

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

NEW SIGHT ON A PROBLEM OF NUCLEAR SYNTHESIS

Аннотация. Трудности решения проблемы управляемого термоядерного синтеза связаны с недостаточными знаниями об устройстве ядра и механизме образования энергии в ядерной реакции. В ядерных реакциях количество нуклонов и их масса остаются постоянными. Это означает, что энергия реакции зависит от группировки нуклонов до реакции и после. Следовательно, она зависит от внутренней потенциальной энергии ядра, которая преобразуется в кинетическую энергию продуктов реакции, а не от превращения массы в энергию.

В обычных реакторах на основе деления тяжелых ядер используется природное топливо. Для термоядерного реактора такого естественного топлива не существует. Топливо необходимо получать в самом реакторе непосредственно перед его использованием. Предполагается, что количество энергии, полученной в термоядерном реакторе, будет превышать энергию, затраченную для изготовления топлива. Это положение недостаточно обосновано теоретически и не подтверждено экспериментально. В природных процессах синтез ядер дейтерия и трития происходит в других условиях, чем в экспериментальных устройствах термоядерного синтеза. Вероятно, создание термоядерного реактора будет закончено на стадии создания демонстрационного образца.

Annotation. The incomplete knowledge of atomic nucleus organization and energy formation procedure in nuclear reaction causes difficulties in problem solution of the controlled thermonuclear fusion. The quantity of nucleons and their mass remains constant in nuclear reactions. This means the reaction energy depends on nucleons grouping before the reaction and afterwards. Therefore, it depends on internal potential nucleus energy, which transforms in kinetic energy of reaction products, and not on mass formation in energy.

In ordinary reactors based on heavy nucleus fission the natural fuel is used. But there is no such fuel for nuclear-fusion reactor. The fuel must be produced in reactor itself just before using. It is supposed that the energy amount obtained in nuclear-fusion reactor will exceed the energy spent for fuel production. This theory has not been sufficiently proved and experimentally verified. In natural processes nuclear fusion of deuteron and tritium occurs at other conditions than in experimental devices of thermonuclear fusion. Most likely the creation of thermonuclear reaction will be finished at the stage of the demonstration model making.

Ключевые слова. Ядерный синтез, реактор, дефект массы, энергия, ядерные частицы, механизм выделения энергии.

Key words. Nuclear synthesis, reactor, defect of weight, energy, nuclear particles, the mechanism of allocation of energy.

Трудности решения проблемы управляемого термоядерного синтеза связаны с недостаточными знаниями об устройстве ядра и механизме образования энергии в ядерной реакции. В ядерных реакциях количество нуклонов и их масса остаются постоянными. Это означает, что энергия реакции зависит от группировки нуклонов до реакции и после. Следовательно, она зависит от внутренней потенциальной энергии ядра, которая преобразуется в кинетическую энергию продуктов реакции, а не от превращения массы в энергию.

В обычных реакторах на основе деления тяжелых ядер используется природное топливо. Для термоядерно-

го реактора такого естественного топлива не существует. Топливо необходимо получать в самом реакторе непосредственно перед его использованием. Предполагается, что количество энергии, полученной в термоядерном реакторе, будет превышать энергию, затраченную для изготовления топлива. Это положение недостаточно обосновано теоретически и не подтверждено экспериментально. В природных процессах синтез ядер дейтерия и трития происходит в других условиях, чем в экспериментальных устройствах термоядерного синтеза. Вероятно, создание термоядерного реактора будет закончено на стадии создания демонстрационного образца.

Серга Эдуард Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник ГУП «НТЦ ОК «Компас», тел. 515–26–93.

Serga Edward Vasilyevich – the candidate of technical sciences, the senior research scientist, the senior research scientist of the State unitary enterprise “The Scientific and Technical centre “Compass”, tel. 515–26–93.

Введение

Многолетние безуспешные попытки создать действующий ядерный реактор на основе синтеза ядер дейтерия и трития путем сжатия нагретой плазмы вызывают сомнения в правильности выбранного пути и, что не менее важно, в возможности создания эффективного промышленного термоядерного реактора в обозримом будущем. В 2006 г. специалисты многих стран объединились в рамках международного проекта по созданию термоядерного реактора (программа ITER). Согласно прогнозам, на решение проблемы потребуется несколько десятилетий. Прежние прогнозы во второй половине XX века были более оптимистичными. На первом этапе планируется создание демонстрационного образца, на котором будут отрабатываться принципы работы будущего промышленного реактора.

Как показывает опыт, проблема имеет не технический характер, и нет гарантии, что объединение усилий специалистов разных стран позволит решить проблему, если не будут найдены ответы на некоторые теоретические вопросы ядерной физики.

Принципиальное отличие термоядерного реактора от реактора на основе деления тяжелых ядер

Принципиальное отличие реакторов двух типов состоит в том, что в реакторе на основе деления тяжелых ядер используется природное топливо и процесс горения, однажды начавшись, может продолжаться до полного выгорания ядерного топлива. В создаваемом термоядерном реакторе топливо получают непосредственно перед его использованием. При этом процессы получения топлива и его сжигания неразрывно связаны во времени (идут практически одновременно).

