

УДК 621.039

О ПРОЦЕССАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕАКЦИЯХ СИНТЕЗА

Котов В.М.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Работа посвящена проблемам физики реакций синтеза легких элементов. В этой области важную роль играют экспериментальные данные и создаваемые на их основе модели процессов взаимодействия ядер. Накоплены достаточно точные экспериментальные данные о сечениях взаимодействия, получены аппроксимационные формулы, описывающие зависимости сечений ряда реакций от энергии столкновения ядер. Однако, создание моделей детально описывающих протекание реакций сталкивается с такими трудностями, как сложности описания задач со многими переменными, сложности получения надежных экспериментальных данных в масштабах ядерных взаимодействий. В настоящей работе сделана попытка описания процессов синтеза в реакциях $D-D$, $D-T$, $D-^3He$, $T-T$ и $^3He-^3He$ на основе возможности разделения взаимодействующих ядер на квазисвободные фрагменты. Выявлены три ведущие фрагмента в этих реакциях. Расчеты сечений на основании этих представлений дали интересные результаты. Определены области действия ядерных сил в этих реакциях.

ВВЕДЕНИЕ

Современная физика процессов ядерных взаимодействий основывается на квантово-механических представлениях, развитых, в основном, на исследованиях атомных процессов. Исследования ядерных процессов существенно сложнее, чем атомных. Это обусловлено как меньшими размерами действующих лиц, так и сложностями описания взаимодействия многих частиц, особенно в тяжелых ядрах.

За десятилетия исследований накоплен обширный материал, для понимания которого зачастую приходится использовать упрощенные модели, имеющие свои особенности и допустимые области применения. В любом случае эти модели не оспаривают основы квантово-механических представлений, среди которых – идентичность свойств нейтрона и протона в ядерных взаимодействиях, соблюдение принципа неопределенности Гейзенберга и т.п. Наиболее известна капельная модель, которая в целом не оперирует математикой квантовой механики. На основе капельной модели и представления о возможности существования в течение малых промежутков времени некоторых нестабильных связей, была построена модель «фрагментарных» состояний для расчета характеристик спонтанного деления тяжелых ядер [1].

В реакциях синтеза, где количество взаимодействующих нуклонов невелико, использование капельной модели нерационально. Однако, представление о разделении взаимодействующих ядер на фрагменты может быть полезным. Рассмотрим эти модели подробнее.

1 МОДЕЛЬ СПОНТАННОГО ДЕЛЕНИЯ

В модели считается, что в ядре постоянно происходит его преобразование из «основного» состояния с массой A и зарядом z в различные фрагменты. В общем случае возможность многократных обратимых преобразований нуклонов в ядре в ходе обменных операций можно записать в виде уравнения, в котором каждое ядро, внешне наблюдаемое как ядро с весом A и зарядом z , может рассматриваться как постоянно меняющийся набор фрагментов:

$$A, z = \Psi_{0,0}(A, z) + \Psi_{1,0}(A-1, z+n) + \Psi_{1,1}(A-1, z-1+p, n) + \Psi_{A/2, z/2}(A/2, Z/2 + A/2, z/2), \quad (1)$$

где: $\Psi_{i,j}$ – вероятность состояния ядра с фрагментами, у которых масса большего фрагмента близка к $A-i$, а заряд меньшего равен j , p – протон, n – нейтрон;

Для каждого из состояний уравнения (1) выполняется действие этого уравнения. Фрагменты любого из состояний i,j взаимодействуют между собой, а фрагменты различных состояний существуют в разные отрезки времени.

Проведенные на основе капельной модели расчеты по формуле (1) периодов спонтанного деления тяжелых ядер показали хорошее согласие с экспериментальными данными (рисунок 1, [1]) для выбранных, общих для данных нуклидов, эмпирических коэффициентов. Подбор этих коэффициентов для отдельных нуклидов может прояснить особенности фрагментарных состояний, определяющих спонтанное деление.

На рисунке индекс после обозначения нуклида означает: E – эксперимент, R – расчет.

