

Памяти Александра Дидыка

МНОГОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В КОНДЕНСИРОВАННОМ ГЕЛИИ

Мышинский Г.В.

Объединенный институт ядерных исследований, <http://www.jinr.ru/>

Дубна, Московская область 141980, Российская Федерация

Поступила 25.04.2017

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Рухадзе

После многочасовых облучений конденсированного гелия при давлениях 1.1 и 3 кбар тормозными гамма квантами с максимальной энергией 10 МэВ в объеме реакционной камеры обнаружены "посторонние" химические элементы, отсутствующие в ней до начала облучений. Для объяснения появления синтезированных элементов предложен новый механизм: многоядерные реакции. Эти реакции протекают благодаря созданию ядерных молекул, которые состоят из нескольких ядер гелия. Ядерные молекулы образуются, посредством слияния нескольких атомов ортогелия. Предлагается провести эксперименты, нацеленные на регистрацию многоядерных реакций путем пропускания электрических разрядов через гелий или через смесь гелия с водородом при давлении в несколько бар.

Ключевые слова: ядерная наука в конденсированной среде, низкоэнергетическая трансмутация, многоядерные реакции, ядерные молекулы, Бозе-конденсат.

PACS: 03.75.MN; 03.75.NT; 25.70.JJ; 31.15.XG

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (94)
2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СИНТЕЗУ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЕЛИИ (95)
3. МНОГОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ (96)
4. ОБРАЗОВАНИЕ ТРАНСМОЛЕКУЛ. ЭЛЕКТРОННЫЙ БОЗЕ-КОНДЕНСАТ (99)
5. ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНИЗИРОВАННОМ ГЕЛИИ (101)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (103)

ЛИТЕРАТУРА (103)

1. ВВЕДЕНИЕ

Феноменологическая модель низкоэнергетических ядерных реакций предполагает, что в них происходит слияние многих атомных ядер в одно общее образование и последующий распад этого образования на многие ядра [1-3]. Такая модель подразумевает, что для осуществления этих реакций в возбужденной, конденсированной среде должны возникнуть некоторые локальные области – "капсулы", содержащие внутри себя большое количество атомов [4]. Внутри этих "капсул" изменяются условия протекания физических процессов и структуры атомов и ядер. При

этом не важно, каким методом происходит возбуждение среды и создание в ней "капсул": то ли это электронный взрыв или электроразряд, кавитация или электролиз, химическая реакция или биохимическая реакция, или радиация.

В многочисленных работах, выполненных Дидыком А.Ю. и др. в Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ [5-12, более 40 статей], проводились многочасовые облучения тормозными гамма квантами с максимальной энергией $E_{\max} = 10$ МэВ и $E_{\max} = 23$ МэВ металлических образцов в атмосфере газообразного дейтерия, водорода или гелия при давлениях сотни-тысячи бар. При таких давлениях плотность атомов газов сравнима с плотностью атомов в твердом теле и жидкостях. Поэтому, далее, употребляется термин – конденсированный газ. Такие же исследования были выполнены в камерах с конденсированными чистыми газами: водородом, гелием [8-11] и ксеноном [12] при облучении их гамма квантами с $E_{\max} = 10$ МэВ.

Во всех экспериментах после окончания облучений в реакционных камерах были обнаружены "посторонние" химические элементы, отсутствующие в них до начала

облучений. Диапазон "посторонних" элементов простирается от водорода до висмута. В этой статье приводятся результаты экспериментов по синтезу химических элементов под действием тормозного излучения с $E_{\text{max}} = 10$ МэВ в конденсированном гелии ${}^4\text{He}$ (99,999) при двух давлениях: 1.1 кбар и 3.05 кбар. Для объяснения появления в экспериментах "посторонних" химических элементов привлечен новый механизм: многоядерные реакции.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СИНТЕЗУ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЕЛИИ

Камера высокого давления гелия (HeHPC) изображена на рис. 1. Корпус камеры (3) и входное, уплотняющее окно (2) были изготовлены из бериллиевой бронзы. В корпус камеры вставлялись вкладыш (6) и втулка (7), изготовленные из чистой меди – 99.9%. Внутренние размеры камеры, заполненной гелием (5), составляли: длина – 15 мм, диаметр – 8 мм, объем – 0.75 см³. Давление гелия после заполнения им HeHPC перед началом облучения контролировалось с помощью тензодатчика (8) в течение нескольких недель.

Облучение HeHPC проводилось тормозными гамма квантами (1) с максимальной энергий 10 МэВ на ускорителе электронов МТ-25 ЛЯР ОИЯИ. Ток электронов на вольфрамовом конвекторе-диске диаметром 40 мм и толщиной 2.5 мм, преобразующим поток электронов в гамма кванты, составлял $(1-1.5) \cdot 10^{14}$ с⁻¹. Диаметр пучка электронов 6-7 мм. Расходимость пучка гамма квантов на полувысоте интенсивности составляла по горизонтали $10^\circ \pm 1^\circ$ и $8^\circ \pm 1^\circ$ по вертикали. За конвектором, вплотную располагался поглотитель электронов толщиной

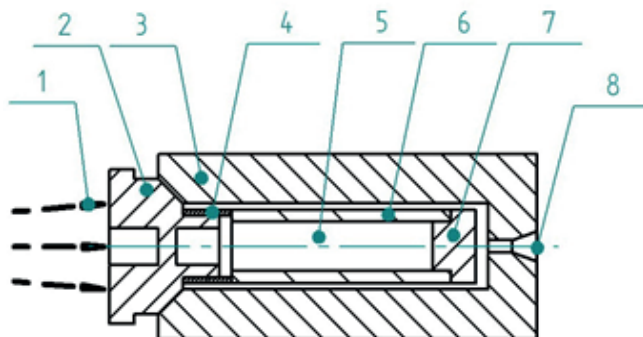


Рис. 1. Камера высокого давления HeHPC.

Таблица 1

Параметры облучений

№	P, кбар	ΔP, бар	ρ, ат/см ³	T, с · 10 ⁻⁵	I, с ⁻¹ · 10 ⁻¹⁴
1	1.1	666	$1.5 \cdot 10^{22}$	1.02	1.2-1.5
2	3.05	63	$2.6 \cdot 10^{22}$	1.0	1-1.2

25 мм, изготовленный из дюрала алюминия Д16Т. Облучение проводилось по 7-8 часов в день. В табл. 1 представлены параметры облучений [8-11]: № – номер эксперимента; P – давление гелия в начале облучения; ΔP – разница давления гелия в начале и в конце облучения; T – время облучения; I – ток электронов.

После окончания облучений гелий выпускался из HeHPC в окружающую среду и камера вскрывалась. Наиболее впечатляющим результатом в первом эксперименте при давлении 1.1 кбар было обнаружение во внутренней части HeHPC тонких, цилиндрических, черных фольг значительных размеров (4). Фольги (рис. 2) преимущественно состояли из углерода и оставляли на бумаге маслянистые следы. Последнее говорит о присутствии на фольгах жидких масел в виде углеводородов и о синтезе водорода.

