тысяч эВ); согласно принципу неопределенности это соответствует времени жизни порядка $5 \cdot 10^{-21}$ с, что более чем в 10 раз превосходит типичное время простого соударения. Тем не менее заключение о том, что

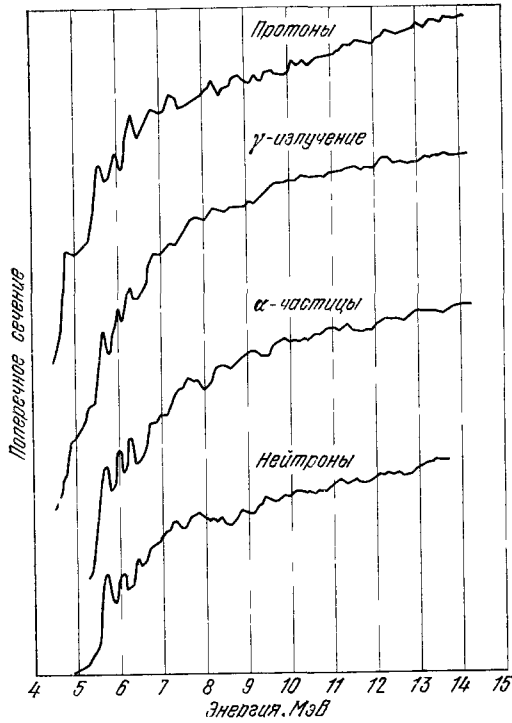


Рис. 1. Поперечные сечения или вероятности возникновения различных ядерных продуктов реакции при столкновениях ядер углерода-12 изображены как функции кинетической энергии.

При энергии кулоновского барьера 6,6 МэВ соударяющиеся ядра могут лишь соприкоснуться. Особый интерес представляют три резонансных пика при энергиях немого ниже кулоновского барьера. Эти три резонанса, проявляющиеся во всех четырех поперечных сечениях и при всех наблюдаемых углах вылета послужили первым свидетельством существования ядерно-молекулярных явлений. Данные получены в 1960 г автором, Э. Алмквистом и Дж. А. Кюхнером из Чок-Риверской ядерной лаборатории в Канаде.

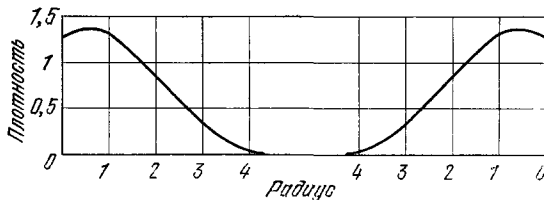


Рис. 2. Профили плотности двух соударяющихся ядер углерода-12 с энергией 5 МэВ показаны в тот момент, когда центры ядер сближены до расстояния $10,4 \cdot 10^{-13}$ см. Такое разделение более чем вдвое превосходит не только средний радиус ядра углерода, но и наибольший эффективный радиус. Радиус здесь измеряется в единицах 10^{-13} см.

резонансы обязаны своим происхождением именно образованию ядерных молекул, а не какому-либо другому явлению, не может быть сделано лишь на основании такого сравнительно большого времени соударения.

Мы, однако, нашли дополнительное доказательство того, что нами обнаружены ядерные молекулы. В атомных молекулах, несмотря на то, что атомы связаны друг с другом, каждый из них сохраняет большинство своих внутренних свойств. По аналогии можно ожидать, что и каждое из ядер, составляющих ядерную молекулу, сохраняет большую часть своих внутренних свойств. Именно это и было обнаружено в нашем эксперименте.

Мы выполнили подробные измерения, которые показали, что при резонансных энергиях вероятность реакций, обусловленная перегруппировкой двух ядер углерода-12, более чем в 25 раз превосходит вероятность реакций, если бы они были обусловлены мгновенным слиянием двух ядер углерода-12 в нормальное ядро магния-24 (^{24}Mg), содержащее то же число протонов и нейтронов, что и два ядра углерода-12. Эти эксперименты многое поведали нам о динамике соударений углерода-12 и структуре магния-24. Наши измерения поперечного сечения показали, что при резонансных энергиях 24 протона и нейтрона предпочитают образование, скорее, двух слабо связанных ядер углерода-12, чем одного нормального ядра магния-24. По этой причине мы предположили, что если ядру магния-24 каким-либо способом сообщить энергию, соответствующую обнаруженным резонансам, то должна существовать высокая вероятность того, что его 12 протонов и 12 нейтронов перегруппируются в два ядра углерода-12, состоящие каждое из шести протонов и шести нейтронов.

□

Это предположение было вскоре проверено другими специалистами в области ядерной физики. В первой проверке, проведенной Н. О. Лассеном и его сотрудниками в Копенгагенском университете, в результате соединения ядер неона-20 (10 протонов и 10 нейтронов) и гелия-4 (два протона и два нейтрона) образовывались ядра магния-24. Когда полная энергия подбиралась такой, что она совпадала с энергией чок-риверских резонансов, выход фрагментов углерода-12 значительно увеличивался. В другом эксперименте, проведенном Н. К. Шерманом в Королевском университете Канады, магний-24 абсорбировал высокоэнергичные фотоны так, что его энергия увеличивалась до резонансных значений, при которых происходило усиленное деление магния-24, сопровождающееся увеличением количества вылетающего углерода-12, что является указанием на существование ядерной молекулы.

Ядерные молекулы заинтересовали физиков не только как неожиданно новые формы ядерной структуры и динамики, но и благодаря той роли, которую они, возможно, играют в таких астрономических явлениях, как эволюция звезд. Рождение ядер углерода долгое время признавалось решающим процессом в неясном периоде существования звезды. Очевидно, что наличие неожиданных молекулярных резонансов в ядерном взаимодействии ^{12}C — ^{12}C должно влиять на скорость, с которой рождается углерод. В начале 70-х годов исследователи из Калифорнийского технологического института и Пенсильванского университета продолжили наши измерения при более низких энергиях, приближающихся к тем, которые, по предположению, характеризуют рождение звездного углерода. Ими обнаружены дополнительные резонансы в области энергий между 3 и 4 МэВ (миллионов электрон-вольт). Поперечное сечение они экстраполировали вплоть до энергий порядка 100 кэВ, что соответствует энергиям, которыми обладают ядра внутри звезд при температурах порядка 1,2 млрд. градусов

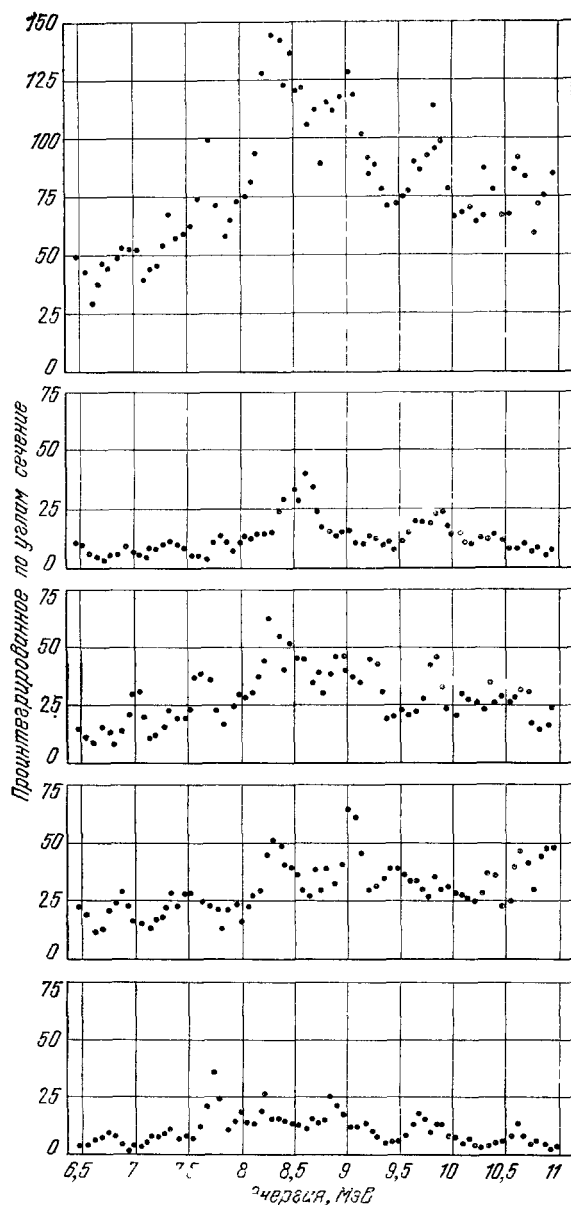


Рис. 3. Неон-20 и гелий-4 (α -частица) могут образоваться при соударении двух ядер углерода-12 (^{12}C).