В ядерной энергетике сложилось приближенное представление о механизме выделения энергии в процессе деления тяжелых ядер. Так, например, нет ответа на вопрос, почему редкий изотоп урана $^{235}\text{U}_{92}$ может делиться на осколочные ядра под действием нейтронов очень низкой энергии, а другой распространенный изотоп $^{238}\text{U}_{92}$ этим качеством не обладает. Однако недостаточные знания о механизме выделения энергии при делении ядер урана (и некоторых других тяжелых ядер) не стали большим препятствием при создании ядерных реакторов, так как при этом использовалось природное топливо. Первый ядерный котел заработал в США всего через четыре года после открытия спонтанного деления урана в 1938 г. (О. Ганн и Ф. Штрассманн).

Для получения топлива в термоядерном реакторе в виде рабочей смеси ядер дейтерия и трития требуется затратить энергию, при которой должно произойти сближение и слияние этих ядер. Для эффективной работы реактора необходимо выполнение двух условий:

- во-первых, чтобы получаемая энергия была больше потребляемой;
- во-вторых, чтобы процесс был достаточно хорошо управляемым.

Слияние ядер дейтерия (d) и трития (t), которое пытаются осуществить, должно привести к образованию ядра гелия (α) и выделению энергии. Реакцию обычно пишут в таком виде



где ΔE – энергия, выделяемая в одном акте слияния ядер дейтерия и трития.

Для осуществления реакции взаимодействующим ядрам необходимо сообщить кинетическую энергию, необходимую для преодоления кулоновских сил отталкивания. Это пытаются осуществить в полностью ионизованной плазме, нагретой до температуры порядка 10^8 К. Таким образом, если учитывать энергию, необходимую для инициирования слияния ядер d и t ($E_{\text{ин}}$), т.е. более правильной была бы такая запись реакции



Тогда первое условие эффективной работы реактора определяется соотношением

$$\Delta E > E_{\text{ин}} \quad \text{или} \quad Q = \Delta E / E_{\text{ин}} > 1. \quad (3)$$

Помимо токамаков и других ловушек, рассматривались также другие схемы термоядерного синтеза. Предполагалось, что с использованием метода лазерного сжатия в 1982-1985 гг. удастся осуществить демонстрационный эксперимент, в котором тепловой выход термоядерной энергии равен энергии, затраченной на нагрев [1].

Величину ΔE определяют на основании соотношения Эйнштейна

$$\Delta E = \Delta mc^2, \quad (4)$$

где Δm – дефект массы, определяемый как разность между массой начальных и конечных продуктов реакции (в нашем случае $\Delta E = 17,6$ МэВ). Однако между дефектом массы и выделяемой энергией в ядерной реакции нет определенной зависимости, как это следует из соотношения Эйнштейна. Этот вопрос будет рассмотрен в дальнейшем.

Величина $E_{\text{ин}}$ пока неизвестна, так как даже в лабораторных условиях осуществить стационарную управляемую термоядерную реакцию пока не удастся. Основная трудность – удержание высокотемпературной и достаточно плотной плазмы в рабочем объеме реактора. Возможно, разработчикам когда-то удастся решить эту проблему

и термоядерный реактор заработает. Но будет ли при этом выполняться соотношение (3), неизвестно.

О механизме образования энергии в ядерных реакциях

Одной из главных характеристик атомных ядер принято считать энергию связи $E_{св}$, которая, согласно современным представлениям, обусловлена дефектом массы Δm в силу сформулированного Эйнштейном принципа эквивалентности массы и энергии. Однако вопрос о зависимости энергии связи ядра и его дефекта массы весьма запутан.

Определяемая экспериментально масса ядра m меньше суммарной массы составляющих ядро нуклонов. В справочных таблицах дается значение дефекта массы Δm как разницы между массой ядра m и массовым числом A : $\Delta m = (m - A)$. Дается также графическая зависимость величины удельной энергии связи для ядер различных химических элементов: $E_{уд} = E_{св}/A$ (энергии связи, приходящейся на один нуклон) как функции от A : $E_{уд} = f(A)$. Однако эта зависимость не имеет определенной связи с соотношением Эйнштейна (4). Она растет до $A < 50$ и убывает после $A > 60$. Особенно явно отсутствие связи $E_{уд}$ с соотношением Эйнштейна проявляется при рассмотрении изотопов одних и тех же элементов.