Во втором эксперименте при давлении 3.05 кбар углеродных фольг не обнаружено. Предположительно, это связано с небольшим падением давления в камере в процессе облучения: во втором эксперименте оно составило 63 бар, а в первом – 666 бар (табл. 1). С помощью методов растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеновского микрозондового анализа (РМЗА) исследовался элементный состав: входного окна из бериллиевой бронзы, аномальных структур и микрочастиц (объектов),

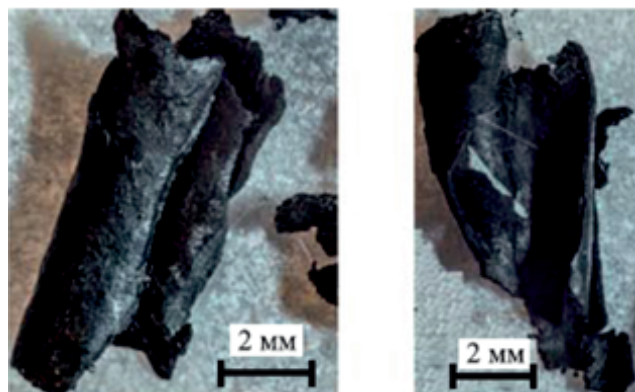


Рис. 2. Фотографии черных фольг.

образовавшихся в результате облучений на внутренних поверхностях вкладышей, втулок. Все исследования РЭМ и РМЗА проводились в двух независимых сертифицированных лабораториях: в аналитическом центре НИИЯФ им. Д.В. Скобелевича МГУ и в ФГБНУ "Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий". РМЗА полученных структур и микрочастиц проводился при площади возбуждения электронным лучом $\sim 1-4$ мкм². В отдельных случаях объект исследования сканировался электронным лучом микроскопа вдоль определенной полосы, по длине которой получалось несколько рентгеновских спектров.

На рис. 3 и 4 представлены усредненные концентрации элементов K в атомных процентах в экспериментах с давлением гелия 1.1 кбар и 3 кбар в зависимости от заряда ядра Z . В случае 1.1 кбар усреднение проводилось по 11 измерениям разных объектов [8-10], в случае 3 кбар усреднение проводилось по 17 измерениям разных объектов [11]. При сравнении рисунков видно, что набор элементов в первом эксперименте с давлением 1.1 кбар богаче, чем во втором эксперименте с давлением 3 кбар. Общим для обоих распределений по химическим элементам является наличие группы легких элементов от углерода ${}_6C$ до цинка ${}_{30}Zn$. Наряду с легкими химическими элементами, в первом эксперименте обнаружены: мышьяк ${}_{33}As$, олово ${}_{50}Sn$, теллур ${}_{52}Te$, барий ${}_{56}Ba$, тантал ${}_{73}Ta$ и свинец ${}_{82}Pb$. Во втором эксперименте эти химические элементы не обнаружены. С зарядом ядра $Z > 30$ присутствует только один элемент – серебро ${}_{47}Ag$. По-видимому, это отличие также

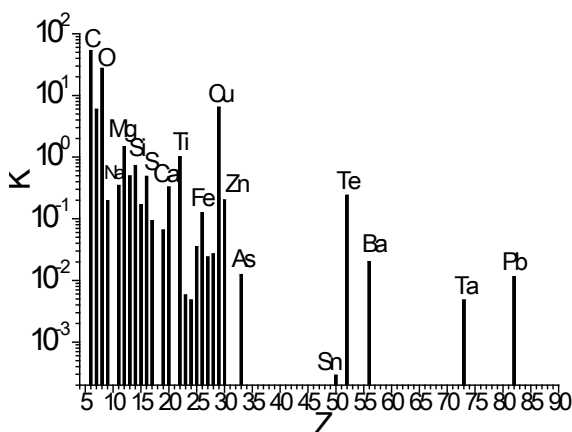


Рис. 3. Концентрации элементов с $P = 1.1$ кбар.

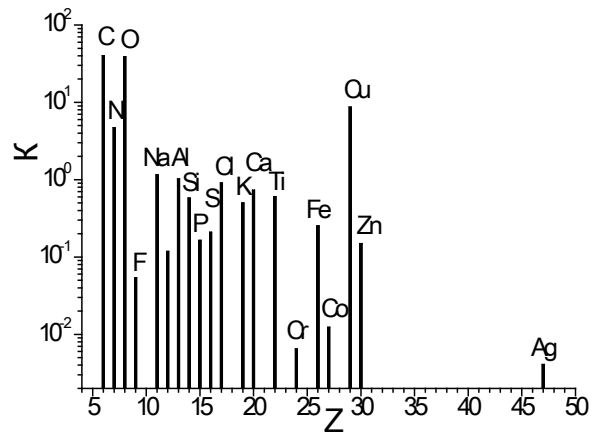


Рис. 4. Концентрации элементов с $P = 3$ кбар.

связано с небольшим падением давления в камере в процессе облучения во втором эксперименте 3 кбар.

Из фактов наличия углеродных фольг и производства химических элементов с $Z > 30$ в эксперименте с давлением 1.1 кбар и, практически, их отсутствия в эксперименте с давлением 3 кбар можно предположить, что скорость реакций синтеза химических элементов зависит от давления гелия. Реакции синтеза идут интенсивнее при давлении 1.1 кбар, чем при давлении 3 кбар. По-видимому, имеется оптимальная величина давления газа, при которой скорость реакций, при прочих равных условиях, является максимальной.

3. МНОГОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

На рис. 5 представлена усредненная концентрация химических элементов, сделанная по пяти измерениям (черные точки). Два измерения были сделаны на углеродной фольге и три измерения на микрочастицах [9, табл. 3, 4]. Этот рисунок был построен и проанализирован первым наряду с

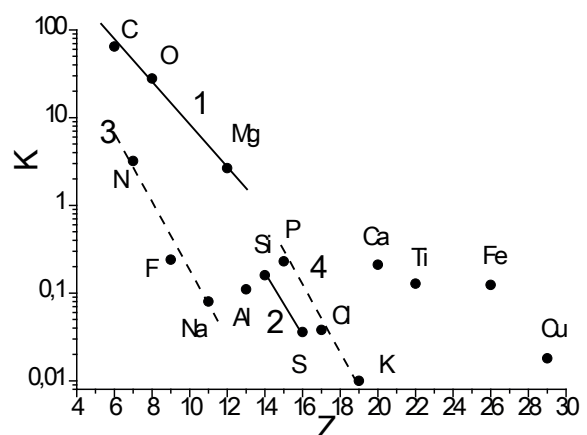
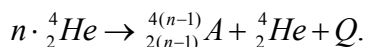


Рис. 5. Концентрация элементов по пяти измерениям.