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА

Проявление фрагментарных состояний в процессах спонтанного распада тяжелых ядер и в реакциях синтеза различное. Если в тяжелых ядрах проявляется вероятность появления тех или иных фрагментов в ходе длительных процессов взаимодействия нуклонов, то в ходе реакции синтеза время очень маленькое, на уровне 10^{-22} секунды.

В реакциях синтеза происходит деформация взаимодействующих ядер, в ходе которой продукты реакции образуются из вероятных фрагментов с высокой энергией связи нуклонов.

Характеристики реакций синтеза, рассматриваемых в настоящей работе, представлены в таблице 1. В таблице 2 приведены характеристики ядер реакций синтеза.

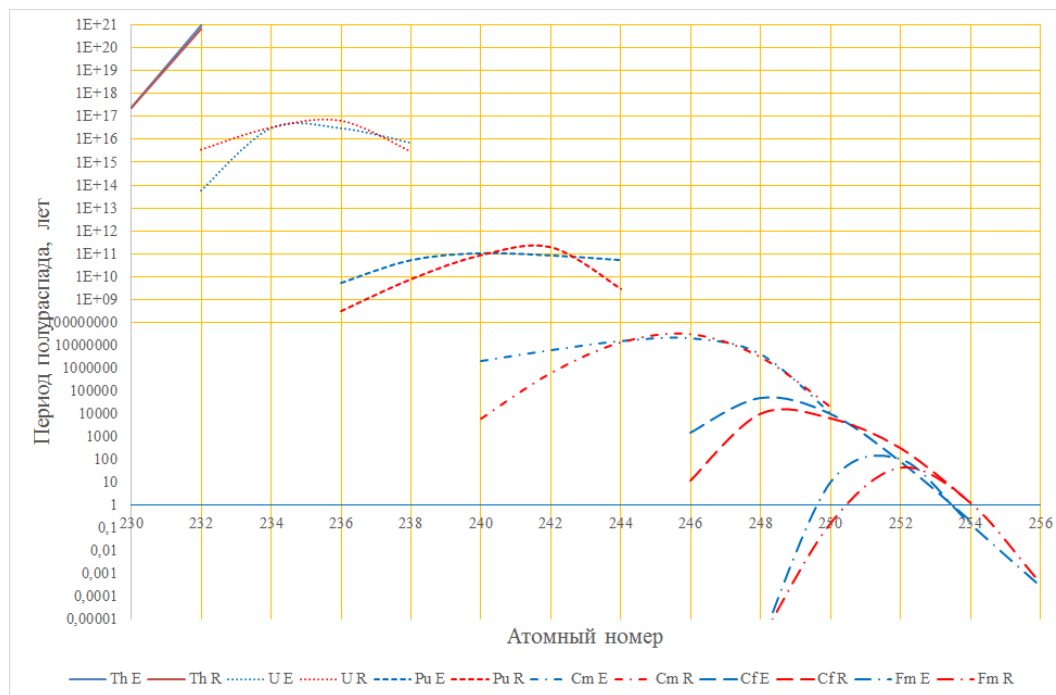


Рисунок 1. Сравнение расчетных и экспериментальных периодов спонтанного деления

Таблица 1. Характеристики реакций синтеза

№	Исходные ядра	Продукты реакции, энергия МэВ		ΣE , МэВ	L max, 10^{-13} см
1	D + D	T – 1,01	p – 3,02	4,03	6,5
2		^3He – 0,82	n – 2,45	3,27	
3	D + T	^4He – 3,5	n – 14,1	17,6	12,2
4	D + ^3He	^4He – 3,6	p – 14,7	18,3	
5	T + T	^4He	2 n – 11,3	11,3	4,78
6	^3He + ^3He	^4He	2 p, γ – 12,85	12,85	