Если разница между массой начальных и конечных продуктов ядерной реакции положительна, то этот эффект в современной физике объясняют превращением массы в энергию. В частности, в реакции (1), которую пытаются осуществить в термоядерном реакторе, выделяемая энергия в одном акте слияния ядер дейтерия и трития определяется согласно соотношению Эйнштейна – формула (4). Однако в ядерных реакциях количество нуклонов, следовательно, и их суммарная масса остаются неизменными (A и Z сохраняются). Отсюда следует, что изменение массы связано не с превращением какой-то части массы нуклонов в энергию, а с тем, как они сгруппированы в ядра до начала реакции и после ее окончания. От того, как сгруппированы нуклоны внутри ядра, зависит потенциальная энергия, обусловленная кулоновскими силами взаимодействия заряженных частиц ядра. Рассмотрим изменение массы и выделяемую энергию при делении изотопа урана $^{235}\text{U}_{92}$. При попадании нейтрона в ядро изотопа урана $^{235}\text{U}_{92}$ могут наблюдаться реакции:

- 1) $^{235}\text{U}_{92} + ^1\text{n}_0 \rightarrow ^{145}\text{Ba}_{56}^* + ^{88}\text{Kr}_{36}^* + 3 \cdot ^1\text{n}_0$;
 - 2) $^{235}\text{U}_{92} + ^1\text{n}_0 \rightarrow ^{139}\text{Xe}_{54}^* + ^{95}\text{Sr}_{38}^* + 2 \cdot ^1\text{n}_0$;
 - 3) $^{235}\text{U}_{92} + ^1\text{n}_0 \rightarrow ^{145}\text{La}_{57}^* + ^{87}\text{Br}_{35}^* + 4 \cdot ^1\text{n}_0$.
- Символ * означает радиоактивность.

В табл.1 приведены значения энергии, соответствующие разнице масс начальных и конечных продуктов указанных реакций. Масса ядра $^{235}\text{U}_{92}$ составляет 235,89 а.е.м., 1 а.е.м.=931,5 МэВ.

Таблица 1

Энергия ΔE , эквивалентная изменению массы при делении ядра $^{235}\text{U}_{92}$

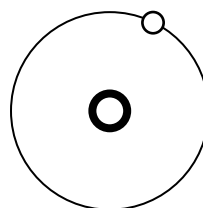
Реакция	Осколочные ядра	Массы ядер, а.е.м.	Энергия ΔE , МэВ
1	$^{145}\text{Ba}_{56} + ^{88}\text{Kr}_{36}$	145,57 + 88,28	11,33
2	$^{139}\text{Xe}_{54} + ^{95}\text{Sr}_{38}$	139,54 + 95,34	- 6,28
4	$^{145}\text{La}_{57} + ^{87}\text{Br}_{35}$	145,53 + 87,30	28,94

В одном акте деления ядра $^{235}\text{U}_{92}$ выделяется энергия ~ 200 МэВ. При этом кинетическая энергия осколочных ядер составляет ~ 165 МэВ. Итак, количество нуклонов и их масса в результате ядерных реакций остается неизменной, а изменение массы не соответствует энергетическому эффекту, определяемому соотношением Эйнштейна. Отсюда следует, что основной энергетический эффект обусловлен превращением внутренней потенциальной энергии ядра в кинетическую энергию продуктов реакции. Эта внутренняя энергия ядра образовалась в результате природных процессов.

Таким образом, современная физика не дает достаточно полного объяснения механизма образования энергии в результате ядерных реакций. Без понимания этого механизма попытки получить энергию в результате сжатия нагретой плазмы из смеси дейтерия и трития могут продолжаться еще много лет без реальных шансов на успех.

Нейтрон и дейтрон

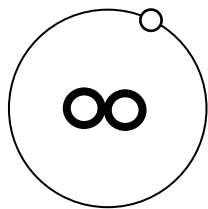
Для более глубокого понимания строения ядра необходимо разобраться с устройством нейтрона и дейтрона как простейшего составного ядра. В монографии [3] показано, что нейтрон не является элементарной частицей, как принято считать, а представляет собой связанную пару протон-электрон, т.е. является квантовой системой, в которой протон и электрон связаны силой взаимодействия электрических зарядов (см. рис. 1).



$m \leftrightarrow p \Gamma e$
 В центре нейтрона находится протон, на орбите – ядерный электрон (символ \leftrightarrow – означает тождественность, символ Γ – объединение)

Рис. 1. Структура нейтрона n как квантовой системы «протон – нейтрон»

Там же показано, что дейтрон состоит не из протона и нейтрона, а из двух протонов, образующих ядерную пару «протон-протон» (обозначение $p-p$), и одного ядерного электрона. Дейтрон подобен нейтрону; отличие состоит в том, что в центре системы вместо одного протона находится протонная пара $p-p$. Внешнее электромагнитное поле, образованное вращающимся относительно пары $p-p$ электроном, обеспечивает ее динамическую устойчивость. Отметим, что существование спаренных одинаковых частиц не вступает в противоречие с физикой микромира. Так, например, в теории сверхпроводимости известны так называемые куперовские пары, представляющие собой два спаренных электрона $e-e$. Таким образом, электроны входят в состав атомных ядер в составе нейтронов и дейтронов. Простейшее составное ядро – дейтрон можно представить как систему $p-p \cap e$. Электроны, входящие в состав ядра, будем называть ядерными электронами. Структура дейтрона дана на рис. 2.



$d \leftrightarrow p-p \cap e$
 В центре ядра пара из двух протонов $p-p$, ядерный электрон находится на внутренней орбите, атомный электрон (не показан) – на внешней орбите.