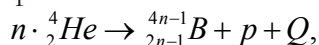
представленными рисунками 3 и 4. Обращают на себя внимание группы элементов. Через точки во всех этих группах можно провести прямые линии. На рис. 5 линии этих групп пронумерованы. Первая и вторая – это группы химических элементов четные по заряду ядер. В их состав входят элементы: углерод-кислород-магний и кремний-сера. Третья и четвертая – это группы химических элементов нечетные по заряду ядер. В них входят элементы: азот-фтор-натрий и фосфор-хлор-калий.

Поскольку элементы в группах отстают друг от друга на заряд кратный двум, т.е. на ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, то можно предположить, что в конденсированном гелии под воздействием гамма квантов протекают многоядерные реакции.

Действительно, появление четных химических элементов ${}^N_Z A$ можно представить как результат слияния в компаунд $(n - 1)$ ядер гелия из общего образования, состоящего из "n" ядер гелия, с одновременным испусканием одного ядра гелия:



Появление нечетных химических элементов ${}^N_Z B$ можно представить как результат слияния в компаунд "n" ядер гелия, но с испусканием протона:



где Q – энергия, выделяющаяся в результате реакции. Общее образование, сформированное из отдельных ядер гелия, является ядерной молекулой – трансмолекулой [4]. Предполагается, что трансмолекула, состоящая из ядер гелия, обязана своему существованию ядерным и электромагнитным взаимодействиям. Реакция с вылетом гелия из трансмолекулы будет иметь большее сечение, чем реакция с испусканием протона, поскольку вылетающее ядро гелия не участвует в процессе слияния. Вероятность образования трансмолекул экспоненциально уменьшается с увеличением количества ядер гелия в их составе (рис. 6, зеленая линия). Если при слиянии ядер гелия в компаунд сохраняются отношения сечения с вылетом гелия к сечению с вылетом протона, то выходы соответствующих этим сечениям продуктов

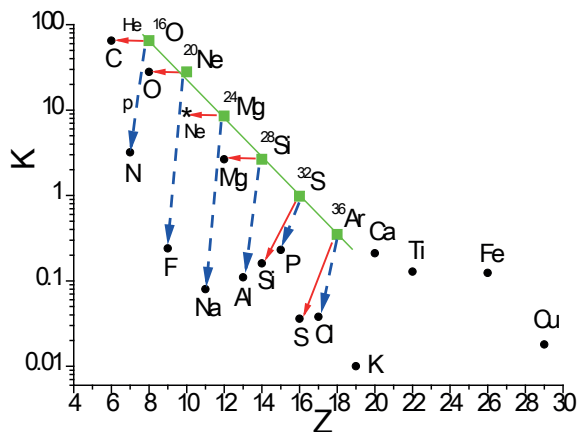


Рис. 6. Трансформация трансмолекул ($n \cdot {}^4\text{He}$) с испусканием гелия или протона.

также должны экспоненциально уменьшаться. Такое поведение в выходах продуктов можно наблюдать на рис. 5, линии 1-4. На рис. 6 стрелками схематически изображены реакции трансформации трансмолекул от ${}^{16}\text{O}$ до ${}^{36}\text{Ar}$ с вылетом гелия (сплошная стрелка) или протона (пунктирная стрелка). Трансмолекула – "кислород ${}^{16}_8\text{O}$ ", состоящая из четырех ядер гелия, трансформируется в углерод ${}^{12}_6\text{C}$ с вылетом гелия или в азот ${}^{15}_7\text{N}$ с вылетом протона. Трансмолекула – "неон ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ ", состоящая из пяти ядер гелия, трансформируется в кислород ${}^{16}_8\text{O}$ с вылетом гелия или во фтор ${}^{19}_9\text{F}$ с вылетом протона и так далее. При слиянии ядер гелия в компаунд он может испарить нейтроны. Для выходов конечных продуктов испарение нейтрона и последующий β^+ -распад компаунда эквивалентны эмиссии из него протона. Начиная с трансмолекулы "неона ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ ", становятся возможны реакции с образованием двух и более фрагментов, например: $5 \cdot {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + 2 \cdot {}^4\text{He}$ и $6 \cdot {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$.

Ядерная трансмолекула формируется за счет последовательного захвата ядер ортогелия или других трансмолекул. Средние расстояния между атомами гелия при температуре 300 К, давлении 1 кбар и 3 кбар составляют $4.1 \cdot 10^{-10}$ м и $3.4 \cdot 10^{-10}$ м, а среднее время между столкновениями атомов гелия $\sim 3 \cdot 10^{-13}$ с. Поэтому, трансмолекула является устойчивым образованием в масштабе ядерного времени 10^{-20-22} с. Следует предположить, что в ядерной трансмолекуле сосуществуют в "равновесии" ядерные силы, связывающие ее

ядра, и кулоновские силы отталкивания, не дающие ядрам моментально слиться.

В табл. 2 даны характеристики многоядерных реакций. № – номер строки. Во втором столбце представлены продукты реакций – изотопы элементов, получающиеся в реакциях. В скобках дано содержание соответствующего изотопа в естественной смеси. Изотопы со знаком плюс A^+ – это β^+ -радиоактивные изотопы, испускающие позитроны e^+ . Там же дается время жизни изотопа. В третьем столбце представлена многоядерная реакция через образование трансмолекулы $n\cdot^4\text{He}$. В четвертом столбце дана ядерная энергия связи (\mathcal{E}) продуктов реакции. В пятом столбце

дана рассчитанная энергия (Q), выделяющаяся в реакции. В шестом столбце указана энергия отдачи (q) для гелия, протона и нейтрона.

Из табл. 2 видно, что химические элементы: литий, бериллий, бор не производятся в простых реакциях с вылетом гелия-3 и протона, т.к. $Q < 0$. Эти элементы начинают появляться в паре с радиоактивными изотопами азота, кислорода, фтора и др., начиная с реакций с участием пяти и шести ядер гелия. Такие реакции требуют существенной перестройки компаунда, образованного путем слияния всех ядер гелия в трансмолекуле. Поэтому сечения этих реакций подавлены.

В табл. 2 следует обратить внимание на реакции, прописанные в строчках 2 и 6. Трансмолекулы, состоящие из двух и трех ядер гелия, могут быть относительно стабильными. В первом случае стабильность трансмолекулы ^8Be определяется, прежде всего, невозможностью слияния двух ядер гелия по энергетической причине $Q < 0$. Во втором случае, несмотря на то, что энергия связи углерода $^{12}\text{C} = 92161.7$ кэВ больше, чем сумма энергий связи трех ядер гелия $3\cdot^4\text{He} = 84887$ кэВ на величину ~ 7274.7 кэВ, реакция $3\cdot^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + 6\cdot e^-$ подавлена. Это связано с заторможенностью в перераспределении выделенной энергии за счет только электромагнитного взаимодействия между углеродом и шестью атомными электронами [13]. Шесть электронов связаны в Бозе-конденсат. Энергия их связи составляет ~ 3 кэВ. Кроме указанной реакции, может иметь место реакция: $3\cdot^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + 6\cdot e^- + \gamma$. Гамма квант с энергией 4438 кэВ в этой реакции появляется в результате распада возбужденного состояния углерода ^{12}C .