Здесь показана зависимость поперечного сечения образования неона-20, проинтегрированного по всем углам рассеяния, от энергии соударяющихся ядер углерода. Четыре нижних графика отвечают соответственно образованию четырех нижних квантовых состояний неона-20. Несколько резонансов на верхнем графике, полученном суммированием четырех нижних графиков, соответствуют образованию $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ ядерных молекул.

Кельвина, где, по предположению, происходит рождение углерода. Эта экстраполяция на астрофизические энергии привела к необычному предположению о том, что углерод рождается со скоростью, более чем в 10 раз превосходящей ту, которая допускалась любой из предложенных моделей звездной эволюции.

В ранних измерениях возникали и другие неожиданности. В ходе своей первоначальной работы мы обнаружили, что подобные резонансы не появляются при столкновениях между ядрами кислорода-16 (^{16}O), хотя

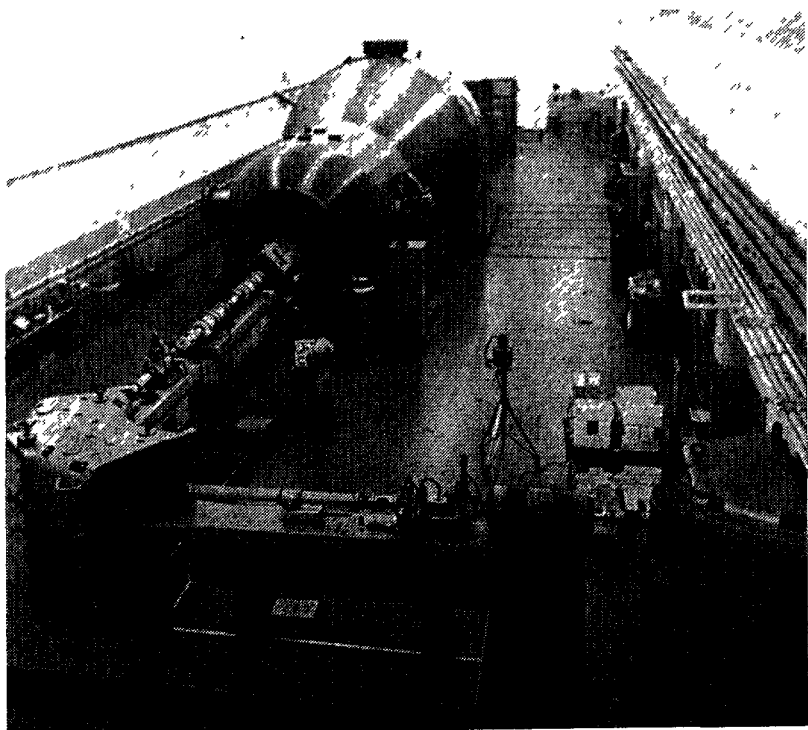


Рис. 4. Первый «императорского» класса ван-де-граффовский ускоритель Лаборатории ядерных структур Йельского университета использовался для изучения ядерно-молекулярных явлений.

Ионный источник, генерирующий налетающие ядра, расположен на заднем плане за большой камерой высокого давления, содержащей высоковольтные электроды, которые служат для ускорения налетающих частиц. Захватывая дополнительные электроны, налетающие ядерные частицы получают отрицательный заряд. В результате они притягиваются к положительно заряженному терминалу в центре камеры высокого давления. Здесь электроны сдираются, и образующиеся положительно заряженные ядра, ускоряясь далее под действием электростатического отталкивания, движутся к переднему концу камеры высокого давления, которая имеет 100 футов в длину и 20 футов в диаметре.

они наблюдались при столкновениях между ядрами кислорода-16 и углерода-12. Вскоре то же самое отметили и другие исследователи. Почему молекулярные резонансы ясно проявлялись во взаимодействиях $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ и $^{12}\text{C}-^{16}\text{O}$ (и совсем недавно в столкновениях между ядрами бора-11 и углерода-12, а также углерода-12 и углерода-13), но ни разу не появлялись во взаимодействии $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$? Этот вопрос оставался без ответа на всем протяжении 60-х и в начале 70-х годов. Нас заинтересовал тот факт, что из атомов всех видов именно атомы углерода найдены в наибольшем числе атомных молекул. Однако же мы не могли увидеть абсолютно никакой связи между атомными и ядерными явлениями.

Первоначальные чок-риверские данные стимулировали широкий экспериментальный и теоретический интерес к ядерным молекулам и другим взаимодействиям тяжелых ионов (атомов, которые понижены так, что их ядра могут быть электростатически ускорены). Однако дальнейшее развитие событий тормозилось в экспериментальной области тем, что в то время были доступны лишь пучки тяжелых ионов сравнительно низких энергий, а в теоретической области — отсутствием объяснения особой роли углерода в ядерных взаимодействиях. Наиболее удачная теоретическая модель, развитая Б. Иманиси из Токийского Университета, могла воспроизвести чок — риверские данные в случае углерода лишь в предположении чрезвычайной прозрачности поверхностных областей ядра — поверхностные области ядер должны были бы проходить друг через друга практически без изменений, что в то время казалось очень искусственным предположением. Более того, модель Иманиси казалась сомнительной потому, что она не включала в себя низкоэнергетических резонансов, открытых исследователями, изучавшими рождение звездного углерода. В результате само существование ядерных молекул оказалось под вопросом и количество работ в этой области стало уменьшаться вплоть до конца 60-х годов, когда появились новые мощные ускорители тяжелых ионов.

Вместе с новой технологией пришло и лучшее понимание возможных структур ядерных молекул и условий, при которых они могут возникать. Хотя, как можно было ожидать, все ядерные молекулы проявляются при определенных условиях как резонансы в поперечных сечениях взаимодействий, однако не все пики в поперечных сечениях можно отождествить с истинными резонансами, и не все истинные резонансы соответствуют образованию ядерных молекул. Для того чтобы правильно идентифицировать эти молекулы, нам необходимо было иметь возможность распознавать их при наличии пиков, характеризующих другие явления. Решением этой проблемы занялась наша исследовательская группа, работающая на первом из больших («Императорского» класса) тандемном ускорителе Ван-де-Граафа, установленном в Лаборатории ядерных структур Иейльского университета. Прежде всего мы разработали математическую модель главных характерных черт столкновения $^{12}\text{C}—^{12}\text{C}$, в которой предполагалось, что ядро рассеивается на эффективном потенциале: это было математическое описание процесса уменьшения кинетической энергии соударяющихся ядер по мере их сближения. Потенциал включал в себя все силы, которые должны действовать на сближающиеся ядра: электростатическое отталкивание, притяжение ядерных сил и центробежные силы, возникающие из-за вращения ядер вокруг их общего центра масс. Такая модель называется оптической, так как она основывается на математическом формализме, который первоначально был применен для описания рассеяния света на полупрозрачном кристаллическом шаре. Хотя оптические модели и играют ведущую роль в ядерной и атомной физике и в физике частиц, часто они используются неправильно. Такая модель предназначена для представления только усредненных черт взаимодействия, и, следовательно, от нее нельзя ожидать точного воспроизведения любых конкретных данных, например, как при фиксированном угле меняется вероятность рождения определенного продукта реакции с изменением энергии или как меняется выход реакции при определенной энергии с изменением угла. При помощи своей модели мы получили поверхности поперечного сечения, зависящие как от значений энергии, так и от углов рассеяния (рис. 5). Эти поверхности демонстрируют характерные колебания предсказываемого количества рассеявшихся ядер при изменении энергии, угла или обеих этих величин. Параметры модели мы подбирали до тех пор,

пока она не стала способна с разумной точностью воспроизводить основные черты наших новых экспериментальных данных.