Рис. 2. Структура дейтрона как системы «протонная пара-электрон»

В статье [7] дано объяснение того, что масса нейтрона превышает суммарную массу составляющих его частиц – протона и электрона, а масса дейтрона меньше суммарной массы составляющих его частиц. Превышение массы нейтрона суммарной массы составляющих его частиц – это полевая добавка, обусловленная положительной энергией связи протона и электрона E_{pe} , равной половине положительной потенциальной энергии $1/2 U$.

Полевая добавка к массе дейтрона Δm_d имеет две составляющие $\Delta m_d = \Delta m_{pp} + \Delta m_{de}$.

Первая составляющая Δm_{pp} обусловлена отрицательной потенциальной энергией ядерной пары $p-p$, другая Δm_{de} – обусловлена положительной потенциальной

энергией связи пары $p-p$ и ядерного электрона. При этом $|\Delta m_{pp}| > |\Delta m_{de}|$, что объясняет отрицательное значение полевой добавки к массе дейтрона.

В работе [3] дано также объяснение того, что спин нейтрона равен $1/2 h$, как и у протона. Спин нейтрона J_n складывается из трёх составляющих: спина протона J_p , спина электрона J_e , орбитального момента L_e электрона. Три составляющих с полуцелым спином, две из которых имеют противоположный знак, дают в результате полуцелый спин $1/2 h$.

Количественные оценки показали, что дефект массы дейтрона Δm_d и радиус дейтрона R_d связаны между собой через выражения, определяющие потенциальную энергию ядерной пары $p-p$ и энергию связи системы $p-p \cap e$. При этом расстояние между электрическими полюсами пары $p-p$ кратно комптоновской длине волны протона ($l_{pp} = 2\lambda_{ph}$), а дефект массы ядерной пары определяется через постоянную тонкой структуры α и массу протона m_p . Таким образом, для этих составных частиц разница их массы и суммарной массы составляющих частиц может быть определена теоретически с использованием известных констант. При этом отпадает необходимость в гипотетических ядерных силах.

Состав и структура атомных ядер

Полученные результаты в части объяснения состава и структуры нейтрона и дейтрона позволяют определить общие принципы строения атомных ядер. Простейшие ядра, относящиеся к ядрам элементов I периода таблицы Менделеева (изотопов водорода и гелия), могут быть образованы из протона, нейтрона и дейтрона. Они получили название ядерных частиц, так как из них могут быть образованы ядра всех химических элементов [3]. Ядерных частиц всего шесть: ядра изотопов водорода – протон 1p_1 , дейтрон 2d_1 , тритон 3t_1 ; ядра изотопов гелия: гелион $^4\alpha_2$ (альфа-частица) и гелион-3 $^3\alpha_2$, а также нейтрон 1n_0 .

В табл.2 приведены основные характеристики ядерных частиц.

Таблица 2

Основные характеристики ядерных частиц

Частица	Масса, а.е.м.	Состав	Дефект массы Δm , а.е.м.	Дельта-масса δm , а.е.м.
Протон, p	1,0072765	p	0	0
Нейтрон, n	1,008665	p + e	$0,8399 \cdot 10^{-3}$	$0,8399 \cdot 10^{-3}$
Дейтрон, d	2,01355	2p + e	$-0,1841 \cdot 10^{-2}$	$-0,1002 \cdot 10^{-2}$
Тритон, t	3,0155	d + n	$-0,8557 \cdot 10^{-2}$	$-0,6715 \cdot 10^{-2}$
Гелион-3, $^3\alpha_2$	3,0143	d + p	$-0,7188 \cdot 10^{-2}$	$-0,5346 \cdot 10^{-2}$
Гелион, $^4\alpha_2$	4,00151	d + d	-0,026	-0,029

Концепция группирования нуклонов в более сложные частицы была выдвинута Л. Полингом [4]. В работе [3] эта концепция получила дальнейшее развитие.

**Физический смысл дефекта массы.
Понятие мангеля**

Энергия связи ядра как полная энергия включает в себя кинетическую и потенциальную энергию. Однако в соотношении Эйнштейна потенциальная энергия не присутствует, на что обратил внимание Бриллюэн [5]. Как он отмечает, вопрос о связи массы ядра с потенциальной энергией часто игнорировали, потому что не во всех задачах он представляется достаточно ясным. Потенциальная энергия может быть как положительной, так и отрицательной. Это относится и к массе, соответствующей потенциальной энергии.

Следовательно, влияние кулоновских сил отталкивания одноименно заряженных (положительно) частиц ядра и обусловленной ими энергии на величину дефекта массы не учитывается. Вопрос о связи потенциальной энергии с дефектом массы ядра имеет принципиальное значение. Частицы ядра, между которыми действуют кулоновские силы, образуют поле, которое обладает энергией и соответственно массой. Согласно теореме вириала, для системы взаимодействующих частиц с потенциалом $U \sim 1/r$ средняя кинетическая энергия W равна половине потенциальной энергии с обратным знаком [6]. Следовательно, полная энергия равна половине потенциальной энергии: $E = 1/2 U$. Тогда полевая добавка δm к массе системы двух заряженных частиц будет равна

$$\delta m = 1/2 U/c^2; \quad (U = e_1 e_2 / \epsilon l), \quad (5)$$

где e_1 и e_2 – заряды частиц; $1/\epsilon$ – константа связи; l – расстояние между частицами.