Посмотрим на строчку 16 табл. 2. Энергия связи ядра гелия $^4\text{He} = 28295.6745$ кэВ меньше, чем энергия, выделяющаяся в реакции: $7\cdot^4\text{He}(^{28}\text{Si}) \rightarrow ^{24}\text{Mg} + ^4\text{He} + 28483$ кэВ, но она больше, чем энергия отдачи $^4\text{He} = 24922$ кэВ. Таким образом, энергии реакции не хватает, чтобы разрушить вылетевшее ядро гелия ^4He . Поэтому, точка магния Mg на рис. 5 ещё остаётся на линии 1. Однако, сечение реакции с вылетом протона возрастает $7\cdot^4\text{He}(^{28}\text{Si}) \rightarrow ^{27}\text{Al} + p + 26882$ кэВ и точка алюминия Al смещается с линии 3 вверх на рис. 5.

Таблица 2

Многоядерные реакции в гелии

№	Продукт реакции	Реакция $n\cdot^4\text{He}$	\mathcal{E} , кэВ	Q , кэВ	q , кэВ
1	^7Li (92.5%)	$2\cdot^4\text{He} - p$	39245	-17347	
2	^8Be	$2\cdot^4\text{He} - e\gamma$	56500	-92	
3	^9Be	$3\cdot^4\text{He} - ^3\text{He}$	58165	-19004	
4	^{11}B (80.0%)	$3\cdot^4\text{He} - p$	76205	-8682	
5	$^{11}\text{C} + 20.4$ м	$3\cdot^4\text{He} - n$	73440	-11447	
6	^{12}C (98.9%)	$3\cdot^4\text{He} - e\gamma$	92162	7275	
7	^{12}C	$4\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	92162	7275	5 456
8	^{15}N (0.37%)	$4\cdot^4\text{He} - p$	115492	2309	2 165
9	$^{15}\text{O} + 2$ м	$4\cdot^4\text{He} - n$	111956	1227	1 150
10	^{16}O (99.8%)	$5\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	127619	14437	11 549
11	^{19}F	$5\cdot^4\text{He} - p$	147801	6323	6 007
12	$^{19}\text{Ne} + 17$ с	$5\cdot^4\text{He} - n$	143781	2302	2 187
13	^{20}Ne (90.5%)	$6\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	160645	19166	15 972
14	^{23}Na	$6\cdot^4\text{He} - p$	186564	16790	16 090
15	$^{23}\text{Mg} + 11$ с	$6\cdot^4\text{He} - n$	181725	11951	11 453
16	^{24}Mg (79.0%)	$7\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	198257	28483	24 922
17	^{27}Al	$7\cdot^4\text{He} - p$	224952	26882	25 922
18	$^{27}\text{Si} + 4$ с	$7\cdot^4\text{He} - n$	219357	21287	20 527
19	^{28}Si (92.23%)	$8\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	236537	38467	34 193
20	^{31}P	$8\cdot^4\text{He} - p$	262917	36551	35 409
21	$^{31}\text{S} + 2.6$ с	$8\cdot^4\text{He} - n$	256738	30373	29 424
22	^{32}S (95.02%)	$9\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	271781	45415	40 369
23	^{35}Cl (75.8%)	$9\cdot^4\text{He} - p$	298290	43549	42 339
24	$^{35}\text{Ar} + 1.8$ с	$9\cdot^4\text{He} - n$	291462	36801	35 779
25	^{36}Ar (0.34%)	$10\cdot^4\text{He} - ^4\text{He}$	306716	52055	46 849
26	^{39}K (93.26%)	$10\cdot^4\text{He} - p$	333724	50767	49 498
27	$^{39}\text{Ca} + 0.9$ с	$10\cdot^4\text{He} - n$	326411	43454	42 367

В строчке 19 табл. 2 в реакции: $8 \cdot ^4\text{He} (^{32}\text{S}) \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He} + 38467.2 \text{ кэВ}$, выделяющаяся энергия и энергия отдачи ^4He уже больше, чем энергия связи ядра гелия ^4He . Поэтому, преимущественно идет реакция с вылетом протона и образованием фосфора P. Реакция с вылетом гелия и образованием кремния Si подавлена, точка Si на рис. 5 смещается с линии 1 вниз. То же происходит в случае реакции с девятью ядрами гелия $9 \cdot ^4\text{He} (^{36}\text{Ar})$ с образованием серы S и хлора Cl. В измененных условиях, когда реакции с вылетом гелия подавлены, в сечениях реакций появляется новая систематика. Она выражается в том, что величины выходов химических элементов в реакциях начинают размещаться на других линиях $2 \cdot (\text{Si-S})$ и $4 \cdot (\text{P-Cl-K})$ (рис. 5).

Наработка химических элементов после хлора с $Z > 19$ (рис. 5), по-видимому, определяется вторичными процессами. В этих процессах, в многоядерных взаимодействиях участвуют преобразованные атомы (трансатомы [15]) химических элементов, полученных в предыдущих реакциях. Следует обратить внимание на 100-процентную наработку в многоядерных реакциях ^{15}N и ^{36}Ar , строчки 8 и 25 табл. 2. В естественной смеси их присутствие составляет 0.37% и 0.34%. Поэтому, в анализах по массам преимущественная регистрация изотопов ^{15}N и ^{36}Ar будет свидетельствовать о протекании в конденсированном гелии многоядерных реакций.

4. ОБРАЗОВАНИЕ ТРАНСМОЛЕКУЛ. ЭЛЕКТРОННЫЙ БОЗЕ-КОНДЕНСАТ

Для того, чтобы ядра гелия образовали трансмолекулу, необходимо, чтобы атомы гелия превратились в трансатомы гелия (рис. 7). Атомы гелия являются уникальными атомами для такого превращения. Известно, что атомы гелия имеют два устойчивых, основных состояния:

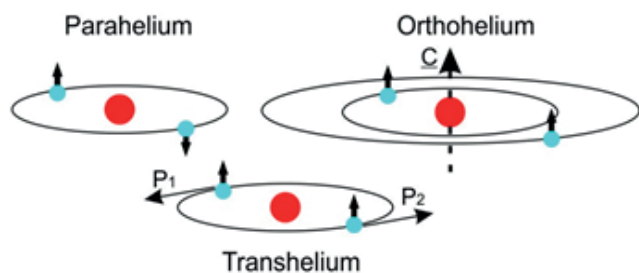


Рис. 7. Основные состояния атома гелия.