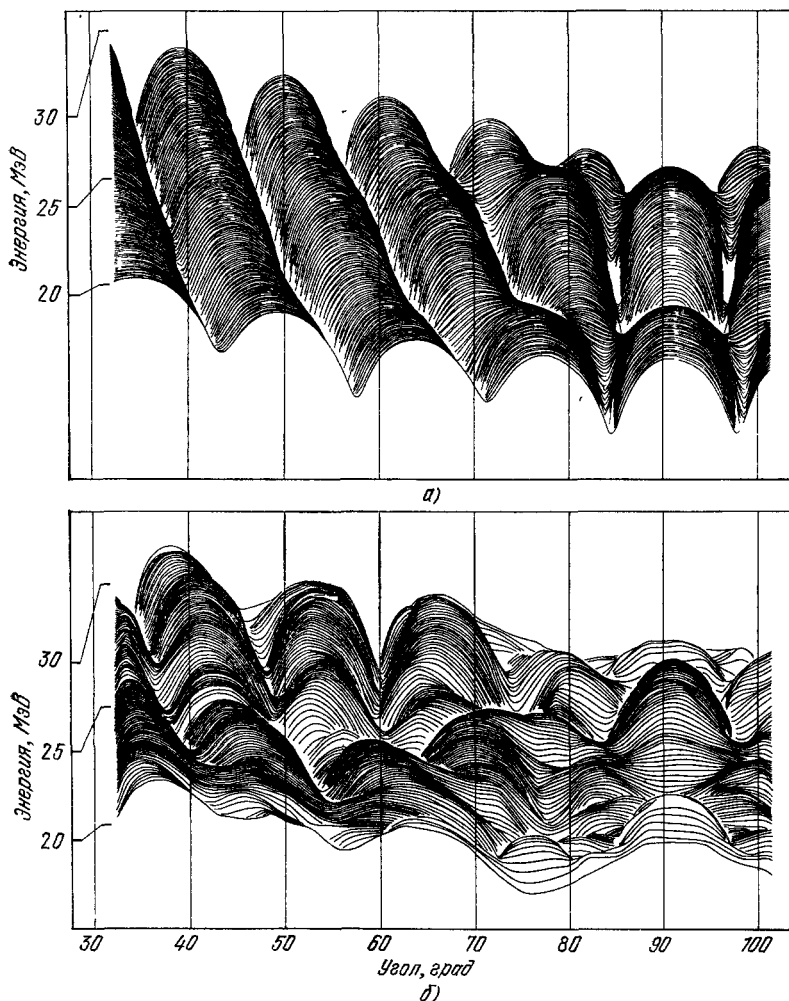


Рис. 5. Математическая модель оптического типа, объединяющая силы, действующие на два ядра углерода-12 при их сближении и последующем упругом рассеянии, подобном соударению бильярдных шаров, использовалась для построения поверхности поперечного сечения (а).

Модельные параметры подгонялись до тех пор, пока расчетная поверхность поперечного сечения не совпала достаточно хорошо с измеренной (б)

□

Среди новых данных по рассеянию ^{12}C — ^{12}C , полученных нами и другими исследователями, особенно удивителен тот факт, что острые пики в поперечных сечениях наблюдаются во всем исследованном до сих пор диапазоне энергий. При низких энергиях, изучаемых у нас, в Калифорнийском технологическом институте и в Пенсильвании, молекулярные резонансы трудно обнаружить по той причине, что электростатическое отталкивание между ядрами пары является настолько сильным, что перекрывает ядерные эффекты. Тем не менее в поперечных сечениях, полученных при тщательных измерениях рассеяния, выявляется все большее число

таких низкоэнергетических молекулярных резонансов. Действительно, Стефан Коротки и его сотрудники в Иейле и Хельмут Войт с сотрудниками в Университете Эрлангена недавно определили квантовые числа, или подробные внутренние свойства, многих из этих резонансов. При высоких

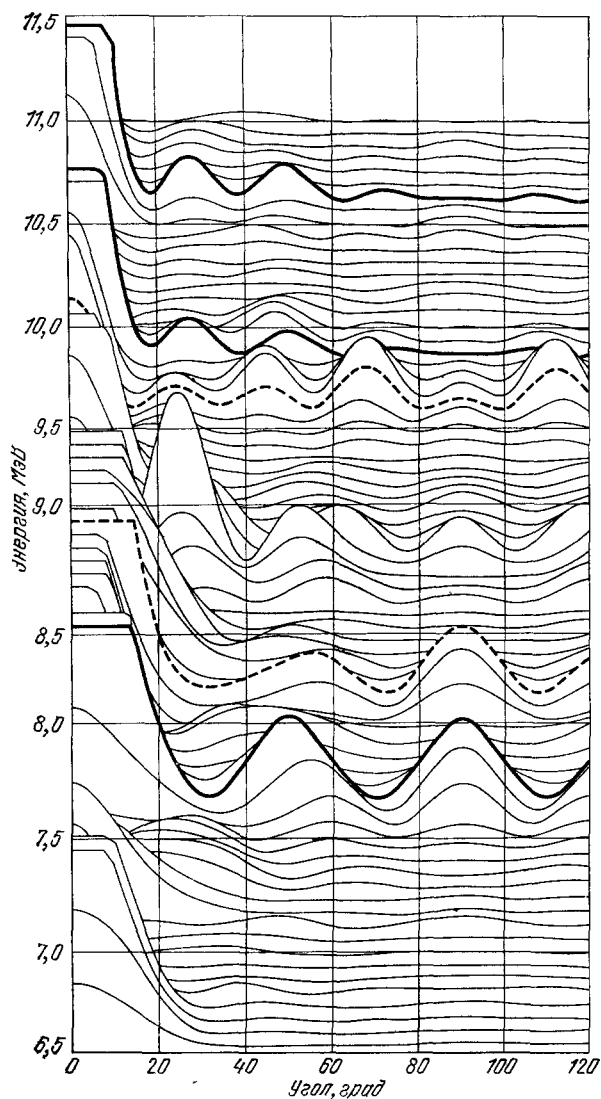


Рис. 6. Проблема ложных резонансов иллюстрируется поведением измеренной поперечной поперечного сечения рождения неона-20 в основном (нижнем) энергетическом состоянии при столкновениях ядер углерода-12.

Жирные кривые отождествлялись с истинными ядерно-молекулярными резонансами. Штриховые кривые, хотя они явно аналогичны жирным, отвечают, как было показано, скорее статистическим флуктуациям, чем образованию ядерных молекул.

энергиях поперечное сечение $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ -рассеяния изобилует острыми пиками. Из более ранних работ Т. Эриксона из ЦЕРНа и Э. Вогта с соавторами из Чок-Ривера с очевидностью следовало, что многие из этих пиков могут быть обусловлены скорее статистическими флуктуациями ядерных процессов, чем служить истинными признаками ядерных молекул. При

высоких энергиях сталкивающиеся ядра могут образовывать компаунд-системы в любом из огромного числа состояний реакции, не образуя при этом ядерных молекул. Такие компаунд-состояния имеют широкий спектр времен жизни, и поэтому принцип неопределенности Гейзенберга дает самые разные соответствующие им резонансные пики, в частности, и широкие перекрывающиеся пики. При любом конкретном значении энергии, когда взаимодействие носит чисто статистический характер, включая образование компаунд-ядра, большое число этих перекрывающихся пиков и определяет вид поперечного сечения. Обычно пики складываются случайным образом, образуя гладкую кривую поперечного сечения, на которой выделяются резонансы, изображающие такие специфические взаимодействующие конфигурации, как ядерные молекулы. Тем не менее в подобных случайных ситуациях иногда возникают статистические флуктуации. Например, возможно, что все пики, кроме некоторых, гасят друг друга, и остается небольшое число пиков или даже единственный пик, определяющий поперечное сечение. Подобные пики иногда ошибочно принимались за ядерно-молекулярные резонансы.