Таблица 2. Характеристики нуклонов и ядер

№	Нуклон, ядро	m, MeV	Esv, MeV	Esv/n, MeV	R ядра, 10^{-13} см
0	n	0,511			1,24–1,35
1	^1H	1836,15152	0	0	
2	^2H	3673,596	2,2	1,1	1,56–1,7
3	^3H	5511,042	8,5	2,83	1,88–2,05
4	^3He	5509,748	7,7	2,57	
5	^4He	7347,193	28,3	7,08	1,97–2,14

Для реакций синтеза важно знать область действия ядерных сил. По современным понятиям эта область ограничена сферой с радиусом, называемым радиусом ядра, определяемым для каждого ядра формулой:

$$R = K \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ см}, \quad (2)$$

где: A – количество нуклонов в ядре; K = 1,24 по [2] или 1,35 по [3].

Попробуем уточнить область действия ядерных сил на основании некоторых экспериментальных данных.

3 СОПРЯЖЕНИЕ ЯДЕРНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Различие области действия ядерных и электромагнитных сил объясняется свойствами частиц, участвующих в обменных процессах. В ядерных взаимодействиях это π -мезоны, в электромагнитных – фотоны. π -мезон имеет массу отличную от нуля, масса фотона близка к нулю. В соответствии с соотношением неопределенности Гейзенберга время обмена нуклонов π -мезонами не может превышать величины, определяемой выражением:

$$dE \cdot dt \geq h, \quad (3)$$

где $dE = m_\pi \cdot c^2$ – энергия покоя π -мезона.

Расстояние, на которое может переместиться π -мезон за время dt, двигаясь со скоростью света, составляет $L = h \cdot c / (m_\pi \cdot c^2) = 1,2 \cdot 10^{-13}$ см. Для нулевой массы фотона время обмена и расстояние взаимодействия не ограничены.

Рассмотрим случай ядерных реакций синтеза 1 и 2 таблицы 1 с ядрами дейтерия.

В первой из этих реакций конечными продуктами являются тритий и протон. Начальное расстояние при движении протона, освободившегося от ядерных сил, на основе электростатического взаимодействия протона с ядром трития, можно рассчитать по формуле:

$$L = q^2 / 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot Q, \quad (4)$$

где: q – заряд протона и трития; ϵ – электрическая постоянная; Q – работа электрических сил, совершенная при выходе протона.

Расстояние между протоном и тритием составит $1,22 \cdot 10^{-13}$ см, что существенно меньше радиуса три-

тия. В ходе начального движения протона и трития формула (4) не будет действовать, так как заряды трития и протона распределены в их объемах, и сила отталкивания во время соприкосновения нуклонов, и общая энергия будут много меньшими. Необходимое расстояние для действия формулы (4) будет большим 3,12–3,4. Это говорит о необходимости учета ядерных сил при разделении продуктов реакции.

На этом можно и остановиться, оставив вне поля зрения момент прекращения действия ядерных сил и начальное расстояние между протоном и тритием с это время. Математика квантово-механических расчетов пока не дает этой информации.

Однако, эту информацию можно получить на основе экспериментальных данных таблицы 1 с использованием представления о равенстве свойств протона и нейтрона в ядерных взаимодействиях. В таком случае, ядерные реакции 1 и 2 идентичны. В каждой из них три нуклона отделяются от одного нуклона, причем, если не с абсолютно равными, то с близкими выделяемыми энергиями. Следовательно, на момент прекращения ядерного взаимодействия, получаемые ими энергии будут равны.

Эти энергии, можно рассчитать по данным реакции 2, в которой нейтрон является электрически нейтральной частицей. Избыток энергии протона в реакции 1 получается в ходе электрического отталкивания его от трития после завершения ядерного взаимодействия. Тогда и расстояние разрыва ядерных сил можно получить по формуле (4), принимая в ней энергию протона, равной разнице энергий протона и нейтрона в реакциях 1 и 2. Расстояние разрыва ядерных сил в этих реакциях получается равным $6,5 \cdot 10^{-13}$ см. Данное расстояние примерно в 2 раза больше расстояния, на котором обеспечивается контакт продуктов реакции по формуле (2).