парагелий 1^1S_0 и ортогелий 2^3S_1 . Возможность существования ортогелия [14] и трансгелия [15] обязаны обменно-взаимодействию, связанному с неразличимостью электронов (принцип тождественности). Обменное взаимодействие характеризуется величиной обменной энергии ("A"). В отличие от электростатической энергии "C" вклад обменной энергии в полную энергию системы может иметь разный знак в зависимости от того, симметрична или антисимметрична спиновая часть волновой функции. Поправка ΔE к полной энергии системы (1), связанная с взаимодействием электронов, определяется по теории возмущения и равна:

$$\Delta E = C \pm A, \tag{1}$$

где знак "+" относится к антисимметричному $\uparrow\downarrow$ спиновому состоянию $S = 0$, а знак "-" относится к симметричному $\uparrow\uparrow$ спиновому состоянию $S = 1$. В атоме энергия кулоновского отталкивания электронов "C" и обменная энергия "A" (обменный интеграл) положительны. Поэтому, благодаря обменной энергии, в атоме гелия существуют как силы притяжения между электронами (ортогелий), так и силы отталкивания (1). У парагелия спины электронов антипараллельны $\uparrow\downarrow$, у ортогелия они параллельны $\uparrow\uparrow$ (рис. 7). В отличие от парагелия, согласно принципу Паули, электроны у ортогелия не могут находиться одновременно в одном и том же состоянии. Поэтому у ортогелия электроны находятся в разных состояниях, на разных энергетических уровнях (рис. 7). Основные состояния у парагелия и ортогелия отличаются на 19.77 эВ. Линии парагелия – синглеты ($S = 0$), а линии ортогелия – триплеты ($S = 1$). Характеристические линии в оптическом спектре имеют длины волн у парагелия 501.6 нм, у ортогелия 587.6 нм. Переход с излучением двух фотонов $2^3S_1 \rightarrow 1^1S_0 + 2\gamma$ между орто- и парагелием сильно подавлен и имеет время жизни $2.5 \cdot 10^8$ с. Однофотонный, магнитно-дипольный распад 2^3S_1 -состояния имеет время жизни $8 \cdot 10^3$ с. Однако возможны безизлучательные переходы при взаимодействии ортогелия с налетающим электроном или другим атомом.

Ортогелий, в отличие от парагелия, обладает сильным магнитным полем, поскольку магнитные моменты его электронов всегда параллельны. Радиус орбитали R_1 первого электрона в ортогелии

(или в атоме парагелия) равен $3.1 \cdot 10^{-11}$ м, радиус орбитали R_2 второго электрона ортогелия равен $8.76 \cdot 10^{-11}$ м. Магнитный момент электрона μ_e создает магнитное поле с вектором магнитной индукции \mathbf{V}_μ равным [16]:

$$\mathbf{V}_\mu = \mu_0 \frac{3\mathbf{n}(\mu_e \cdot \mathbf{n}) - \mu_e}{r^3}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\mu_e = 9.29 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл = $5.79 \cdot 10^{-5}$ эВ/Тл, r – расстояние от электрона до точки, в которой определяется поле, \mathbf{n} – единичный вектор в направлении r . В центре атома ортогелия, в области ядра магнитное поле \mathbf{V}_0 рассчитывается по формуле (2): $\mathbf{V}_0 = -\mu_0 \mu_e / R_1^3 - \mu_0 \mu_e / R_2^3 = -393 - 17 = -410$ Тл. Знак минус означает, что в центре атома магнитное поле направлено в сторону, противоположную направлению магнитных моментов электронов. Магнитное поле в точке, расположенной на оси \underline{C} (рис. 7) на расстоянии R_2 от ядра, $V_{R_2} \sim 70$ Тл и направлено параллельно магнитным моментам электронов μ_e . Ось \underline{C} восстановлена перпендикулярно электронным орбитальям и проходит через центр атома. На расстоянии $c^2 \gg R_2^2$ на оси \underline{C} вектор магнитной индукции для ортогелия из выражения (2) равен $\mathbf{V}_c = \frac{4\mu_0 \mu_e}{c^3}$ и параллелен μ_e . Следовательно, два атома ортогелия притягиваются друг к другу с магнитной самофокусировкой по оси \underline{C} . Энергия магнитного взаимодействия для них вдоль оси \underline{C} равна $E_\mu = 4\mu_e \cdot V_c$. На расстоянии R_2 энергия магнитного взаимодействия равна ~ 0.016 эВ. По мере сближения двух атомов ортогелия энергия их взаимодействия будет увеличиваться.

С уменьшением расстояния между атомами ортогелия движение электронов в одном ортогелии будет за счет электромагнитного взаимодействия синхронизироваться с движением электронов во втором ортогелии. Такая синхронизация приводит к тому, что у атомов ортогелия как внутренние, так и внешние электроны будут находиться на орбиталях в диаметрально противоположных позициях (рис. 8). Вследствие этого, суммы импульсов отдельно внешних и отдельно внутренних электронов равны нулю $\mathbf{P}_1 = -\mathbf{P}_2$ (рис. 7), что является одним из условий спаривания электронов. Более того, в результате возникающего дополнительного, притягивающего обменного взаимодействия

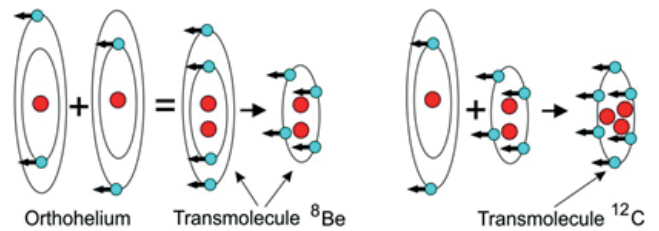


Рис. 8. Образование трансмолекулы ${}^8\text{Be}$ и ${}^{12}\text{C}$.

между электронами, принадлежащими разным атомам ортогелия, и под действием сильного магнитного поля, эти электроны попарно образуют связанные в бозон куперовские пары с $\mathbf{S} = 1$ (рис. 8). Эти электронные бозоны являются общими для двух ядер гелия. Таким образом, у возбужденной, ядерной трансмолекулы "бериллия ${}^8\text{Be}$ " одна куперовская пара электронов находится на внешней орбитали, а вторая куперовская пара на внутренней орбитали (рис. 8). Поскольку внешняя пара является бозоном, она сразу переходит в основное состояние, испуская при этом два фотона. Следовательно, вокруг трансмолекулы создается электронный Бозе-конденсат. Радиус трансмолекулы "бериллия ${}^8\text{Be}$ " $R_{\text{Be}} = 1.32 \cdot 10^{-11}$ м. Магнитные поля: в центре $V_0 = 2 \cdot 10^4$ Тл, а на расстоянии $1.2 \cdot R_{\text{Be}}$ от центра $V_R = 4 \cdot 10^3$ Тл [15].