□

При поиске способа выделения пиков, соответствующих истинным явлениям молекулярного резонанса, из статистических мы сочли необходимым подробно рассмотреть статистические модели ядерных взаимодействий, опущенные нами при изучении столкновений сложных ядер. Хотя такие модели, развитые Вальтером Хаузером и Германом Фешбахом из Массачусетского технологического института были первоначально введены для описания статистических аспектов ядерных реакций, индуцированных нейтронами, они, как мы обнаружили, оказались способны очень четко воспроизводить результаты реакций, вызванных тяжелыми ионами, такими, как углерод. Действительно, Д. Шапиро и его сотрудники из Иейля показали, что поперечные сечения, предсказанные статистической моделью, так же богаты пиками, как и измеренные высокоэнергетические поперечные сечения. Это, конечно, не означает, что все высокоэнергетические пики являются статистическими флуктуациями, а лишь указывает на то, что при отсутствии дополнительных доказательств отнюдь не все пики следует рассматривать как признаки ядерных молекул.

Вооруженные этим новым пониманием статистических аспектов взаимодействий тяжелых ионов, мы попытались ответить на старый вопрос о том почему кажется, что ядерно-молекулярные явления требуют участия углерода. Д. Р. Хансон и его сотрудники из Иейля показали, что из всех возможных комбинаций сталкивающихся ядер наименьшим числом компаунд-состояний обладает взаимодействие двух ядер углерода-12. Например, столкновения между ядрами кислорода-16, в поперечных сечениях которых резонансы не обнаружены, имеют более 10 000 компаунд-состояний, которые могут быть заняты ядрами. Мы предположили, что даже если в соударениях кислорода-16 присутствуют ядерно-молекулярные резонансы, то в поперечном сечении они, вероятно, будут скрыты за многочисленными конкурирующими состояниями.

Эта гипотеза подтверждалась наблюдением резонансов при соударениях ядер углерода-12 и кислорода-16, имеющих также одно из наименьших количеств компаунд-состояний. Запутывающим обстоятельством являлся тот факт, что резонансы не возникали вообще при столкновениях углерода-12 с бериллием-9 и лишь очень слабо проявлялись при столкновениях между углеродом-12 и углеродом-13, несмотря на то, что в обоих этих случаях имеется малое число компаунд-состояний. В настоящее время мы считаем, что ядерно-молекулярные явления в двух этих типах

соударений затемняются и смазываются поведением особенно свободного валентного нейтрона как в углероде-13, так и в бериллии-9.

Сначала мы были несколько обескуражены своей гипотезой об условиях, при которых могут наблюдаться ядерные молекулы, так как она предполагала, что подобные резонансы должны быть сравнительно редкими в ядерной физике. К счастью, обескуражены мы были недолго. Как только были развиты новые методы получения точной информации о поперечном сечении, нами и другими исследователями были обнаружены явления молекулярного резонанса в большом числе взаимодействий, включая взаимодействия между кислородом-16 и кислородом-16, углеродом-12 и углеродом-13, бором-11 и углеродом-12, магнием-24 и углеродом-12, кремнием-28 и кремнием-28, кремнием-28 и кислородом-16. Эти резонансы, конечно, существенно слабее резонансов во взаимодействии $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$, где присутствует значительно меньше конкурирующих эффектов.

□

За прошедшие несколько лет ядерные молекулы привлекли внимание физиков в ядерных лабораториях всего мира. Это возрождение интереса обусловлено существенно новыми достижениями как в экспериментальной, так и в теоретической областях. С экспериментальной стороны, новые мощные циклотроны и электростатические ускорители увеличили энергии, при которых с высокой точностью могут быть сближены сталкивающиеся частицы, а также дали возможность измерять поперечное сечение рассеяния с большей точностью и с большим числом новых систем. Кроме того, были найдены методы детектирования некоторых ядерных продуктов, таких, например, как бериллий-8, который, несмотря на короткое время жизни $\sim 10^{-16}$ с, представляет собой новый чувствительный зонд строения ядерных молекул. С теоретической стороны Эйб и его сотрудники из университета Киото обнаружили, что усложненный вариант модели Иманиси предсказывает намного больше низкоэнергетических ядерно-молекулярных резонансов, включая все известные ныне, чем, как считалось, могла предсказать первоначальная модель Иманиси. Это стимулировало поиск тех предсказанных резонансов, которые пока еще не были определены экспериментально.

Со времени открытия ядерных молекул, одним из важнейших и наиболее однозначно определяемых свойств является их угловой момент. Согласно квантовой теории угловой момент всякой микроскопической системы, в частности ядерной молекулы, может принимать лишь определенные дискретные значения: $Jh/2\pi$, где J — любое целое число, h — постоянная Планка. Ядерные молекулы являются короткоживущими объектами, и поэтому их угловой момент не может быть измерен непосредственно, однако он может быть определен экспериментально из углового распределения ядер, на которые распадаются ядерные молекулы, или из углового распределения продуктов их распада. Если справедливо теоретическое описание ядерных молекул, оно должно правильно предсказывать экспериментально определяемые значения углового момента. Усложненная модель Иманиси действительно давала такое описание и, кроме того, предсказывала дополнительные резонансные состояния, многие из которых сейчас уже обнаружены.

Уолтер Грейнер и его сотрудники из Франкфуртского университета, отдавая должное дальнейшему развитию первоначальной модели Иманиси, внесли свой существенный вклад, особенно важный при исследуемых ныне высоких энергиях. Они заметили, что при определенных энергиях резонансы могут появляться одновременно как в относительном движении составляющих ядер, так и в процессе возбуждения, посредством которого

энергия относительного движения перекачивается в энергию внутреннего возбуждения. Одновременные резонансы указывают на тот факт, что вероятность образования ядерных молекул при таких условиях заметно выше. Существующие данные подтверждают эту гипотезу.

Изыячная интерпретация ротационных свойств $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ ядерной молекулы выявлена в работах многих исследователей. Такая молекула в своей простейшей квантовой конфигурации имеет вид вращающейся гантели. Эта форма совершенно не похожа на форму ядра магния-24 в его основном, или наиболее низком энергетическом состоянии; хотя ядро магния-24 содержит такое же число протонов и нейтронов как и два ядра

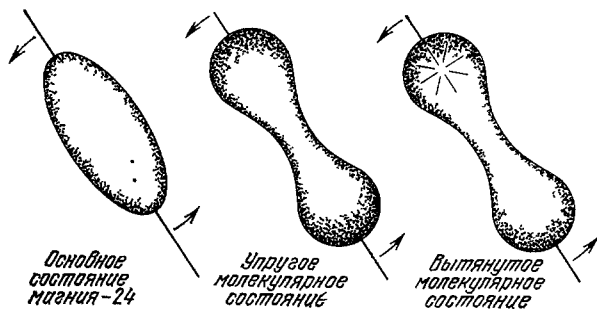


Рис 7 Гантельные конфигурации, показанные здесь схематически (посередине и справа), характеризуют ядерные молекулы, образованные при столкновениях между ядрами углерода-12

В состоянии упругой молекулы оба ядра углерода-12 находятся в основном состоянии (в центре). В типичном возбужденном молекулярном состоянии одно из ядер углерода находится в своем первом возбужденном состоянии (справа). Однако даже если одно или оба ядра углерода возбуждены, молекула продолжает сохранять форму гантели. Такие ядерные молекулы отличаются от вытянутого сфероида ядра магния-24 в основном состоянии (слева)

углерода-12, оно имеет форму мяча для американского футбола (вытянутый сфероид). Общим следствием квантовой механики является тот факт, что любое несферическое образование в форме гантели или вытянутого сфероида может сохранять свою внутреннюю структуру при увеличении скорости вращения, но лишь при дискретно квантованных значениях угловой скорости. Набор таких квантованных состояний составляет группу вращений, хорошо известную в атомно-молекулярной физике. Состояния с заданной угловой скоростью и, следовательно, с заданным угловым моментом имеют энергии, пропорциональные $J(J + 1)$, где J — квантовое число углового момента. Ядерные молекулы, принадлежащие к отдельной группе, все имеют одну и ту же внутреннюю структуру и различаются между собой только угловой скоростью, с которой вращается данная конфигурация.