Среди реакций синтеза есть еще сопряженные пары реакций, в которых можно рассчитать расстояние разрыва ядерных сил – это реакции 3 и 4, а также реакции 5 и 6 таблицы 1. Отличиями в данных реакциях являются больший заряд ядра, от которого отталкиваются протоны и большие энергии, получаемые протонами и нейтронами.

Расстояние разрыва ядерных сил для реакций **D–T** и **D–³He** равно $12,2 \cdot 10^{-13}$ см, что в ~4 раза больше оценок по формуле (2).

Для реакций **T–T** и **³He–³He** расстояние разрыва ядерных сил равно $4,78 \cdot 10^{-13}$ см. Это расстояние – минимальное среди приводимых реакций. Возможно, оно связано с симметрией разлета протонов и нейтронов в этих реакциях.

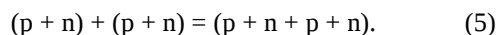
В любом случае полученные данные о расстояниях между продуктами реакции синтеза на момент прекращения ядерных сил говорят о неточности понимания взаимодействующих продуктов, как сферических ядер с фиксируемыми радиусами, определяемыми по [2, 3].

4 ФРАГМЕНТЫ В РЕАКЦИЯХ СИНТЕЗА

Реакции синтеза проходят в результате столкновения двух ядер с достаточно высокой энергией. Энергия столкновения способствует преодолению барьера, обусловленного электрическими силами двух одноименных зарядов. Можно полагать, что в ходе столкновения происходит деформация ядер исходных продуктов. Деформация обеспечивает то или иное разделение ядер на короткое время на фрагменты. В дальнейшем рассмотрим в качестве составляющих ядер нейтроны и протоны. Начнем с реакций 1 и 2 взаимодействия **D–D**.

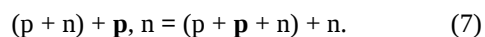
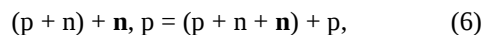
Реакции D–D

В ходе прямого взаимодействия ядер дейтерия можно было бы ожидать образование **⁴He**:



Однако эксперименты говорят о малой вероятности такой реакции. Причиной тому – высокий кулоновский барьер.

Более вероятен процесс в котором, по крайней мере в одном из ядер дейтерия возможно образование квазисвободного состояния нуклонов. При этом становится возможным прохождение двух реакций:

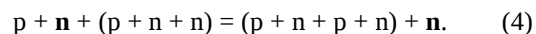


Эти реакции имеют близкую вероятность прохождения. Среднее отношение сечения реакции (7) к сечению реакции (6) в диапазоне энергий столкновения до 2 МэВ по [4, 5] составляет ~12%, при оцененной ошибке каждого сечения до 10%.

Реакции D–T

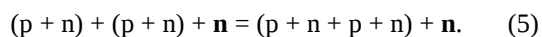
Следует рассмотреть несколько вариантов этой реакции:

1 вариант – фрагментация дейтерия:



В ходе реакции образуются экспериментально подтверждаемые нуклиды. При такой фрагментации соединение трития с нейтроном (при отсутствии кулоновского барьера приводит к быстрораспадающемуся ядру).

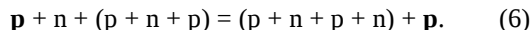
2 вариант – фрагментация ядер трития:



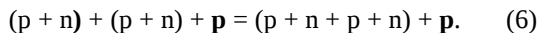
В ходе реакции образуются экспериментально подтверждаемые нуклиды. Возможно, что максимальное сечение реакции в сравнении с другими реакциями синтеза объясняется наличием этих двух каналов. Присутствие квазисвободного нейтрона делает возможным реакцию (5). Полу-разорванные связи нейтрона с фрагментом (p+n) обеспечивают связь фрагмента (p+n) с ядром дейтерия (сравнить с реакцией по формуле (5)). Возможно, что высокая вероятность фрагментации трития связана с его радиоактивностью.