Магнитное взаимодействие атома ортогелия и трансмолекулы " ${}^8\text{Be}$ ", а также обменное взаимодействие между их электронами приводят к преобразованию атома ортогелия в атом трансгелия (рис. 8). Радиус трансгелия $R_{\text{He}} = 2.64 \cdot 10^{-11}$ м, $V_0 = 1.3 \cdot 10^3$ Тл. Дальнейшее взаимодействие уже трансгелия с трансмолекулой " ${}^8\text{Be}$ " ведет к образованию трансмолекулы "углерода ${}^{12}\text{C}$ ". Радиус трансмолекулы " ${}^{12}\text{C}$ " $R_C = 0.89 \cdot 10^{-11}$ м. Магнитные поля: в центре $V_0 = 10^5$ Тл, а на расстоянии $1.2 \cdot R_C$ от центра $V_{Rc} = 2 \cdot 10^4$ Тл. Возможность существования трансмолекул обусловлена ядерными силами и сверхсильными, неоднородными магнитными полями $10^4 - 3 \cdot 10^8$ Тл в их центрах [15].

Как отмечено в параграфе 3, трансмолекулы " ${}^8\text{Be}$ " и " ${}^{12}\text{C}$ " могут быть стабильными. Поэтому они вступают во взаимодействие как с ортогелием, трансформируя его в трансгелий, так и между собой. Результатом таких взаимодействий является образование других, более тяжелых ядерных трансмолекул. На рис. 9 показаны разные комбинации, состоящие из атомов ортогелия, трансмолекулы " ${}^8\text{Be}$ " и " ${}^{12}\text{C}$ ", которые

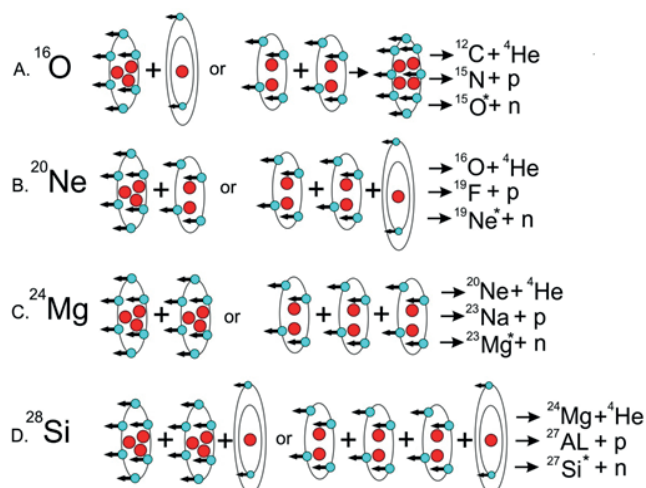


Рис. 9. Образование и распад трансмолекул.

приводят к образованию: А – трансмолекулы "кислорода ^{16}O "; В – трансмолекулы "неона ^{20}Ne "; С – трансмолекулы "магния ^{24}Mg " и D – трансмолекулы "кремния ^{28}Si ". Например, трансмолекулу " ^{16}O " можно получить в комбинации трансмолекулы " ^{12}C " с ортогелием или в комбинации с двумя трансмолекулами " ^8Be ". Стрелками справа (рис. 9) указаны изотопы химических элементов, получающиеся в результате многоядерных реакций с испусканием ядра гелия ^4He , протона p и нейтрона n (табл. 2).

Таким образом, создание трансмолекул зависит от сечения образования ортогелия и от его объемной плотности. После возникновения трансмолекул многоядерные реакции протекают автоматически. Следовательно, величина сечений многоядерных реакций сравнивается с величиной сечений атомных процессов!

5. ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНИЗИРОВАННОМ ГЕЛИИ

Из предыдущих параграфов становится очевидным, что гамма кванты не участвуют в многоядерных реакциях. Они просто ионизируют атомы гелия. Потенциал ионизации атома гелия равен 24.59 эВ. При рекомбинации – захвате свободных электронов ионами гелия, образуется смесь из двух "газов" парагелия и ортогелия. Так как плотность уровней у ортогелия в три раза больше, чем у парагелия, то вероятность образования ортогелия в процессе рекомбинации ионов также должна быть в три раза больше. Плотность ортогелия должна быть такой, чтобы магнитные силы притяжения между ними приводили к образованию трансмолекул.

Это достигается тем, что, во-первых, в конденсированном гелии расстояния между его атомами невелики $(3-4) \cdot 10^{-10}$ м, а, во-вторых, порожденные интенсивными потоками гамма квантов комптоновские электроны с большой энергией отдачи создают в гелии "плазменные треки" с высокой плотностью ионов и электронов внутри них.

Чем больше плотность ионов, тем больше плотность ортогелия. Чем больше плотность электронов, тем интенсивнее безизлучательные переходы ортогелия в парагелий. Тем самым, имеется два противоположных процесса. Таким образом, при данной электронной плотности удельной ионизации, по-видимому, имеется оптимальная плотность, давление конденсированного гелия, при которой плотность ортогелия максимальна.

В конденсированных газах "плазменный трек" является той "капсулой", внутри которой изменяются условия протекания физических процессов и структуры атомов и ядер. Использование интенсивных потоков гамма квантов оказывается наиболее подходящим способом для ионизации конденсированного гелия, в силу их высокой проникающей способности через толстые стенки реакционной камеры. Другие радиационные излучения, в совокупности с высокой ионизацией, такой проникающей способностью не обладают. Отметим, что продукты многоядерных реакций: фрагменты, альфа-частицы и протоны имеют более высокую плотность удельной ионизации, чем электроны. Поэтому, они, в свою очередь, порождают вдоль своих треков плазму более плотную, чем электроны. Возможно, тем самым, создаются условия для цепной реакции.

Поскольку многоядерные реакции связаны с ионизацией гелия, следует попытаться зарегистрировать ядерные излучения, например: гамма кванты, пропуская через гелий обычные электрические разряды при давлениях гелия до несколько бар.

Как указывалось в параграфе 3, при слиянии трех ядер гелия в трансмолекуле " ^{12}C " может протекать реакция: $3 \cdot ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + 6 \cdot e^- + \gamma$. Гамма квант с энергией 4438 кэВ в этой реакции излучается в результате распада возбужденного состояния углерода ^{12}C . Гамма квант с такой же

энергией может появиться в результате реакции: $4 \cdot {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} + \gamma$. В многоядерных реакциях с испарением нейтрона (табл. 2) образуются β^+ -радиоактивные изотопы, испускающие позитроны e^+ . В результате аннигиляции позитрона с электроном излучаются два гамма кванта каждый с энергией 511 кэВ.

Следует попытаться зарегистрировать указанные выше гамма кванты при облучении гелия мощным альфа- или бета источником, помещенным внутрь газовой камеры с давлением ~ 1 кбар.

Нельзя исключить, что в экспериментах [17], проводимых в пятидесятые годы прошлого века под руководством Курчатова И.В., и исследующих возможность запуска термоядерных реакций в газовой среде водорода, дейтерия, гелия и их смеси, появление нейтронов и мощного рентгеновского излучения в диапазоне энергий 300-400 кэВ связано с многоядерными процессами. Плазму не надо, даже вредно разогревать.

Естественно, атомы синтезированных химических элементов при их возбуждении электрическими разрядами будут излучать характеристическое излучение в оптическом диапазоне. По этой причине вызывают интерес эксперименты, ставящие своей целью зарегистрировать характеристическое, оптическое излучение как продуктов ядерных реакций, так и, что еще интереснее, трансмолекул.