□

Так как энергии ядерно-молекулярных состояний пропорциональны $J(J + 1)$, то члены ротационной группы лягут на прямую в плоскости энергии и переменной $J(J + 1)$. В группе упругих молекул, т. е. на нижнем энергетическом уровне, ядра углерода, образующие молекулу, не возбуждены и также находятся в своих низших энергетических состояниях. Группы возбужденных молекул, в которых одно или оба ядра углерода находятся в возбужденных состояниях, имеют более сложную структуру в соответствии с тем множеством способов, которыми данный угловой момент ядерной молекулы как целого может быть получен из угловых моментов гантели и составляющих ее возбужденных ядер.

В подобной интерпретации привлекает внимание то обстоятельство, что одна из возбужденных молекулярных групп — «вытянутая» молекулярная группа, в которой гантель вращается вокруг оси, коллинеарной направлению спина возбужденного ядра, пересекает упругую молекулярную группу в одной точке. Более того, вытянутые молекулярные группы, соответствующие более высоким внутренним энергетическим возбуждениям, или взаимным возбуждениям ядер, пересекают упругую молекулярную группу при более высоких значениях углового момента и энергии.

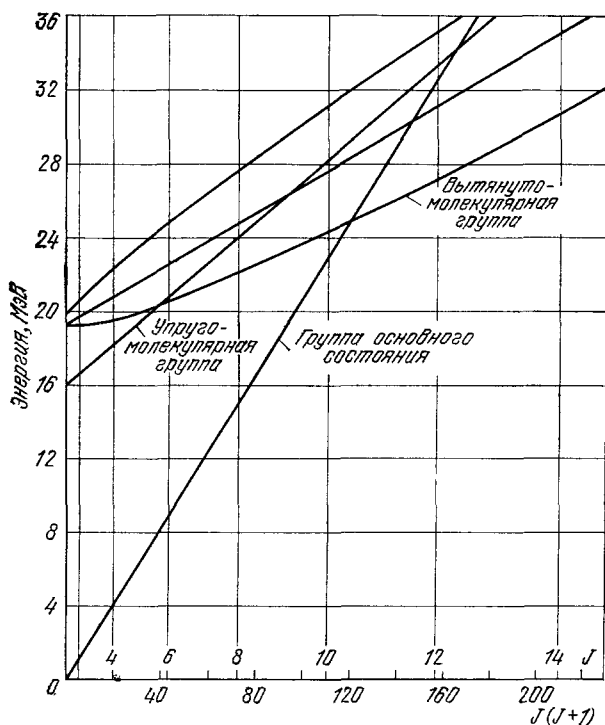


Рис. 8. Группы вращения или наборы состояний, соответствующие специфическим ядерным конфигурациям, вращающимся с различными квантованными скоростями. Образующие группу состояния являются точками, лежащими на прямой в плоскости энергии и $J(J+1)$, где J — квантовое число полного углового момента. Группа основного состояния, упруго-молекулярная группа и группы возбужденных молекул отвечают соответственно трем конфигурациям на предыдущей иллюстрации. Две наивысшие группы представляют собой конфигурации, в которых спин ядра углерода-12 в первом возбужденном состоянии либо перпендикулярен, либо антипараллелен угловому моменту относительного движения ядер. Основное внимание обращалось на значение точки пересечения упруго-молекулярной и вытянуто-молекулярной групп, в которой внутренних и относительный угловые моменты параллельны. Пока только некоторые из предсказанных состояний были обнаружены экспериментально.

Каково значение этих пересечений? При величинах углового момента и энергии, соответствующих пересечению двух групп, молекула принимает вид, представляющий собой смесь характеристик обеих групп. Например, в точке пересечения упругой молекулярной и вытянутой групп, молекула, в сущности, проводит часть своего времени в каждом из соответствующих состояний. В этой точке упругая молекула, образовавшаяся при столкновении двух невозбужденных ядер углерода, может принимать вытянутую конфигурацию без изменения энергии или углового момента.

При этих обстоятельствах существенно повышается вероятность того, что вытянутая молекула будет диссоциировать на два ядра углерода, одно из которых непременно будет находиться в возбужденном состоянии, что

характеризует пересечение групп. Эта групповая интерпретация предсказывала, что вблизи групповых пересечений молекулярные резонансы будут расщепляться на два отдельных пика, каждый из которых соответствует одной группе. Подобные двойные пики уже наблюдались недавно в $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ и $^{12}\text{C} - ^{16}\text{O}$ ядерных молекулах при соответствующих значениях энергии, что явилось подтверждением молекулярно-групповой интерпретации и стимулировало расширение исследований предсказанных удвоенных при пересечениях в других высоковозбужденных ядерных молекулах.

Расширенная модель Иманиси, учитывающая связь между движением гантели и внутренним движением составляющих ядер, а также обмен энергией между этими двумя видами движения, позволила выдвинуть предсказания, которые подтвердились во многих экспериментах. Эйб и его сотрудники использовали эту модель для предсказания триплета еще не обнаруженных резонансных состояний при энергиях чуть выше кулоновского барьера — энергии, необходимой для преодоления электростатического отталкивания между ядрами. В настоящее время этот триплет уже найден. Хотя некоторые другие предсказанные резонансы экспериментально еще не установлены, общее согласие, полученное к настоящему времени между модельными предсказаниями и экспериментальными данными, является обнадеживающим.

Поскольку относительно небольшим изменением параметров модели можно фитировать групповые данные, то вопрос о точном соответствии положения наблюдаемых и предсказанных резонансов не является принципиально важным. Модель требует также, чтобы при диссоциации ядерной молекулы, находящейся в вытянутой конфигурации, по неупругому каналу спины всех появляющихся при этом возбужденных ядер углерода были ориентированы в общем направлении. Сейчас ведутся сложные измерения для подтверждения этого явления, и их результаты помогут бы установить физическую состоятельность групповой интерпретации.

□

Групповая интерпретация, резонансная картина и большое количество подтверждающих их новых данных разрешили некоторые парадоксы, связанные с ранними данными и первоначальной моделью Иманиси. Экстраполяция ранних данных приводила к предположению, что в центре некоторых звезд углерод рождается со скоростью, более чем в 10 раз превосходящей предсказываемую любыми моделями звездной эволюции. Недавняя работа показала, что сложные ранние измерения содержали экспериментальные ошибки, и, следовательно, экстраполяция была некорректной. На основании современных данных скорость рождения углерода оказалась величиной того же порядка, что и скорости, предсказанные астрофизическими моделями. Если первоначальная модель Иманиси выдвинула явно нефизическое предположение о том, что поверхности ядер, участвующие в ядерно-молекулярных взаимодействиях, проникают друг в друга не разрушаясь, то недавняя работа существенно разъяснила такое предположение. Она показала, что ядерные поверхности становятся действительно чрезвычайно прозрачными, если правильно учесть эффекты, связанные с угловым моментом.