Реакции D–³He

В ходе взаимодействия более вероятно разделение дейтерия на фракции, т.к. энергия связи нуклонов в нем меньше, чем в ³He. Взаимодействие ³He с нейтроном приводит к образованию ⁴He с высокой энергией связи нуклонов:



Возможна реакция с фрагментацией гелия-3:

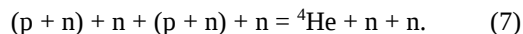


Как и для реакции (5) слияние фрагментов (p+n) проходит под действием квазисвободного протона.

В ходе обеих реакций образуются экспериментально подтверждаемые нуклиды. Образование в рамках фрагментарной модели быстрораспадающегося ядра ⁵Li из нефрагментированных ядер так же маловероятно, как и реакции (5), по тем же причинам.

Реакции T–T

Реакция проходит с фрагментацией обоих ядер трития:

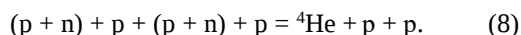


Необходимость фрагментации обоих ядер трития обуславливает ее меньшую вероятность, чем реакции D–T. Казалось бы, что высокая фрагментация ядер трития в данном случае должна бы увеличить вероятность реакции. Но здесь оказывает влияние необходимость одновременной фрагментации двух ядер трития, каждая из которых меньше единицы.

Реакция взаимодействия одного фрагментированного ядра возможна, но она приводит к образованию быстрораспадающегося ⁵He.

Реакции ³He+³He

Как и в варианте реакций T–T реализуется реакция, в которой каждое ядро ³He разделяется на фрагменты:



Реакция взаимодействия одного фрагментированного ядра с другим «полным» ядром возможна, но она приводит к образованию быстрораспадающегося ⁵Li.

5 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ФРАГМЕНТАЦИИ

Расчет относительных вероятностей фрагментации ядер – участников реакций синтеза проводился на основании следующих уравнений, связывающих расчетные значения сечений с вероятностями фрагментарных состояний:

- реакция D–D, первая: $\sigma_1 = F \cdot P_1 \cdot Y$;
- реакция D–D, вторая: $\sigma_2 = F \cdot P_1$;
- реакция D–T: $\sigma_3 = F \cdot (P_1 + P_2)$;
- реакция D–³He: $\sigma_4 = F \cdot (P_1 + P_3)$;
- реакция T–T: $\sigma_5 = F \cdot P_2^2$;
- реакция ³He–³He: $\sigma_6 = F \cdot P_3^2$

где: Y – фактор, учитывающий различие сечений взаимодействия реакций 1 и 2; F – согласующий множитель.

Расчет сечений реакций проводился по данным [5]. В расчетах принято значение $F = 100$ для получения вероятностей фрагментаций меньшими единицы. Проверка при $F = 10$ показала близкую зависимость параметров от энергии столкновения. На рисунке 2 показаны зависимости параметров P1, P2, P3, P12 и P13 от энергии столкновения исходных ядер. Для лучшей представительности результатов в области малых энергий столкновения, ось энергии столкновения трансформирована в ось приведенной скорости, со значениями, равными квадратному корню от энергии столкновения, выраженной в кэВ.

Анализ данных рисунка 2 показывает:

При энергии столкновения 10 кэВ (приведенная скорость ~3) вероятности фрагментации P3 и P13 в реакциях ³He–³He и D–³He близки к нулю.

До энергии столкновения ядер 100 кэВ (приведенная скорость 10) минимальная вероятность фрагментации P3 наблюдается в реакции ³He–³He.

Наибольшая вероятность фрагментации P2 и P12 в диапазоне энергий до 1160 кэВ (приведенная скорость 34) наблюдается в реакциях T–T и D–T. В диапазоне энергий 25–169 кэВ (приведенные скорости 5–13) наблюдается максимум вероятности фрагментации P12 (реакция D–T).

При энергии столкновения более 1160 кэВ максимальная фрагментация имеется в реакции ³He–³He.

Большая фрагментация трития, чем фрагментация гелия-3, наблюдаемая до энергии 1160 кэВ может быть объяснена радиоактивностью трития, а большая фрагментация гелия-3, чем фрагментация трития при энергии более 1160 кэВ может быть объяснена влиянием меньшей энергии связи в ядре гелия-3, чем энергия связи в ядре трития.