Все электроны в четных по заряду, легких трансмолекулах связаны в бозоны и имеют энергию связи в трансмолекуле и энергию переходов между возбужденными уровнями в сотни электрон-вольт [15]. Поэтому было бы интересно исследовать нечетные по заряду трансмолекулы, у которых только один электрон не связан в бозон. Возможно, такую трансмолекулу можно получить в смеси водорода и гелия. Действительно, образовавшиеся в результате электрических разрядов трансмолекулы "бериллия ${}^8\text{Be}$ " и "углерода ${}^{12}\text{C}$ " могут соединиться за счет магнитного притяжения и сильных центральных магнитных полей с атомом протия и его ядром (протоном), создав тем самым нечетную трансмолекулу. Магнитные поля атома протия (водорода): в центре $B_0 = 79$ Тл, а на расстоянии $1.2 \cdot R_{\text{H}}$ от центра $B_{\text{RH}} = 16$ Тл. В

случае присоединения протона к трансмолекуле " ${}^8\text{Be}$ " образуется трансмолекула "бора ${}^9\text{B}$ ". При присоединении протона к трансмолекуле " ${}^{12}\text{C}$ " образуется трансмолекула "азота ${}^{13}\text{N}$ ". Трансмолекула "азота ${}^{13}\text{N}$ " менее устойчива, чем " ${}^{12}\text{C}$ ". Она распадается по реакции: ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + p$, возможно, с излучением гамма кванта с энергией 4438 кэВ.

Такие ядерные трансмолекулы представляют собой водородоподобные атомы с тяжелыми многоядерными образованиями в центре. Внешний электрон в них движется по орбитали в сильном магнитном поле, которое создается спаренными электронами. В приближении, когда радиусы орбиталей внешнего электрона " ${}^9\text{B}$ " и "азота ${}^{13}\text{N}$ " равны радиусу атома водорода $R_{\text{H}} = 5.29 \cdot 10^{-11}$ м, вектор магнитной индукции у трансмолекулы " ${}^9\text{B}$ " на R_{H} равен $B_{\text{RH}} = 316$ Тл, у трансмолекулы " ${}^{13}\text{N}$ " – $B_{\text{RH}} = 474$ Тл ($B_r = \frac{P_e \mu_0 \mu_e}{r^3}$, где P_e – количество спаренных электронов [15]). По этим причинам внешние электронные орбитали у трансмолекул " ${}^9\text{B}$ " и " ${}^{13}\text{N}$ " смещаются относительно орбиталей атома водорода в соответствии с поправками для приведенных масс в постоянной Ридберга (3) и расщепляются на два подуровня, согласно формуле (4):

$$R_A = R / (1 + m_e / M_A), \quad (3)$$

$$\Delta E = \pm \mu_e \cdot B_{\text{RH}}, \quad (4)$$

где R_A – постоянная Ридберга для атома с ядром массой M_A , R – постоянная Ридберга, m_e – масса электрона. В нашем случае M_A равна: 2 или 3 ядра ${}^4\text{He}$ плюс протон. В табл. 3 даны основные линии серии Бальмера ($n \rightarrow 2$, n – главное квантовое число) в нанометрах, находящиеся в видимом диапазоне, для атома водорода (λ_{H}), смещенные (λ_{MA}) для трансмолекул " ${}^9\text{B}$ " ($\lambda^9\text{B}$) и

Таблица 3

Линии Бальмера для трансмолекул ${}^9\text{B}$, ${}^{13}\text{N}$

	H_α 3→2	H_β 4→2	H_γ 5→2	H_δ 6→2	H_ϵ 7→2	H_ζ 8→2
λ_{H}	656.279	486.133	434.047	410.174	397.007	388.9
$\lambda^9\text{B}$	655.961	485.898	433.837	409.976	396.815	388.7
$\lambda^9\text{B}$	655.853 655.870 656.052 655.069	485.844 485.952	433.794 433.880	409.937 410.015	396.779 396.851	388.67 388.73
$\lambda^{13}\text{N}$	655.952	485.890	433.830	409.969	396.809	388.7
$\lambda^{13}\text{N}$	655.759 655.816 656.088 656.114	485.809 485.971	433.765 433.895	409.911 410.027	396.755 396.863	388.65 388.75

^{13}N ($\lambda^{13}\text{N}$) и расщепленные для трансмолекул ^9B ($\lambda^9\text{B}$) и ^{13}N ($\lambda^{13}\text{N}$). Смещения переходов, согласно (3), рассчитывались по формуле:

$\lambda_{\text{MA}} = \lambda_{\text{H}} M_{\text{H}} (M_{\text{A}} + m_{\text{p}}) / M_{\text{A}} (M_{\text{H}} + m_{\text{p}})$, где M_{H} – масса протона.

Все уровни внешнего электрона трансмолекул ^9B и ^{13}N не просто смещаются, они расщепляются, согласно (4), на два состояния. Для трансмолекулы ^9B расщепление основного состояния ($n = 1$) по энергии равно $\Delta E = \pm 1.83 \cdot 10^{-2}$ эВ, для трансмолекулы ^{13}N расщепление основного состояния равно $\Delta E = \pm 2.74 \cdot 10^{-2}$ эВ (4).

Поскольку радиусы электронных орбиталей водорода $r_n = \hbar \cdot n^2 / 2 \cdot m_e^2$, то $r_2 = 2.1 \cdot 10^{-10}$ м, $r_3 = 4.8 \cdot 10^{-10}$ м. Магнитные поля у трансмолекулы "бора ^9B " на r_2 и r_3 равны $B_{r_2} = 4.91$ Тл и $B_{r_3} = 0.43$ Тл, у трансмолекулы "азота ^{13}N " – $B_{r_2} = 7.37$ Тл и $B_{r_3} = 0.65$ Тл. Соответственно, расщепления уровней r_2 и r_3 составят для трансмолекулы ^9B $\Delta E_{r_2} = \pm 2.85 \cdot 10^{-4}$ эВ и $\Delta E_{r_3} = \pm 2.51 \cdot 10^{-5}$ эВ; для трансмолекулы ^{13}N расщепления уровней на r_2 и r_3 составят $\Delta E_{r_2} = \pm 4.26 \cdot 10^{-4}$ эВ и $\Delta E_{r_3} = \pm 3.76 \cdot 10^{-5}$ эВ. Следовательно, в спектре ($3 \rightarrow 2$) будут наблюдаться 4 линии – дублеты N_{α} расщепленных уровней r_2 и r_3 . Поскольку на орбиталях с $n \geq 4$ магнитные поля, создаваемые спаренными электронами, незначительны, то в спектре будут наблюдаться две линии для переходов: N_{β} , N_{γ} и др. Из табл. 3 видно, что расстояния между расщепленными состояниями существенны и должны хорошо регистрироваться спектральными приборами.