Знак потенциальной энергии зависит от полярности зарядов. Для частиц с зарядами одинаковой полярности кулоновские силы будут силами отталкивания, а для частиц с зарядами различной полярности – силами притяжения. Положительной полной энергии системы соответствует положительная полевая добавка к массе δm , а отрицательной полной энергии системы – отрицательная полевая добавка. Величину δm , определяемую соотношением (5), будем называть мангелем (от нем. Mangel – недостаток). Понятие мангеля имеет вполне определенный физический смысл: это полевая добавка к массе ядра, эквивалентная его полной энергии, как суммы кинетической и потенциальной энергий. Отрицательное значение мангеля объясняет наличие дефекта массы и обусловлено отрицательной полной энергией ядра, устойчивое состояние которого сохраняется за счет взаимодействия с

электронной оболочкой атома. Потенциальную энергию, обусловленную силами отталкивания, следует считать отрицательной, так как ей соответствует отрицательное значение полевой добавки к массе.

Ядерные частицы имеют определенное значение мангеля, обусловленное составом, структурой и кулоновскими силами взаимодействующих частиц. Протон как элементарная частица не имеет мангеля, у нейтрона мангель является положительным, у остальных частиц – отрицательным. Величина δm определяется как разность между массой ядра m и суммарной массой ядерных частиц

$$\delta m = m - \sum m_i. \quad (6)$$

Дефект массы, приводимый в справочных материалах, недостаточно точно отражает разницу между массой ядра и массой составляющих его частиц. Во-первых, используемая для расчета дефекта массы безразмерная величина A соответствует числу нуклонов, а не их суммарной массе, которая не может быть целым числом. Во-вторых, ядра состоят не из нуклонов, а из ядерных частиц, которые имеют собственный дефект массы. Поэтому понятие мангеля более точно отражает физическую реальность, чем понятие дефекта массы.

Табличные данные по дефектам масс ядер изотопов химических элементов могут быть использованы для расчета массы ядра по формуле

$$m = A + \Delta m - Z \cdot m_e, \quad (7)$$

где m_e – масса электрона.

Наибольшей устойчивостью обладают ядра изотопов химических элементов с наименьшим значением мангеля. Этим ядрам соответствует минимальное значение внутренней отрицательной энергии ядра, обусловленной кулоновскими силами отталкивания одноименно заряженных ядерных частиц. К таким ядрам относятся, в частности, так называемые *магические ядра*. На рис. 3 представлена зависимость мангеля как функции $\delta m = f(A)$ для изотопов стронция Sr_{38} . Как видно из графика, минимальное значение мангеля приходится на изотоп с массовым числом $A = 88$, что соответствует одному из магических чисел $50 (A - Z)$.

Понятие мангеля может быть использовано для анализа состава и структуры изотопов различных химических элементов, так как изотопы с одними и теми

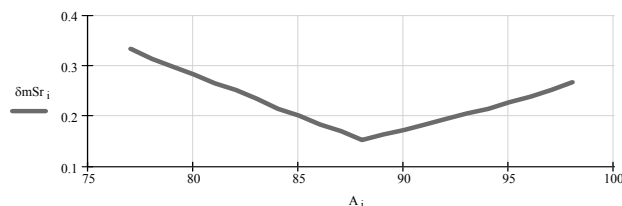


Рис.3. Зависимость мангеля δm от A для изотопов стронция Sr_{38}

же значениями A и Z могут иметь различный состав. При этом изотопы с наименьшим значением мангеля более устойчивы, их можно отнести к так называемой главной последовательности.

Образование ядер гелия в природных процессах

Для данного исследования важно понять, насколько процесс, который пытаются осуществить в создаваемом термоядерном реакторе, соответствует процессу, происходящему в природе при образовании ядер гелия. Это можно понять на основе данных об изотопах водорода, гелия и других легких элементов с учетом их состава и структуры, которые определяются на основе концепции группирования нуклонов в ядерные частицы. Анализ состава изотопов ядер элементов I периода показывает, что основным строительным материалом при образовании из простых ядер более сложных является нейтрон. Нейтрон как частица с нулевым зарядом легко проникает сквозь электронную оболочку атома и попадает в ядро. В ядре возможны реакции слияния нейтрона с некоторыми ядерными частицами:

- образование дейтрона: ${}^1p_1 + {}^1n_0 \rightarrow {}^2d_1$;
- образование тритона: ${}^2d_1 + {}^1n_0 \rightarrow {}^3t_1$;
- образование гелиона: ${}^3\alpha_2 + {}^1n_0 \rightarrow {}^4\alpha_2$.