С ростом энергии столкновения в реакциях D–T и D–³He, выше энергий с максимальным сечением, снижается фрагментация трития и гелия-3. При энергии, близкой к 2 МэВ, фрагментации в этих реакциях приближаются к значениям, обусловленным фрагментацией дейтерия.

Данные о значениях фрагментации взаимодействующих ядер и области действия ядерных сил могут быть полезны при создании расчетной программы взаимодействия ядер в реакциях синтеза с математикой квантовой механики.

Для более точного определения параметров фрагментаций необходимо иметь экспериментальные данные зависимостей сечений реакций от энергии столкновения, в том числе сечений рассеивания и сечений образования короткоживущих ядер. Вызывает сомнение независимость конечных энерговыделений от энергии столкновения ядер, приводимая в известных источниках.

Уточнение параметров реакций может быть получено с использованием технологии встречных пучков ионов, например, подобной [6].

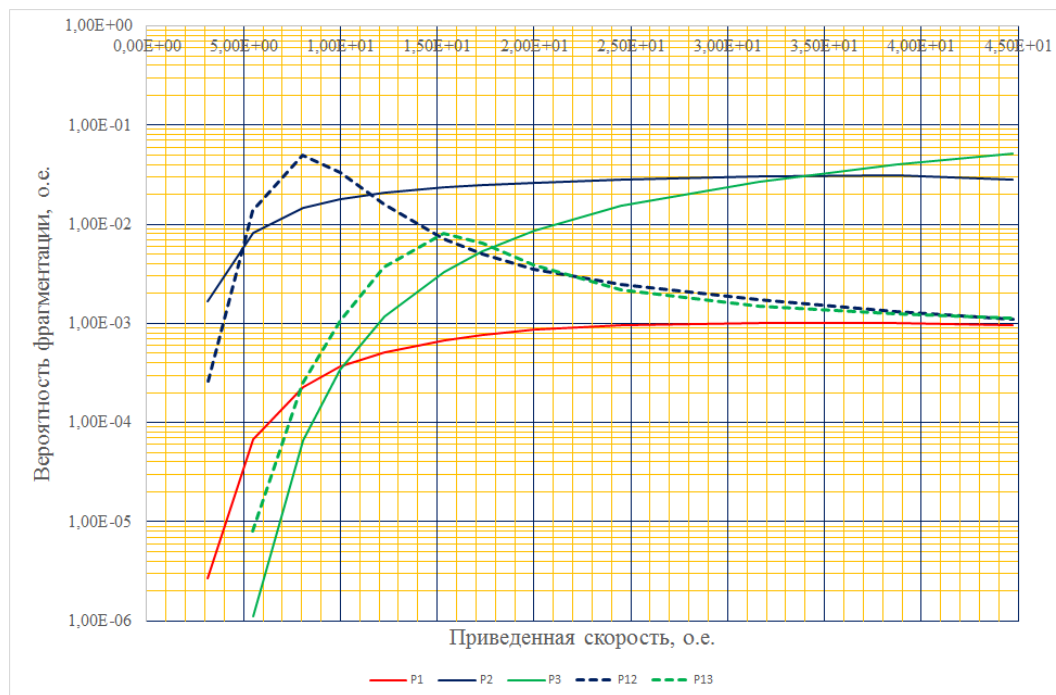


Рисунок 2. Влияние энергии столкновения на расчетные параметры реакций при $F=100$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определено максимальное расстояние действия ядерных сил в ходе ряда реакций синтеза легких ядер. Оно получилось существенно большим, чем сумма радиусов конечных продуктов реакций, определяемых по известным формулам.

На основе реакций $D-D$ показана причина малой вероятности прямого взаимодействия исходных ядер, показана возможность прохождения реакций двух типов с использованием фрагментации одного из исходных ядер.