Таким образом, есть относительно простые ядерные и спектральные методы, с помощью которых можно попытаться зарегистрировать в электрических разрядах протекание многоядерных реакций в гелии или смеси гелия с водородом при их давлении до несколько бар.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При облучениях конденсированного гелия при давлениях 1.1 и 3.05 кбар тормозными гамма квантами с максимальной энергией 10 МэВ, в объеме реакционной камеры обнаружены химические элементы, отсутствующие в ней до начала облучений.

Появление "посторонних" химических элементов объясняется многоядерными реакциями. Многоядерные реакции протекают благодаря образованию ядерных трансмолекул, которые состоят из нескольких ядер гелия. Первичные ядерные трансмолекулы "бериллия ^8Be " с электронами, попарно связанными в бозоны с $S = 1$, создаются путем слияния двух атомов ортогелия. Более тяжелые трансмолекулы образуются путем слияния ортогелия и менее тяжелых трансмолекул друг с другом.

Атомы ортогелия появляются в гелии в результате его ионизации гамма излучением и последующей рекомбинацией возникших ионов. Таким образом, сечение низкоэнергетических, многоядерных реакций напрямую зависит от объемной плотности ортогелия, т.е. зависит от сечений атомных процессов.

Следует провести эксперименты, нацеленные на регистрацию многоядерных реакций путем пропускания электрических разрядов через гелий или через смесь гелия с водородом при их давлении в несколько бар. В случае их регистрации, предлагается вернуться к идее производства энергии в электрических разрядах в конденсированных легких газах: водороде, дейтерии, гелии и в их смесях [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuznetsov VD, Mishinsky GV, Penkov FM, Arbuzov VI, Zhemenik VI. Low energy transmutation of atomic nuclei of chemical elements. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 2003, 28(2):173-214.
2. Mishinsky GV, Kuznetsov VD. Element distribution in the products of low energy transmutation. *Nucleosynthesis. Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 2008, 33(3-4):331-356; *Материалы 14-й Российской конф. по холодной трансмутации ядер химических элементов*, 2008, М., с. 79-97.
3. Urutskoev LI, Filippov DV. On the possibility of nuclear transformation in low-temperature plasma from the viewpoint of conservation laws. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 2004, 29(3):1187-1205.
4. Мьшинский ГВ. Трансатомы – трансядра, и их свойства. *Материалы 18-й Российской*

- конференции по холодной трансмутации ядер химических элементов, 2012, М., с. 94-106.
5. Didyk AYu, Wiśniewski R. Nuclear reactions, induced by gamma quanta, in palladium saturated with deuterium surrounded by dense deuterium gas. *Europhys. Lett*, 2012, 99(2):22001.
 6. Дидык АЮ, Вишневецкий Р. Результаты по облучению алюминия и гомогенного сплава γMn_2 γ -квантами с энергией 23 МэВ в атмосфере молекулярного дейтерия при давлении 2 кбар. *Письма в ЭЧАЯ*, 2014, 11, №3 (187):284-298.
 7. Дидык АЮ. Ядерные реакции синтеза и деления химических элементов и образование новых структур в плотных газах H_2 , D_2 и He при облучении 10 МэВ-ными γ -квантами. *Физика и химия обработки материалов*, 2015, 2:5-19.
 8. Didyk AYu, Wiśniewski R and Wilczynska-Kitowska T. The carbon-based structures synthesized through nuclear reactions in helium at 1.1 kbar pressure under irradiation with braking γ -rays of 10 MeV threshold energy. *Europhys. Lett.*, 2015, 109(22001):1-6.
 9. Дидык АЮ, Вишневецкий Р. Свойства структур на основе углерода, синтезированных в ядерных реакциях в гелии при давлении 1.1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. *Письма в ЭЧАЯ*, 2016, 13, №4 (202):777-792.
 10. Дидык АЮ, Вишневецкий Р. Ядерные реакции, синтез химических элементов и новых структур в плотном гелии при давлении 1.1 кбар под действием облучения тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. *Препринт P15-2014-50*, ОИЯИ, Дубна, 2014, 40 с.
 11. Дидык АЮ, Вишневецкий Р. Синтез новых структур и образование химических элементов в плотном гелии при давлении 3.05 кбар при облучении тормозными γ -квантами с пороговой энергией 10 МэВ. *Препринт P15-2014-87*, ОИЯИ, Дубна, 2014, 23 с.
 12. Дидык АЮ, Гульбекян ГГ, Мышинский ГВ, Сабельников АВ. Синтез микрочастиц сложного состава в камере высокого давления ксенона (550 бар) при облучении тормозным излучением с максимальной энергией 10 МэВ. *Препринт P15-2016-19*, ОИЯИ, Дубна, 2016, 49 с.
 13. Kalman P, Keszthelyi T. Lattice effect in solid state internal conversion. *Phys. Rev. C*, 2009, 79(0316026):1-4.
 14. Heisenberg W. Über die Spektren von Atomsystemen mit zwei Elektronen. *Z. Phys.*, 1926, 39(7):499-518.
 15. Мышинский ГВ. Магнитные поля трансатомов. Спиновый-нуклидный-электронный конденсат. *Журнал формирующихся направлений науки*, 2017, 15-16(5):6-25.
 16. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. *Теория поля*. М., Наука, 1973, 138 с.
 17. Курчатова ИВ. О возможности создания термоядерных реакций в газовом разряде. *УФН*, 1956, 59(4):603-618.
- Мышинский Геннадий Владимирович**
научный сотрудник
Объединенный институт ядерных исследований
6, ул. Жолио-Кюри, г. Дубна, Моск. обл. 141980, Россия
mysh@jinr.ru.

MULTINUCLEAR REACTIONS IN CONDENSED HELIUM**Gennady V. Mishinsky**

Joint Institute for Nuclear Research, <http://www.jinr.ru/>
6, str. Joliot Curie, Dubna, Moscow Region 141980, Russian Federation
mysh@jinr.ru

Abstract. Helium high-pressure chambers filled with gaseous helium at pressures of about 1.1 and 3 kbar were irradiated by bremsstrahlung gamma rays with a maximum energy of 10 MeV during $\sim 10^5$ s. Inside the reaction chambers "extraneous" chemical elements are found which were absent prior to the onset of irradiation. To explain the appearance of synthesized elements, a new mechanism is proposed: multinuclear reactions. These reactions are due to the creation of nuclear molecules which consist of several helium nuclei. Nuclear molecules are formed by the fusion of several orthohelium atoms. It is proposed to execute experiments aimed at recording multinuclear reactions by passing electric discharges through helium or through a mixture of helium and hydrogen at a pressure of several bars.

Keywords: condensed matter nuclear science, low energy transmutation, multinuclear reactions, nuclear molecules, Bose–Einstein condensate

PACS: 03.75.Mn; 03.75.Nt; 25.70.Jj; 31.15.xg

Bibliography – 17 references

Received 25.04.2017

RENSIT, 2017, 9(1):94-105

DOI: 10.17725/rensit.2017.09.094
