

О МЕХАНИЗМАХ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ D–T-СИНТЕЗА

Исследованы механизмы реакции синтеза ядер дейтерия и трития. Предложен промежуточный механизм реакции (между прямым ядерным взаимодействием и образованием составного ядра). Образующееся составное ядро ${}^5_2\text{He}$ быстро (приблизительно за время, характерное для сильного взаимодействия) распадается. Последовательность событий, механизм и энергетическая зависимость сечения характерны для ядерных реакций, реализующихся через образование составного ядра.

E-mail: en7@power.bmstu.ru

Ключевые слова: ядерный синтез, прямые ядерные взаимодействия, составное ядро.

На протяжении нескольких десятилетий проблема реализации управляемого термоядерного синтеза является одной из основных задач физики [1, 2]. В своей Нобелевской лекции академик В.Л. Гинзбург поставил ее на первое место среди физических проблем начала XXI столетия [1].

Однако в последние два–три десятилетия на первый план вышла задача практической реализации установок термоядерного синтеза для нужд энергетики, что требует развития термоядерных технологий. С точки зрения получения энергии механизм конкретной термоядерной реакции не представляет интереса. Важно, что это — ядерная реакция, реализующаяся за счет ядерного (как проявления сильного) взаимодействия (в этом случае ее сечение достаточно велико), и что эта реакция — экзоэнергетическая.

Исследования по проблеме управляемого термоядерного синтеза, которые проводятся в нашей стране и за рубежом, по крайней мере, в последние 40 лет (после образования под эгидой МАГАТЭ Международного совета по термоядерным исследованиям в 1970 г.), касаются, главным образом, технологий термоядерных реакторов. Исследования последних лет посвящены технологиям, материалам термоядерных реакторов, физике и диагностике плазмы, математическому моделированию процессов переноса в плазме (см. [3–5], а также материалы ежегодных Международных конференций по физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза, проходящих в Звенигороде). Ведутся работы по проекту ITER [6, 7]. В последние 20 лет активно проводятся экспериментальные исследования по использованию в качестве топлива термоядерных реакторов смеси ядер дейтерия (D или ${}^2_1\text{H}^1$) и трития (T или ${}^3_1\text{H}^2$). В 1991 г. на европейской установке JET впервые получена D–T-плазма с малым содержанием трития [8]. В 1993 г. в США

на реакторе TFTR впервые осуществлен эксперимент по использованию 50 % D–50 % T-плазмы [9]. При этом непосредственно механизм реакции D–T-синтеза не представляет практического интереса.

Действительно, механизм реакций синтеза для практической реализации термоядерных энергетических установок не важен, представляет чисто теоретический интерес и лежит в области фундаментальных исследований. Физические энциклопедии и справочники трактуют его как “энергетический сдвиг” к средней части периодической системы Менделеева, как процесс образования сильно связанных ядер (с большей удельной энергией связи) из более “рыхлых”, как слияние (синтез) легчайших ядер в более тяжелые [10, 11]. При этом механизм этого слияния не конкретизируется.

Известно, что возможны два принципиально различных механизма реакций синтеза с участием ядер дейтерия — дейтронов: образование составного ядра и неполное проникание дейтрона в ядро (последний механизм формально можно отнести к прямому ядерному взаимодействию). Обобщенная информация по таким реакциям приведена в работе [12].

Также известно, что при образовании составного ядра в выходном канале D–D-реакции чаще присутствуют нейтроны (1_0n), при прямом взаимодействии — протоны (1_1p) [12]. Причем в реакции неполного проникания дейтрона в ядро отношение числа протонов и нейтронов в выходном канале D–D-реакции уменьшается с увеличением кинетической энергии дейтронов, в реакции с образованием составного ядра это отношение увеличивается. Такая закономерность является основным способом идентификации механизма D–D-реакции.

Вопрос состоит в том, как идентифицировать механизм синтеза ядер дейтерия и трития при характерной для будущих энергетических установок кинетической энергии взаимного сближения (~ 100 кэВ, соответствующей максимальному сечению реакции), если в выходном канале реакции отсутствуют протоны? По данным работы [12], реакции D–T-синтеза чаще реализуются через образование составного ядра с высокой энергией возбуждения, значительно превышающей энергию отделения нуклона и α -частицы от ядра. Но и в этом случае есть основания полагать, что механизм D–T-реакции отличается от традиционного механизма составного ядра, предложенного Н. Бором.