Ход реакций синтеза в ходе взаимодействия пар $D-D$, $D-T$, $D-^3He$, $T-T$, $^3He+^3He$ может быть объяснен фрагментацией трех ядер – дейтерия, трития и гелия-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов В.М. Фрагментарная модель обменных взаимодействий. // Вестник НЯЦ РК, 2000 г. Вып.4, с. 134–137.
2. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. // М. «Наука», Главная редакция физико-математической литературы. 1980 г.
3. Стогов Ю.В. Основы нейтронной физики // Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008, 204 с.
4. Bosch H.-S., Hale G.M. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities // Nuclear Fusion 32, 4. 1992. P. 611–631; Erratum // Nuclear Fusion 33, 12. 1993. P. 1919.
5. С.В. Путвинский. Альфа-частицы в токамаке. // Вопросы теории плазмы: Сб. науч. ст. Вып. 18, Под. ред, Б.Б. Кадомцева. – М., Энергоатомиздат, 1990, с. 209–315.
6. Котов В.М., Котов С.В. Реакторы синтеза с использованием ускорителей ионов. // Вестник НЯЦ, 2019, вып. 4, с. 91–97.

Максимальные значения имеют вероятности фрагментации трития и гелия-3, минимальную – дейтерия.

Показана зависимость фрагментации от энергии столкновения исходных ядер.

Для совершенствования предложенной модели необходимо экспериментальное уточнение характеристик сечения реакций синтеза с учетом сечения «побочных» процессов, в том числе рассеивания и образования короткоживущих ядер.

Наиболее достоверные данные могут быть получены на основе установки со встречными пучками ускоренных ионов.

СИНТЕЗ РЕАКЦИЯСЫНДА ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУ ПРОЦЕССТЕРІ ТУРАЛЫ

В.М. Котов

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыс жеңіл элементтердің синтез реакциясының физика мәселесіне арналған. Осы салада маңызды рольды эксперименттік деректер және олардың негізінде құрылатын ядролардың өзара әрекеттесу процесстерінің модельдері ойнайды. Өзара әрекеттесу қималары туралы нақты жеткілікті деректер жиналған, ядролардың соғылысу энергиясынан реакция қатарының қимасының байланысын сипаттайтын аппроксимациялық формулалар алынды. Бірақ, реакциялардың өтуін толық сипаттайтын модельдерді жасау, ядролық өзара әрекеттесу масштабтарында сенімді эксперименттік деректерді алу күрделілігі, көптеген айнымалы міндеттерді сипаттау күрделілігі секілді, осындай қиындықтармен тап болады. Осы жұмыста квази еркін фрагменттерге өзара әрекеттесетін ядроларды бөлу мүмкіндігі негізінде $D-D$, $D-T$, $D-^3He$, $T-T$ и $^3He-^3He$ реакцияларда синтездің процесстерін сипаттау әрекеті жасалды. Осы реакцияларда үш жетекші фрагменттер белгіленді. Осы ұсыныстардың негізінде қималардың есептері қызықты нәтижелер берді. Осы реакцияларда ядролық күштердің әрекетінің салалары белгіленді.

ON INTERACTION PROCESSES IN SYNTHESIS REACTIONS

V.M. Kotov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper is devoted to the problems of synthesis reaction physics of light elements. In this area, experimental data and models of nuclei interaction processes created on their basis play an important role. Quite accurate experimental data on the interaction cross sections have been accumulated, approximation formulas have been obtained that describe dependences of the cross sections of a number of reactions on nuclear collision energy. However, creation of models that describe in detail the progress of reactions encounters such difficulties as complexity to describe problems with many variables, difficulties of obtaining reliable experimental data on the scale of nuclear interactions. This paper provides an attempt to describe the synthesis processes in the $D-D$, $D-T$, $D-^3He$, $T-T$ и $^3He-^3He$ reactions based on the possibility to separate interacting nuclei into quasi-free fragments. Three leading fragments in these reactions were revealed. The calculations of the cross sections based on these representations gave interesting results. Areas of action of nuclear forces in these reactions were determined.