Большинство последних работ в этой области было сосредоточено на измерениях полных поперечных сечений слияния — вероятностей образования единого компаунд-ядра из ядер, участвующих в соударении. Так как силы ядерного притяжения, действующие между двумя ядрами, находящимися на ядерно-молекулярных расстояниях друг от друга, очень велики, то ожидалось, что образование ядерных молекул будет уве-

личивать вероятность слияния ядер как в случае образования компаунд-ядра магния двумя ядрами углерода. Эти ожидания были экспериментально подтверждены для $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ и $^{12}\text{C} - ^{16}\text{O}$ соударений, в которых резонансы слияния находятся в замечательном согласии с предсказанными в рамках молекулярно-групповой интерпретации.

В ранних экспериментах по изучению $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$ соударений не было замечено никаких пиков, которые указывали бы на образование ядерных молекул, возможно, по той причине, что подобные пики замазывались большим числом конкурирующих компаунд-ядерных эффектов. Однако в настоящее время резонансная структура, указывающая на существование ядерных молекул, выявлена и в данных по слиянию $^{16}\text{O} - ^{16}\text{O}$, полученных П. Сперром и его сотрудниками в Аргоннской национальной лаборатории и Ф. Хаасом и сотрудниками в Страсбургском университете. Но не все данные по слиянию обнаруживают резонансную структуру. Например, в соударениях между ядрами кислорода-18 (^{18}O) наличие двух валентных нейтронов вне основного кора кислорода-16 способно смазать резонансы, которые иначе были бы видны. Присутствие двух валентных нейтронов и одного валентного протона в ядре фтора-19 (^{19}F) может объяснить отсутствие резонансной структуры в столкновениях $^{19}\text{F} - ^{12}\text{C}$, но в этом случае такое объяснение существенно менее убедительно. Сложные измерения поперечных сечений этих взаимодействий сейчас только лишь начинаются, поэтому резонансная структура еще может быть обнаружена в будущем.

Совсем недавние измерения обнаружили «рваные» пики в поперечном сечении реакции $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ при высоких энергиях. Каждый неровный пик является, по-видимому, пакетом большого числа острых и тесно, но нерегулярно расположенных резонансов, которые могут соответствовать определенным состояниям компаунд-ядра магния-24. Фешбах предположил, что неровные пики вполне могут служить классической иллюстрацией его «дверной» модели ядерных взаимодействий, разработанной им для описания взаимодействий ядер намного легче углерода. В этой модели делается предположение, что ядро-мишень углерода-12 и налетающее ядро углерода-12 сначала объединяются, образуя особо простое состояние, которое потом может либо опять диссоциировать на первоначальные мишень и налетающую частицу, либо, пройдя так называемую «дверь», постепенно развиваться далее через ряд более сложных конфигураций в направлении статистического равновесия высоковозбужденного компаунд-ядра магния.

Предстоит еще проделать большую работу для того, чтобы обосновать «дверную» модель взаимодействий тяжелых ионов. К примеру, согласно квантовой теории, все низколежащие резко очерченные резонансные компаунд-состояния, на которые может распадаться «дверное» состояние, должны иметь те же значения спина и четности (внутренняя симметрия), что и молекулярное «дверное» состояние, так как полные спин и четность сохраняются. В случае соответствия экспериментально определенных значений спина и четности этому требованию дверная модель получит мощную поддержку. Более того, для убедительного идентификации состояния как молекулярно-дверного необходимо экспериментально показать, что каждое из острых состояний в своей внутренней структуре содержит существенную долю молекулярной конфигурации. Такие измерения в настоящее время ведутся.

□

Позвольте мне подвести итог тому, что уже выявлено в экспериментах по исследованию структуры и динамики $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ ядерных молекул, так как именно этот вид ядерных молекул наиболее хорошо изучен. Моле-

кулярные резонансы появлялись всякий раз, когда тщательно исследовался новый диапазон энергий. При высоких энергиях, много выше кулоновского барьера, молекулярные резонансы проявляются как фрагментированные пики шириной несколько миллионов электрон-вольт, состоящие из узких подрезонансов с типичной шириной порядка нескольких сотен тысяч электрон-вольт. Большинство работ, посвященных углеродным молекулам, сосредоточено на вопросе о том, что происходит при переходе одного или обоих соударяющихся ядер в низшее возбужденное состояние 4,43 МэВ. Однако при увеличении энергий сталкивающихся ядер до максимально возможных для современных прецизионных ускорителей величин

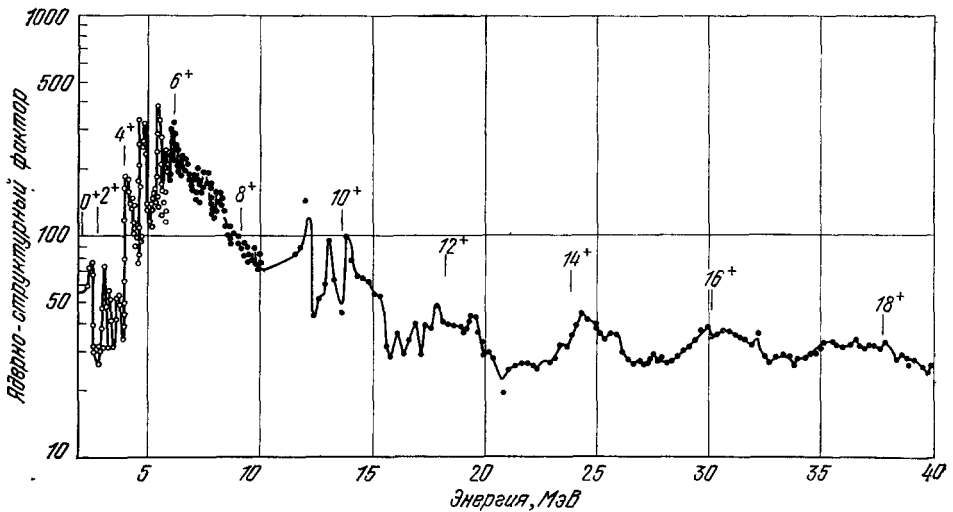


Рис. 9. Полное сечение взаимодействия $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ построено как функция энергии. Светлые кружки представляют данные, полученные в Мюнстерском Университете, темные: до 10 МэВ — данные, полученные в Йейле, свыше 10 МэВ — данные, полученные в Университете Нью-Йорка в Стони-Брук. Ядерно-структурный фактор представляет ту часть поперечного сечения взаимодействия, которая зависит только от структуры ядер углерода. Вертикальные линии указывают на энергии, при которых существующие модели предсказывали упругие молекулярные резонансы. Каждый резонанс помечен значением полного спина в единицах $\hbar/2\pi$, где \hbar — постоянная Планка. Очевидное отсутствие подструктуры высокоспиновых резонансов может отражать тот факт, что соответствующие измерения были выполнены с точностью, недостаточной для выявления такой подструктуры, если она существует. Знаменательно, что резонансы, по-видимому, существуют во всей 40 МэВ-ной области энергий, которая до сих пор изучалась.

было обнаружено появление множества возбужденных состояний. Например, К. А. Эрб с соавторами из Йейля и К. Катери с сотрудниками из Университета Цукуба наблюдали поглощение одним из ядер углерода 14,05 МэВ и переход его в состояние с более высоким спином, при этом второе ядро углерода либо оставалось в основном состоянии, либо поглощало 4,43 МэВ. В последнем случае 18,48 МэВ энергии (что является чрезвычайно большим количеством для ядерных явлений) перекачивалось из относительного движения во внутреннее возбуждение посредством простого механизма перевода обоих ядер углерода в более высокие спиновые состояния.

Столкновения, в которых одновременно оба ядра переводятся в более высокие вращательные состояния, имеют поразительно большие поперечные сечения — вероятность возбуждения обоих ядер сравнима по величине с вероятностью возбуждения только одного из них. Это находится в драматическом противоречии с обычной ситуацией в ядерных столкновениях, и для объяснения этой аномалии мы предложили «шестеренчатое» взаимодействие, при котором два ядра приводятся в одинаковое, но противополо-

ложно направленное вращение посредством трения в точке контакта при нецентральных соударениях. Экспериментальное доказательство того, что угловые моменты в подобных соударениях противоположны, пока еще не получено, но это могло бы стать единственным ключом к такому простому механизму возбуждения.