Истинный механизм D–T-реакции, всегда реализующейся с испусканием нейтронов и α -частиц (${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$) неизвестен, однако согласно обобщениям, приведенным в работах [12, 13], возможны два варианта: неполное проникание дейтрона в ядро трития — тритон (прямое ядерное взаимодействие) и образование составного ядра.

Не исключен и третий вариант — реакция срыва (протона ядра дейтерия), относящаяся к прямому ядерному взаимодействию. При энергии взаимного сближения дейтерия и трития до 200...300 кэВ все эти процессы имеют одинаковый выходной канал. Заполненность нейтронной оболочки в магическом ядре трития способствует уменьшению энергии возбуждения как составного ядра ^5He в случае его образования, так и продуктов прямого ядерного взаимодействия, если реакция идет по этому каналу.

Прямое ядерное взаимодействие ядер дейтерия и трития. Отметим известные экспериментальные факты, которые формально не позволяют отнести D–T-синтез к реакции, реализующейся через образование составного ядра (при энергиях относительного сближения ядер дейтерия и трития ~ 100 кэВ) [10–12, 14].

1. Время D–T-реакции лишь незначительно (на порядок) превышает характерное время τ_S сильного (ядерного) взаимодействия ($\tau_S \sim 10^{-23} \dots 10^{-22}$ с) и на несколько порядков меньше характерного времени τ ядерных реакций, реализующихся через образование составного ядра (в среднем $\tau \sim 10^{-14} \dots 10^{-12}$ с).

2. При высокой кинетической энергии относительного сближения ядер дейтерия и трития (~ 100 кэВ) средняя длина свободного пробега, например, дейтрона в ядерной материи (ядре дейтерия или трития) значительно превышает характерный размер другого ядра и образование составного ядра теоретически невозможно.

3. Механизм составного ядра не позволяет адекватно описать ядерные реакции при высокой энергии возбуждения.

4. В пользу образования составного ядра обычно говорит резонансный характер зависимости сечения взаимодействия от кинетической энергии сталкивающихся частиц. На рис. 1 отсутствуют ярко выраженные резонансы.

5. Реакция имеет единственный выходной канал.

Механизм прямого взаимодействия ядер дейтерия и трития прост и понятен, хотя реакция D–T-синтеза не вполне подпадает под определение прямых ядерных взаимодействий. В прямых взаимодействиях налетающая частица взаимодействует лишь с небольшим числом нуклонов ядра. Вносимая в атомное ядро энергия передается преимущественно одному или небольшой группе нуклонов, реакция происходит на периферии ядра. Даже если реакция D–T-синтеза реализуется по каналу прямого ядерного взаимодействия, то в нее вовлечены практически все нуклоны дейтерия и трития, хотя два спаренных нейтрона в ядре трития как бы не участвуют в реакции (перераспределении нуклонов и энергии между нуклонами) и, будучи спаренными, так

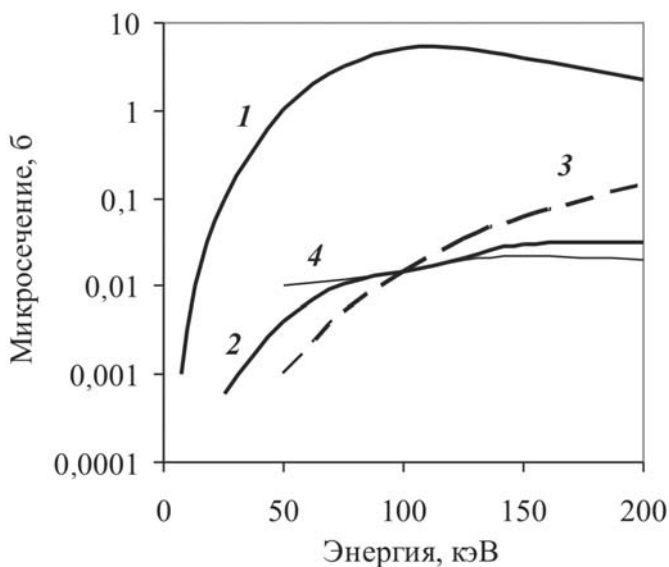


Рис. 1. Зависимость микросечений реакций синтеза легких ядер от энергии их относительного сближения [11]:

1 – $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$; 2 – $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$; 3 – $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$; 4 – $T + T \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$

и переходят в ядро ${}^4\text{He}$. Протоны, входящие в ядра дейтерия и трития, спариваются и образуют устойчивое соединение в составе нового ядра ${}^4\text{He}$. Таким образом, реакция прямого взаимодействия в основном касается лишь двух протонов, первоначально находящихся в разных атомных ядрах. Но это лишь “в основном”. Спаренные нейтроны трития так или иначе участвуют в ядерном притяжении протона, находящегося в ядре дейтерия, т.е., строго говоря, во взаимодействии участвуют все нуклоны трития и протон дейтерия (половина нуклонов дейтерия). Таким образом, в прямом ядерном D–T-взаимодействии есть своя специфика, а именно участие практически всех нуклонов, входящих в состав сталкивающихся ядер.

При аномально высоких для установок синтеза энергиях E , когда дебройлевская длина волны λ дейтрона или тритона ($\lambda \sim \frac{h}{\sqrt{2mE}}$, где m – масса дейтрона или тритона (рис. 2)) меньше характерного размера ядра, микросечение реакции прямого ядерного взаимодействия ядер дейтерия и трития можно оценить как $\sigma \approx \pi(R_D^2 + R_T^2)$, где R_D и R_T – радиусы ядер дейтерия и трития соответственно. Если в качестве радиуса взять характерный размер ядер дейтерия (1,963 фм) и трития (менее 1,9 фм), то максимальное сечение $\sigma \approx 0,23$ б, что заметно меньше характерных сечений D–T-реакции при энергиях порядка 100 кэВ (см. рис. 1). Известно, что сечение прямого взаимодействия практически не зависит от кинетической энергии сталкивающихся частиц.

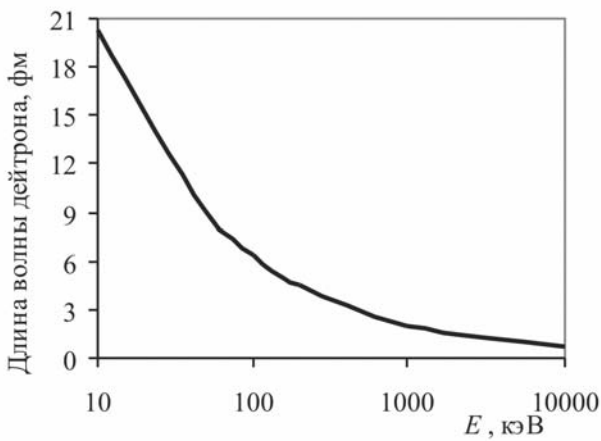


Рис. 2. Зависимость дебройлевской длины волны дейтрона от его кинетической энергии

экспериментальные факты в пользу образования составного ядра ${}^5\text{He}$ при энергии взаимного сближения ядер дейтерия и трития ~ 100 кэВ [10–12, 14–16].

1. Составное ядро реально существует, но его среднее время жизни крайне малó.

2. Отсутствие ярко выраженных резонансов может быть связано с перекрывающимися уровнями в ядрах с высокой энергией возбуждения, и в этом случае зависимость сечений от кинетической энергии сталкивающихся ядер имеет тонкую структуру, т.е. состоит из множества перекрывающихся резонансных всплесков. Зависимость для D–T-реакции (см. рис. 1) представляют собой не что иное, как широкий (гигантский) резонанс, имеющий тонкую структуру. Сечение D–T-реакции при энергиях ~ 100 кэВ (максимум соответствует энергии 108 кэВ) более чем на порядок превышает значение, соответствующее прямому ядерному взаимодействию, и зависит от кинетической энергии взаимного сближения ядер.

3. Согласно определению, составное ядро — долгоживущее образование, распадающееся с определенной вероятностью по разным каналам.

Рассмотрим приведенные факты подробнее.

1. Принято считать, что атомное ядро существует, если среднее время τ его жизни не менее характерного времени τ_S сильного (ядерного) взаимодействия, т.е. $\tau \geq \tau_S \sim 10^{-23} \dots 10^{-22}$ с [13]. Принято также считать, что ядро существует, если не испускает нуклоны из основного энергетического состояния, иначе говоря, если энергия связи последнего нейтрона и/или протона отрицательна [13]. Известны и характерные времена жизни составных ядер $\tau \sim 10^{-14} \dots 10^{-12}$ с. Распад составного ядра во многом схож с явлением радиоактивности — стабилизированным по времени распадом. Однако в отличие

Таким образом, есть основания полагать, что прямое ядерное взаимодействие ядер дейтерия и трития доминирует лишь при энергиях, значительно превышающих (по крайней мере, на один–два порядка) характерные значения для существующих установок ядерного синтеза.