В табл. 3 приведены данные о составе и основных характеристиках ядер изотопов водорода. Величины массового числа и дефекта масс взяты из справочника [2]. Как следует из таблицы, если в ядре нет частиц, способных поглощать нейтроны, то появляются свободные нейтроны. В ядре изотопов водорода их может быть не больше двух.

Таблица 3

Ядра изотопов водорода ($Z = 1$)

A	Состав						Δm , Мэв	δm , а.е.м
	1p_1	2d_1	3t_1	1n_0	${}^3\alpha_2$	${}^4\alpha_2$		
1	1	-	-	-	-	-	7,289	0
2	-	1	-	-	-	-	13,136	0
3	-	-	1	-	-	-	14,950	0
4	-	-	1	1	-	-	25,920	$3,313 \cdot 10^{-3}$
5	-	-	1	2			33,790	$2,896 \cdot 10^{-3}$

При попадании в ядро третьего нейтрона образуется дейтрон и свободный электрон, который покидает ядро и может занять место в электронной оболочке атома

$${}^1n_0 + {}^1n_0 \rightarrow {}^2d_1 + {}^0e_{-1}$$

Поглощение нейтронов ядром атома водорода, сопровождаемое реакциями образования дейтрона и тритона, может привести к их слиянию внутри ядра и образованию гелиона

$${}^2d_1 + {}^3t_1 \rightarrow {}^4\alpha_2 + {}^1n_0$$

Таким образом, как следует из анализа состава

ядер изотопов водорода, реакция, которую пытаются осуществить в термоядерном реакторе путем сжатия нагретой плазмы из смеси дейтерия и трития, в природе происходит в других условиях, а именно внутри ядер водорода (а также других элементов) в результате поглощения нейтронов.

Теперь рассмотрим ядра изотопов гелия. Эти данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Ядра изотопов гелия

Z	A	Состав						Δm , Мэв	δm , а.е.м.
		1p_1	2d_1	3t_1	1n_0	${}^3\alpha_2$	${}^4\alpha_2$		
2	3	-	-	-	-	1	-	14,931	0
2	4	-	-	-	-	-	1	2,425	0
2	5	-	-	-	1	-	1	11,390	$-0,9554 \cdot 10^{-3}$
2	6	-	-	-	2	-	1	17,597	$1,046 \cdot 10^{-3}$
2	7	-	-	-	3	-	1	26,111	$-0,5711 \cdot 10^{-3}$
2	8	-	-	-	4	-	1	31,609	$-0,3334 \cdot 10^{-3}$

Как видно из табл. 4, в ядрах гелия также идет процесс накопления нейтронов. Максимально допустимое число свободных нейтронов – четыре. Образованию второго гелиона предшествуют реакции, сопровождающиеся образованием пары d-t (дейтрон-тритон)

$${}^1n_0 + {}^1n_0 \rightarrow {}^2d_1 + {}^0e_{-1}; \quad {}^2d_1 + {}^1n_0 \rightarrow {}^3t_1$$

В результате образования дейтрона или тритона внутри ядра гелия получаем изотопы следующего элемента лития соответственно 6Li_3 и 7Li_3 . Ядро наиболее распространенного изотопа лития состоит из обычного гелиона и тритона ${}^7Li_3 \leftrightarrow {}^4\alpha_2 + {}^3t_1$.

После образования дейтрона внутри ядра лития и, вследствие этого, пары «дейтрон-тритон» происходит реакция синтеза еще одного гелиона, и ядро лития превращается в ядро бериллия: ${}^7Li_3 \Rightarrow {}^9Be_4$. Ядро наиболее распространенного изотопа бериллия имеет состав: ${}^9Be_4 \leftrightarrow 2 \cdot {}^4\alpha_2 + {}^1n_0$. Другой возможный состав ядра изотопа с $A=9$: ${}^9Be_4 \leftrightarrow {}^4\alpha_2 + {}^3t_1 + {}^2d_1$. Ядро как система взаимодействующих частиц стремится к состоянию с наименьшей энергией, которому отвечает наименьшее значение мангеля. Поэтому ядро бериллия, имеющее в составе пару d-t, обладает большей отрицательной внутренней энергией кулоновских сил отталкивания, соответственно большим значением мангеля и меньшей устойчивостью.

В целом происходящий в природе внутриядерный синтез можно представить как процесс поглощения ядром нейтронов и их переработки в гелионы после образования пары «дейтрон-тритон» и реакции $d + t \rightarrow \alpha + n$:

$$n + n + n + \dots \Rightarrow d-t \Rightarrow \alpha$$

Внутриядерный синтез гелионов происходит также в ядрах различных элементов. Согласно модели Полинга [4], нуклоны в ядрах сгруппированы, состоят в

основном из гелионов и тритонов, при этом ядра имеют кристаллическую структуру. Для многих ядер их состав определяется по формулам [3]:

- число дейтронов: $N_d = 1$, если N_n – нечетное число, $N_d = 0$, если N_n – четное число;
- число тритонов: $N_t = A - 2Z$; (8)
- число гелионов: $N_\alpha = 1/2(3Z - A - N_d)$.