Большинство теоретических работ по ядерным молекулам было посвящено изучению их макроскопических свойств таких, как ротационные характеристики. Недавно стало возможным изучение и таких микроскопических свойств как поведение отдельных протонов и нейтронов внутри

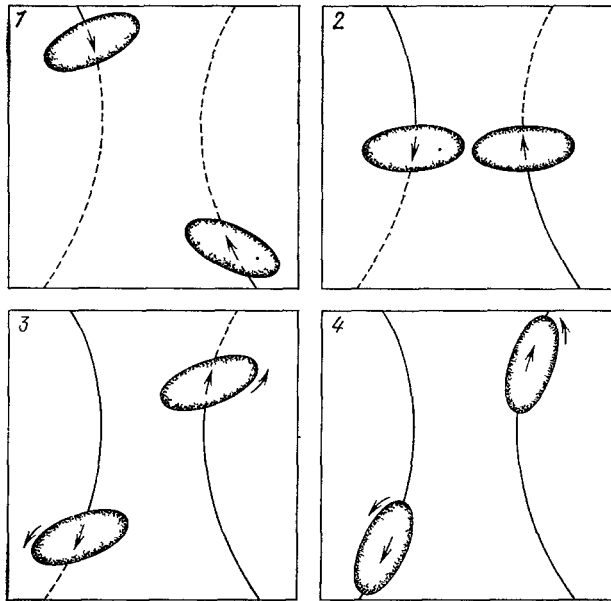


Рис. 10. Касательные столкновения между ядрами углерода-12, напоминающими по форме головку дверной ручки, могут привести каждое ядро во вращение вокруг любой оси, перпендикулярной оси симметрии «головки».

Экспериментально было показано, что вероятность перехода обоих ядер во вращательное возбужденное состояние в результате соударения сравнима по величине с вероятностью перехода в такое состояние только одного из ядер. Это предполагает «шестеренчатое» взаимодействие, при котором оба ядра приводятся в состояние одинакового (по величине момента) и противоположно направленного вращения посредством трения в точке соприкосновения

сталкивающихся ядер. Например, И. Марухн и Р. Куссон из Ок-Риджской Национальной лаборатории рассчитали изменение плотности вещества при лобовом соударении $^{12}\text{C} - ^{12}\text{C}$ в течение короткого времени взаимодействия. Явления, входящие в рассмотрение, оказались настолько сложными, что Марухн и Куссон в своих вычислениях вынуждены были сделать упрощающие приближения. Например, они ограничили рассмотрение лишь лобовых соударений, поэтому не рассматривали эффектов, связанных с угловым моментом, кроме того, каждый протон и нейтрон они рассматривали так, как если бы он мог «чувствовать» только среднюю силу остальных 23 протонов и нейтронов. В частности, они игнорировали все эффекты, которые могли оказать индивидуальные столкновения протонов и нейтронов на орбитальные конфигурации внутри рассматриваемых ядер. Было особенно приятно увидеть, что ядерно-молекулярные конфигурации проявились даже в таких приближенных микроскопических расчетах, так как априорных причин к ожиданию этого не существовало.

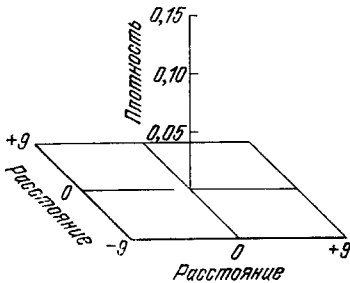
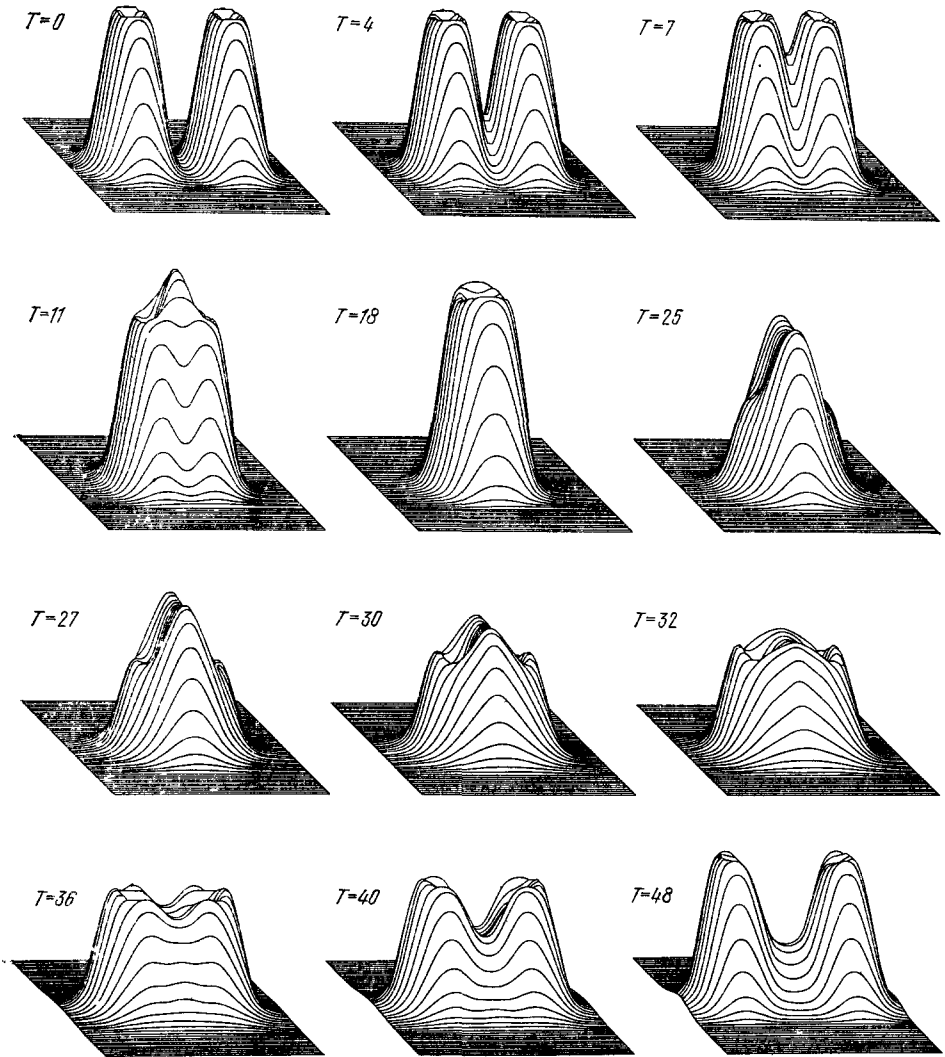


Рис. 11. На этих графиках, указывающих вычисленную плотность протонов и нейтронов двух соударяющихся ядер углерода-12 в разные моменты времени, показано образование ядерной молекулы.

Плотность выражена в числе протонов и нейтронов на 10^{-39} см³. Каждый протон и нейтрон налетающего ядра углерода, бомбардирующий углеродную мишень, имел среднюю энергию 64 МэВ (миллионов электрон-вольт). Взаимодействие между двумя ядрами длилось около $5 \cdot 10^{-22}$ с. За единицу времени принято $3,3 \cdot 10^{-24}$ с, за единицу длины 10^{-13} см. В момент времени $T = 0$ ядра углерода

приходят в соприкосновение и при $T = 11$ плотность достигает максимума в центральном пике. После этого образуется долгоживущий перешеек, связывающий два фрагмента, каждый из которых имеет плотность, приблизительно равную плотности одного из исходных ядер углерода. Наконец, ядерные молекулы начинают распадаться, но ограниченная мощность электронно-вычислительных машин не позволяет провести вычисления вплоть до момента окончательного разделения ядер углерода. Тот факт, что профили плотности каждого ядра при $T = 48$ распределены менее гладко, чем при $T = 0$, означает, что энергия относительного движения перешла в энергию внутреннего возбуждения. Расчеты были выполнены Р. Куссоном и И. Марухном из Ок-Риджской Национальной лаборатории.