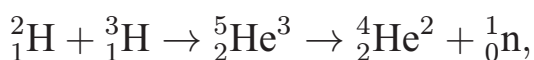
Реакция D–T-синтеза, реализующаяся через образование составного ядра. Отметим

от радиоактивности среди факторов стабилизации распада составного ядра определяющим является эффект, описываемый как одна из интерпретаций принципа неопределенности Гейзенберга, согласно которой среднее время τ жизни составного ядра и ширина $\Delta\Gamma$ энергетического уровня, соответствующая данному возбужденному состоянию составного ядра, связаны соотношением $\Delta\Gamma\tau \sim h$, где h — постоянная Планка. В результате, например, распад составного ядра с испусканием нейтрона (характеризующийся нейтронной шириной $\Delta\Gamma_n$ уровня) реализуется не за время $\tau \sim \tau_S$ (или немного превышающее τ_S), а за гораздо большее время $\tau_n \sim 10^{-18} \dots 10^{-12}$ с (см. [13] и ссылки к этой работе). Верхняя оценка соответствует тяжелым, нижняя — легким ядрам. Нейтронная ширина уровня для легких ядер приблизительно одинакова и составляет $\Delta\Gamma_n \sim 1$ кэВ, а время распада составного ядра по каналу с испусканием нейтрона $\tau_n \sim h/\Delta\Gamma_n \sim 10^{-18}$ с.

Известно, что испускание нейтронов ядрами происходит за счет сильного (ядерного) взаимодействия и, несмотря на некоторые слабо влияющие эффекты стабилизации, достаточно быстро — за время, незначительно превышающее τ_S , хотя известны случаи испускания нейтронов за $\tau_n \sim 10^{-17}$ или, по крайней мере, не более $4 \cdot 10^{-14}$ с [13].

В реакции синтеза ядер дейтерия и трития роль составного ядра выполняет ${}^5_2\text{He}^3$. Это ядро формально не существует по двум вышеупомянутым причинам (т.е. по определению). Даже в основном энергетическом состоянии ядро ${}^5_2\text{He}^3$ испускает нейтрон, (энергия связи которого равна 0,96 МэВ), а период полураспада ядра ${}^5_2\text{He}^3$ составляет $(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-22}$ с [15], что соответствует среднему времени жизни $\sim 10^{-21}$ с, т.е. всего на порядок превышает τ_S . (Первые успешные попытки доказательства существования ${}^5\text{He}$ были сделаны в 1937 г., первые данные по ядерно-физическим свойствам ${}^5\text{He}$ получены к 1950-м годам и опубликованы в работе [17].)

Распад ${}^5_2\text{He}^3 \rightarrow {}^4_2\text{He}^2 + {}^1_0\text{n}$ происходит за счет ядерного взаимодействия (продукты реакции практически не вступают в электромагнитное взаимодействие), т.е. за время $\tau \sim \tau_S$. Это единственный канал распада ${}^5_2\text{He}$ [15]. (Небольшая стабилизация возможна за счет испускания фотонов — квантов электромагнитного взаимодействия с характерным временем $\tau \sim \tau_{E-M} \sim 10^{-20} \gg \tau_S$.) Таким образом, можно считать, что D–T-реакция может реализоваться через образование составного ядра ${}^5_2\text{He}$, но это ядро быстро распадается за счет ядерного взаимодействия (с небольшой стабилизацией во времени за счет электромагнитного взаимодействия при испускании γ -квантов) согласно реакции



т.е. формально (в соответствии с определением) ядро ${}^5_2\text{He}$ не существует, а физически (реально) живет в течение времени, равного τ_S или немного его превышающего ($\sim 10^{-21}$ с). Во всяком случае ядро ${}^5_2\text{He}$ реально, а не виртуально. В результате процесс D–T-синтеза идет гораздо быстрее, чем большинство ядерных реакций, реализующихся через образование составного ядра. Причем два этапа D–T-реакции — образование и распад составного ядра ${}^5_2\text{He}$ — нельзя считать независимыми как в традиционной модели составного ядра Н. Бора, так как они реализуются приблизительно за одинаковое время $\tau \sim \tau_S$ и составное ядро “помнит” о способе своего образования.