В табл. 5 приведены данные о составе делящихся ядер, определенные по формулам (8), и энергии нейтронов, необходимой для деления ядер [2]. Как следует из данных таблицы, в составе легко делящихся ядер имеется дейтрон, который при слиянии с одним из ближайших тритонов образует гелион. Так, например, ядра изотопов $^{231}\text{Th}_{90}$, $^{235}\text{U}_{92}$, $^{239}\text{Pu}_{94}$ являются легко делящимися, отличаются количеством гелионов в остоле ядра (соответственно 19, 20 и 21) и имеют одинаковую оболочку: $51t + d$.

Таблица 5

Состав делящихся ядер и необходимая энергия нейтронов

Ядро	Энергия нейтрона E_n , МэВ	Состав ядра		
		N_α	N_t	N_d
$^{235}\text{U}_{92}$	тепловая (~0,025 эВ)	20	51	1
$^{233}\text{U}_{92}$	тепловая	21	49	1
$^{236}\text{U}_{92}$	2,82	20	52	0
$^{238}\text{U}_{92}$	3,10	19	54	0
$^{239}\text{Pu}_{94}$	тепловая	21	51	1
$^{240}\text{Pu}_{94}$	2,39	21	52	0
$^{237}\text{Np}_{93}$	2,37	21	51	0

Суть механизма деления ядра, содержащего дейтрон, заключается в следующем. Ядро, представляющее собой правильную точечную систему (кристалл), находится в устойчивом состоянии под действием уравновешенных кулоновских сил положительно заряженных частиц ядра и отрицательно заряженных электронов оболочки атома. Налетающий нейтрон возбуждает ядро и вызывает столкновение дейтрона с одним из ближайших тритонов, происходит реакция: $t + d \rightarrow \alpha + n$. При этом из кристалла оболочки исчезают 2 вершины, ранее занятые дейтроном и тритоном, и равновесное состояние ядра и электронной оболочки атома резко нарушается. Происходит разрушение ядра и образование осколочных ядер. Таким образом, главный энергетический эффект деления ядра обусловлен превращением его внутренней потенциальной энергии в кинетическую энергию разлетающихся осколков. В результате превращения ядерных частиц изменяется масса продуктов реакции за счет перегруппировки нуклонов в новые структуры. Покажем это на примере деления ядра $^{235}\text{U}_{92}$ (табл.6).

Для определения энергетического эффекта ядер-

ных превращений использовано уравнение баланса ядерных частиц в исходных и конечных продуктах реакции [3].

Таблица 6

Продукты реакции деления ядра $^{235}\text{U}_{92}$

Ядро	Состав ядра			m , а.е.м.	Превращения ядерных частиц	$\Delta\alpha E_{U_1}$, МэВ
	N_α	N_t	N_d			
$^{235}\text{U}_{92}$	20	51	1	235,89	–	–
$^{145}\text{Ba}_{56}^*$	11	33	1	145,57	Синтез α и распад t (+ α , -2t, +2n)	11,33
$^{88}\text{Kr}_{36}^*$	10	16	0	88,28		
$^{139}\text{Xe}_{54}^*$	11	31	1	139,54	Распад t (-t, +d, +n)	-6,28
$^{95}\text{Sr}_{38}^*$	9	19	1	95,34		
$^{145}\text{La}_{57}^*$	13	31	0	145,53	Синтез α (дважды) и распад t (+2 α , -3t, -d, +3n)	28,94
$^{87}\text{Br}_{55}^*$	9	17	0	87,30		

Первая реакция с энергетическим эквивалентом ΔE_{U_1} сводится к двум реакциям превращения ядерных частиц $t+d \rightarrow \alpha+n+\Delta E_\alpha$, $t \rightarrow d+n+\Delta E_t$, вторая с энергетическим эквивалентом ΔE_{U_2} – к одной реакции: $t \rightarrow d+n+\Delta E_t$, третья с энергетическим эквивалентом ΔE_{U_3} – к синтезу двух гелионов в реакциях: $t+d \rightarrow \alpha+n+\Delta E_\alpha$ и распаду одного тритона: $t \rightarrow d + n + \Delta E_t$. Поскольку массы ядерных частиц и нуклонов в исходных и конечных продуктах реакции известны, то можем определить энергетические эквиваленты реакций превращения ядерных частиц ΔE_α и ΔE_t , а затем и энергетические эквиваленты ΔE_{U_1} , ΔE_{U_2} и ΔE_{U_3} , соответствующие разнице масс исходных и конечных продуктов реакции в соответствии с уравнением баланса. Состав конечных продуктов реакции зависит от того, какие из двух указанных реакций превращения ядерных частиц происходят (включая возможное их повторение). Для определения дефекта масс и энергетического эквивалента ΔE в реакциях ядерных превращений вместо значений масс ядер, определённых путём измерений и приведенных в справочных изданиях, можно использовать уравнение баланса ядерных частиц.