□

В настоящее время в МТИ, Иейле, Ок-Ридже, Калифорнийском университете в Беркли и в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса прово-

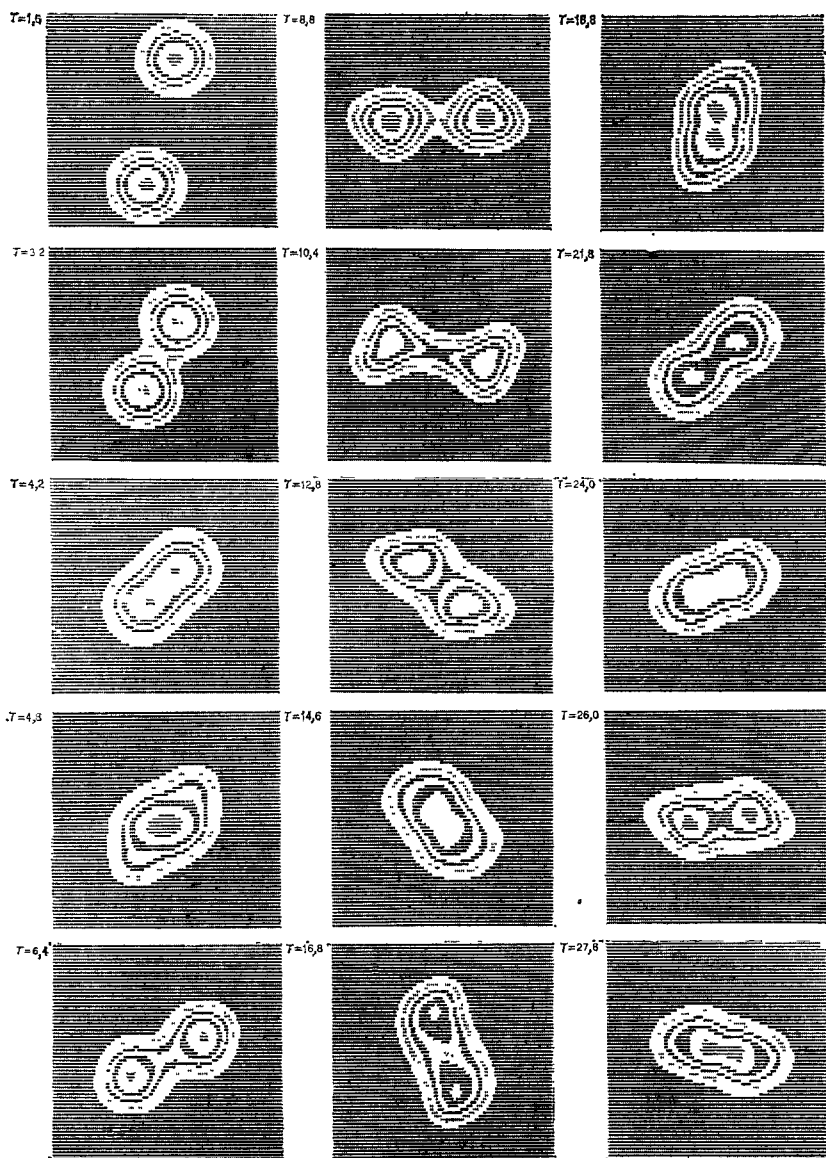


Рис. 12. Контурные линии показывают плотность в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, вычисленную для столкновения между ядрами кислорода-16 с энергией 52,5 МэВ и угловым моментом $13 \hbar/2\pi$.

За единицу времени принято 10^{-22} с. Эти графики, полученные Х. Флокардом, С. Коовином и М. Вэйсом из Ливерморской лаборатории им. Лоуренса Калифорнийского университета иллюстрируют ожидаемый процесс формирования ядрами кислорода-16 вращающейся и колеблющейся молекулы.

дится работа, обещающая повысить точность этих расчетов. Ранние расчеты касаются соударений, при которых ядра углерода сливаются в высоковозбужденное ядро магния-24, в котором происходят коллективные

колебания, а затем распад вновь на два ядра углерода. Так как предполагалось лобовое соударение, то вычисления ничего не могли обнаружить относительно вращения всей системы. После соударения плотность каждого ядра изменяется от точки к точке до известной степени неравномерно по сравнению с плавным изменением плотности до соударения. Нерегулярность плотности является признаком того, что энергия относительного движения была преобразована в сложное внутреннее возбуждение. Х. Флокард, С. Коонин и М. Вэйсс из Ливерморской лаборатории провели еще более заманчивые вычисления плотности для нелобового столкновения между ядрами кислорода, включающие, следовательно, вращательные и колебательные эффекты.

Расчеты предполагают, что при сравнительно низких энергиях плотность сталкивающихся ядер никогда не возрастает существенно выше значения плотности в центре одиночного ядра углерода. Однако как при низких, так и при высоких энергиях во время соударения образуется длинный перешеек для связи ядер углерода на относительно продолжительное время в колеблющуюся и вращающуюся молекулярную конфигурацию. Расчеты обычно ограничивались ранними стадиями соударения из-за мощности существующих машин, которые резко обрывают счет задолго до того как соударение достигнет завершающей стадии.

Чтобы проследить за движениями отдельных протонов и нейтронов во время соударения ядер углерода Мозел с сотрудниками из Университета в Гессене работали с оболочечной моделью ядра, в которой предполагается, что протоны и нейтроны ядра образуют оболочки подобно электронным оболочкам атома. Полученные ими результаты аналогичны результатам, полученным в Ливерморе. Хотя техника выполнения этих микроскопических расчетов все еще находится на низком уровне, в конце концов от них ожидают получить подробную картину той роли, которую играют в столкновениях тяжелых ионов отдельные протоны и нейтроны. Подобная картина послужила бы основой прорыва в понимании ядерной динамики и ядерной структуры.

Будучи в 1960 г. изолированной странной особенностью, ядерные молекулы стали обычным аспектом ядерной структуры и динамики изучавшихся до сих пор систем тяжелых ионов. Ядерные молекулы дали новый ответ на старый вопрос о том, что происходит с ядром при получении им дополнительной энергии. Несколько лет назад П. Д. Паркер и его сотрудники из Иейля показали, что в грубом приближении спектр возбужденных состояний легких ядер может быть интерпретирован как увеличение радиуса ядра примерно на 10^{-14} см на каждый миллион электрон-вольт дополнительной энергии. Другими словами, ядро при нагревании расширяется. Если бы происходило только это, то ядро было бы совершенно неинтересным объектом. Однако уже сейчас обнаружено, что при некоторых определенных энергиях, много выше энергии выкипания нейтрона, протоны и нейтроны в ядре образуют кластеры и молекулярные конфигурации, в которые объединяются подгруппы протонов и нейтронов, создавая хорошо различимые ядра, движущиеся друг относительно друга. Это явление открывает совершенно новую область ядерной структуры и ядерной динамики.

ЛИТЕРАТУРА

- Bromley D. A., Kuehner J. A., Almqvist.— Phys. Rev. Lett., 1960, v. 4, p. 365.
 Imanishi B.— Phys. Lett. Ser. B, 1968, v. 27, p. 267.
 Scheid W., Greiner W., Lemmer R.— Phys. Rev. Lett., 1970, v. 25, p. 176.
 Arima A., Scharff-Goldhaber G., Mevov K. W.— Phys. Lett. Ser. B, 1972, v. 40, p. 7.
 Fink H. J., Scheid W., Greiner W.— Nucl Phys. Ser. A, 1972, v. 188, p. 259.