По причине отсутствия заметных факторов стабилизации распада составного ядра ${}^5_2\text{He}$ для реакции D–T-синтеза, реализующейся как через образование составного ядра, так и посредством прямых ядерных взаимодействий, требуется одинаковое время. Более того, D–T-реакции, реализующиеся через образование составного ядра могут протекать быстрее, чем классические прямые ядерные реакции с испусканием заряженных частиц.

2. Известно, что при высоких энергиях возбуждения, превышающих реальную (а не среднюю) энергию связи одного или нескольких нуклонов в ядре, энергетические уровни перекрываются и в энергетической зависимости сечения реакции отсутствуют резонансы [14]. В этих случаях можно выделить автоионизационные уровни, которые соответствуют энергиям возбуждения, превышающим энергию связи конкретного нуклона в ядре, и которые сохраняют некоторые свойства дискретных энергетических уровней. Составное ядро, находящееся в возбужденном состоянии на одном из автоионизационных уровней, распадается за счет ядерного взаимодействия путем испускания одного или нескольких нуклонов. При испускании протонов распад составного ядра стабилизирован электромагнитным взаимодействием и протекает медленнее, чем при испускании нейтронов. Обычно автоионизационные уровни наблюдаются при энергиях возбуждения до 30...50 МэВ. Им соответствуют широкие, так называемые гигантские, резонансы в энергетической зависимости сечений [14].

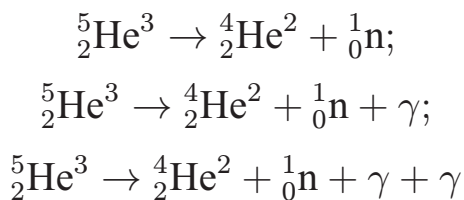
Механизм распада составного ядра ${}^5_2\text{He}$, образующегося в реакции D–T-синтеза, близок к модели распада из автоионизационного возбужденного состояния. Тот факт, что ядро ${}^5_2\text{He}$ испускает нейтрон даже из основного энергетического состояния, позволяет распространить применимость этого механизма на случаи относительно низких энергий возбуждения. Такая модель поведения составного ядра (распад из автоионизационного уровня) реализуется при отсутствии кулоновского барьера. Для преодоления кулоновского отталкивания ядер дейтерия

и трития кинетическая энергия их взаимного сближения должна превышать 0,1 МэВ [13]. (Следует отметить, что реакции термоядерного синтеза не имеют кулоновского барьера в точном смысле этого термина [18].) В итоге при наличии кулоновского барьера в D–T-реакции, протекающей с образованием составного ядра, реализуется сценарий распада составного ядра ${}^5\text{He}$, близкий к модели распада из автоионизационного возбужденного состояния, а в энергетической зависимости сечения реакции присутствует гигантский резонанс (см. рис. 1), имеющий тонкую структуру. Учитывая, что составное ядро ${}^5\text{He}$ формально не существует (испускает нейтрон даже из основного состояния), этот сценарий оказывается единственно возможным.

3. Формально можно выделить несколько выходных каналов реакции D–T-синтеза, реализующейся через образование составного ядра.

Выходные каналы D–T-реакции. Если все процессы в физике микромира, в том числе и ядерные реакции в целом и каналы распада составного ядра в частности, носят вероятностный характер, то откуда такой детерминизм в определении выходного канала реакции D–T-синтеза?

Если реакция идет через образование составного ядра ${}^5\text{He}$, формально не существующего по причине перегруженности всего лишь одним нейтроном и испускающего нейтрон даже из основного энергетического состояния, а другие каналы распада запрещены законами сохранения, то и вероятность распада ${}^5\text{He}$ по каналу с испусканием нейтрона составляет 100 %. Но и здесь нет определенности, поскольку возможны разные выходные каналы реакции:



и так далее, хотя во всех со 100-процентной вероятностью присутствует нейтрон и α -частица. Распад составного ядра ${}^5\text{He}$ по каналу неупругого рассеяния (D + T) запрещен законом сохранения пространственной четности в сильных и электромагнитных взаимодействиях.