Данные табл. 5 и 6 хорошо согласуются и наглядно показывают, что легко делящимися являются ядра, имеющие в составе дейтрон, а ядра, не имеющие дейтрона, этим качеством не обладают. Делению тяжелых ядер предшествует синтез легких ядер (ядерных частиц – дейтрона и тритона), происходящий внутри тяжелого ядра. При этом реакции синтеза гелионов инициируются нейтронами. Отсюда следует, что источником ядерной энергии в действующих реакторах является внутриядерный синтез, который может быть осуществлен и в будущих реакторах на основе других видов ядерного топлива. Для построения реактора на основе внутриядерного синтеза необходим мощный источник нейтронов, который может обеспечить поступление нужного для работы реактора количества быстрых нейтронов в ядра легких элементов и последующую переработку нейтронов в гелионы:

$n + n \dots \Rightarrow d - t \Rightarrow \alpha$. Этот процесс может быть использован также для переработки ядерных отходов промышленных реакторов. При этом ядерные отходы могут быть использованы как источник энергии.

В дополнение к аргументам, подтверждающим правильность излагаемой концепции внутриядерного синтеза, можно привести водородную бомбу – устройство, в котором была осуществлена планируемая реакция $d + t \rightarrow \alpha + n$.

Начинка водородной бомбы содержала нужные компоненты для реакций слияния ядер дейтерия и трития. Реакция синтеза гелионов была инициирована с помощью атомной бомбы, в которой использовался заряд из смеси изотопов урана. Деление ядер урана сопровождается не только выделением большой энергии, но и мощным потоком нейтронов, необходимых для образования нужных компонентов для синтеза гелионов внутри ядер вещества начинки водородной бомбы, т.е. реакций: $n + n \rightarrow d + e$, $n + d \rightarrow t$, $t + d \rightarrow \alpha + n$.

Заключение

Проблема управляемого термоядерного синтеза связана с трудностями фундаментального характера, и нет гарантии, что они будут преодолены в обозримом будущем без существенного прогресса в области теории. В ядерной физике господствуют устаревшие представления о строении ядра, ядерных силах и механизме высвобождения энергии в ядерных реакциях. Укоренилось ошибочное представление о превращении части массы ядерного вещества в энергию. Это положение резко критиковал Н. Тесла [8]. Но мнение великого исследователя, которое в данном случае является принципиально важным, по всей видимости, не учитывается разработчиками термоядерного реактора.

Выпали из поля зрения современной ядерной физики и некоторые другие идеи и концепции выдающихся ученых. Имеются в виду: концепция группирования

нуклонов в гелион-тритонной модели Л. Полинга [4] и положение Л.Бриллюэна о связи массы системы взаимодействующих частиц с потенциальной энергией [5]. Эти идеи и положения, важные для понимания сути рассматриваемой проблемы, замалчивается в научной литературе, не отражены в энциклопедических изданиях даже в статьях обзорного характера.

Ядерные реакции сводятся к превращениям ядерных частиц, т.е. к перегруппированию нуклонов, что определяет энергетический эффект. Как показал анализ, в природных процессах слияние ядер дейтерия и трития происходит в результате внутриядерного синтеза. При этом пары дейтрон-тритон либо уже существуют, либо образуются внутри исходного ядра. Внутриядерный синтез гелионов происходит также и в действующих реакторах на основе деления тяжелых ядер и водородной бомбе, в которой используется урановый заряд для инициирования реакции синтеза гелионов и создания потока нейтронов, необходимых для образования дейтронов и тритонов в веществе основной начинки бомбы.

В действующих реакторах используется природное топливо, содержащее в себе внутреннюю энергию, высвобождаемую в процессе горения. Для термоядерного реактора готового природного топлива нет, а эффективность единого процесса практически одновременного получения топлива из смеси дейтерия и трития и его сжигания в рабочей зоне реактора недостаточно обоснована теоретически и не подтверждена экспериментально. Предпринимаемые попытки создания термоядерного реактора, вполне вероятно, могут завершиться на стадии создания демонстрационного образца. Возможно, в реакторах будущего найдут применение принципы, положенные в основу устройства водородной бомбы. Для управления процессом внутриядерного синтеза можно использовать также пучок дейтронов, направляемый на мишень из легких элементов [9].

Литература

1. Гинзбург ВЛ. О физике и астрофизике. Какие проблемы представляются сейчас особенно важными и интересными? – М., 1980.
2. Физические величины. Справочник. – М., «Энергоатомиздат», 1991.
3. Серга ЭВ. Строение материи. – М.: Изд. МГУЛ, 2006.
4. Полинг Л. Общая химия. Пер. с англ. – М.: «Мир», 1974.
5. Бриллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности. Пер. с англ. – М., «Мир», 1972, с. 30-40.
6. Физическая энциклопедия. Т.1. – М., 1988.
7. Серга ЭВ. Масса ядра и потенциальная энергия // Сборник трудов секции инженерных проблем РИА. Вып. 16. 2008. с. 154-158.
8. О'Нил. Дж. Гений, бьющий через край. – М., «Саттва», 2007, с. 225.
9. Серга ЭВ. Управляемый внутриядерный синтез // Двойные технологии – М., 2007, № 2, с. 62-66.

Материал поступил в редакцию 06. 11. 2008г.