Если реакция идет как прямое ядерное взаимодействие, то присутствие в выходном канале нейтрона и α -частицы определяется лишь максимальной вероятностью при кинетической энергии взаимного сближения ядер D и T до 200...300 кэВ. При значительно более высоких энергиях открываются другие каналы прямого взаимодействия. При энергии до 200...300 кэВ сечения реакции D–T-синтеза, протекающей по другим каналам, столь малы, что недоступны для экспериментального наблюдения.

Таким образом, при столкновении ядер дейтерия и трития возможны упругое рассеяние, реализующееся практически при любых кинетических энергиях сталкивающихся ядер (не представляющее интерес для получения энергии), прямые ядерные взаимодействия и образование составного ядра ${}^5\text{He}$ с его распадом по каналу ${}^4_2\text{He}^2 + {}^1_0\text{n}$ (при кинетической энергии взаимного сближения ядер D и T до 200 кэВ).

При энергиях взаимного сближения ядер дейтерия и трития до 200...300 кэВ прямые взаимодействия ядер D и T реализуются как неполное проникание дейтрона в ядро трития или как реакция срыва. В обоих случаях выходным каналом является реакция ${}^4_2\text{He}^2 + {}^1_0\text{n}$. При энергии, существенно превышающей 300...400 кэВ, вероятность образования составного ядра пренебрежимо мала, доминируют прямые взаимодействия, причем открываются другие каналы прямого взаимодействия. Последние процессы во многом аналогичны реакциям глубокого расщепления атомных ядер, хотя, очевидно, не носят лавинообразного характера, присущего spallation-реакциям [13].

Слабо связанное ядро дейтерия (полная энергия связи дейтрона 2,225 МэВ) в прямом ядерном взаимодействии легко распадается на нуклоны.

В отличие от дейтрона, ядро трития нестабильно ($T_{1/2} = 12,33 \text{ лет} \pm \pm 7,30 \text{ сут.}$ [16]) несмотря на заполненность нейтронной оболочки. Магическое число нейтронов в тритии является важным стабилизирующим фактором — тритий не испускает нейтрон из основного состояния (в отличие от ${}^5\text{He}$). Нестабильность трития связана с перегруженностью ядра нейтронами, так как один нейтрон оказывается лишним. В прямых реакциях ядро трития также легко распадается на нуклоны, если взаимодействие происходит с нейтроном, входящим в состав дейтрона, а протон дейтрона находится на относительно большом расстоянии (более r_S или, по крайней мере, бóльшем, чем расстояние между нуклонами в тритоне) от ядра трития. Если удельная энергия связи двух спаренных нейтронов в тритоне относительно велика, в связи с чем тритий не испускает нейтрон из основного состояния, то энергия связи протона, входящего в состав тритона, гораздо меньше и протон легко выбивается из ядра при прямом ядерном взаимодействии с нейтроном дейтерия или с протоном при гораздо более высоких энергиях. В отсутствие протона спаренные нейтроны распадаются на два не связанных нейтрона.

Если тритон вступает в прямое ядерное взаимодействие с протоном дейтерия, то даже при большой кинетической энергии (200...300 кэВ) относительного сближения ядер D и T вероятность образования дважды магического ядра ${}^4_2\text{He}^2$ в выходном канале реакции велика. При

дальнейшем повышении энергии в выходном канале могут доминировать несвязанные в ядра нуклоны и легкие ядра дейтерия. Однако такие процессы не представляют практического интереса для получения энергии, поскольку энерговыделение максимально, если в выходном канале реакции присутствуют дважды магические ядра, в данном случае ${}^4_2\text{He}^2$.

Выводы. На основе анализа экспериментальных данных по реакциям синтеза и свойствам ядер ${}^5\text{He}$, полученных разными авторами [15, 16], предложен механизм реализации реакции D–T-синтеза с образованием составного ядра (при энергии взаимного сближения дейтрона и тритона ~ 100 кэВ), который формально можно считать промежуточным между прямым ядерным взаимодействием и механизмом образования составного ядра, предложенным Н. Бором. (Формально, поскольку ядро ${}^5\text{He}$ также формально не существует, хотя и существует реально в течение времени 10^{-21} с [15].) Во всяком случае, это не прямое взаимодействие. Реакция реализуется через образование составного ядра, но не описывается механизмом, предложенным Н. Бором. При этом время реакции характерно для прямых ядерных взаимодействий, а последовательность событий характерна для реакций с образованием составного ядра: образование реального, не виртуального, составного ядра, хотя формально не существующего, быстро распадающегося за время, немного превышающее τ_S , на ${}^4_2\text{He}$ и нейтрон. Механизм и энергетическая зависимость сечения характерны для ядерных реакций, реализующихся через образование составного ядра с его распадом из автоионизационного возбужденного состояния.

Прямые ядерные взаимодействия дейтрона и тритона также несколько отличаются от классических, поскольку во взаимодействии D–T так или иначе участвуют все нуклоны сталкивающихся ядер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г и н з б у р г В. Л. О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о “физическом минимуме” на начало XXI века / Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – № 11. – С. 1240–1255.
2. Г и н з б у р г В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными? / Успехи физических наук. – 1971. – Т. 103. – Вып. 1. – С. 87–119.
3. C e l e b r a t i n g fifty years of fusion entering into the burning plasma era / 22nd IAEA Fusion Energy Conference. 13–18 October 2008. Geneva, Switzerland. Book of Abstracts. – 273 p. (<http://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/Announcements.asp?ConfID=165>.)
4. 14th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-14) / 10–11 September 2009. Sapporo, Japan. (<http://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/Announcements.asp?ConfID=39073>)

5. 23rd IAEA Fusion Energy Conference / 11–16 October 2010. Daejeon, Republic of Korea. Book of Abstracts. – 603 p. (<http://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/Announcements.asp?ConfID=38091>)
6. I T E R Physics Basis // Nuclear Fusion. – 1999. – V. 39. – No. 12.
7. P r o g r e s s in the ITER Physics Basis // Nuclear Fusion. – 2007. – V. 47. – No. 6.
8. J E T: Progress in performance and understanding / The JET Team 1991 (Presented by M. Keilhacker, 18-th European Physical Society Plasma Physics Division Conference 3–7 June 1991) // Plasma Physics and Controlled Fusion. – V. 33. No. 13. – P. 1453–1478. (<http://iopscience.iop.org/0741-3335/33/13/002>).
9. I C R F heating of TFTR deuterium supershot plasmas in the ^3He minority regime / G. Taylor, J.R.Wilson, R.C.Goldfinger, et. al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. – V. 36. No. 3. – P. 523–542.
10. Ф и з и ч е с к а я энциклопедия / Гл. ред. А.М.Прохоров. В 5 т. Т. 5. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. – С. 107.
11. Я д е р н а я физика в Интернете. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ при поддержке НИИЯФ МГУ (<http://nuclphys.sinp.msu.ru>).
12. М у х и н К. Н. Экспериментальная ядерная физика: Учеб. для вузов. В 2 кн. Кн.1. Физика атомного ядра. Ч. II. Ядерные взаимодействия. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
13. О к у н е в В. С. Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов: Учеб. пособие / Под ред. Солонина В.И. Сер. Физика в техническом университете. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – 464 с.
14. М о т т е л ь с о н Б. Р. Элементарные виды возбуждения в ядрах // Успехи физических наук. – 1976. – Т. 120. – Вып. 4. – С. 563–580.
15. T h e NUBASE evaluation of nuclear and decay properties / G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot. A.H. Wapstra // Nuclear Physics. A. 729. – 2003. – P. 3–128.
16. J E F - P C. Version 2.0. O.E.C.D. / NEA Data Bank/ 12, Bld des Iles, 92130 Issy-Les-Moulineaux. France. 1997.
17. А р т е м о в К., Д ж е л е п о в Б. Радиоактивные изотопы гелия // Успехи физических наук. – 1950. – Т. XLI. – Вып. 2. – С. 189–210.
18. Л у к ь я н о в С. Ю., К о в а л ь с к и й Н. Г. Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез. – М.: МИФИ, 1997. – 432 с.

Статья поступила в редакцию 20.06.2011

Вячеслав Сергеевич Окунев родился в 1965 г., окончил МИФИ в 1988 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 130 научных работ и одной монографии в области исследования операций, вариационных методов, оптимизации характеристик безопасности ядерных реакторов, ядерной физики низких энергий.

V.S. Okunev (b. 1965) graduated from the Moscow Engineering and Physical Institute in 1988. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman State Technical University. Author of 130 publications and a monograph in the field of study of operations, variational methods, optimization of safety characteristics of nuclear reactors, nuclear physics of low energies.

