

ГЕОХИМИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

К 150-летию таблицы Д.И. Менделеева

УДК 550.4

Газовый разряд в плазме и синтез ядер

Ю.П. Петров, В.И. Костицын, А.В. Горожанцев

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева 15. E-mail: petrov-1941@bk.ru

(Статья поступила в редакцию 1 ноября 2019 г.)

Разработана физическая модель газовых разрядов являющихся одним из четырех физических процессов, приводящих к образованию тяжелых элементов. Показана возможность синтеза тяжелых элементов в лабораторных условиях. Результаты исследования дают основание полагать, что на ранних этапах эволюции Вселенной причиной образования тяжелых элементов из водородно-гелиевой среды являются газовые разряды – молнии.

Ключевые слова: *плазма, ядро, электрон, изотоп, дефект массы, ядерные силы, кулоновские силы, газовый разряд, энергия, синтез.*

DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.362

Введение

По современным представлениям, на раннем этапе эволюции Вселенной была водородно-гелиевая плазма, содержащая, среди прочего, электроны. Предполагается, что из этой простейшей плазмы «...очень сложным способом, непонятным до сих пор, образовались тяжелые элементы...» (Трухин, 2005).

Согласно общеизвестной ядерной модели атома Резерфорда любой химический элемент состоит из ядра, вокруг которого по замкнутым орбитам движутся электроны. Ядра представлены положительно заряженными протонами и нейтральными нейтронами, которые связаны между собой ядерными силами взаимного притяжения. Отрицательно заряженные электроны взаимодействуют с ядрами электрическими силами (кулоновские силы). Исследования показали, что ядерные силы в 100 раз превышают электрические (Трофимова, 2006). Поэтому можно считать, что атомные ядра являются наиболее устойчивыми образованиями.

Под плазмой понимают газ, в котором концентрация положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов

одинакова. При остывании плазмы присоединение электронов к ядрам приводит к созданию атомов – химических элементов.

Цель исследования

Ядерные силы на два порядка больше электрических, поэтому будем считать, что ядро – «первично», атом – «вторичен». Образование тяжелых ядер приводит к созданию тяжелых элементов.

Водородно-гелиевая плазма содержит лёгкие ядра. Ядра одноименно заряжены. Для слияния легких ядер и образования из них более тяжелых (синтез ядер) необходима энергия внешних сил, которая сближает ядра до расстояния, когда начинают действовать ядерные силы.

Энергия внешних сил идёт на преодоление электростатического барьера, обусловленного кулоновскими силами отталкивания одноименно заряженных ядер.

Экспериментально доказано, что источниками таких внешних сил являются следующие процессы: 1) ядерный взрыв; 2) газовый разряд; 3) импульс лазерного излучения;

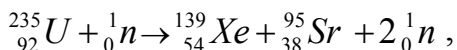
4) бомбардировка пучком частиц, создаваемых ускорителями (Физический ..., 1983).

Целью исследований в данной публикации является разработка физической модели синтеза ядер при газовом разряде. В основе разрабатываемой модели лежит закон сохранения массы и энергии.

В качестве примера использования закона сохранения массы и энергии рассмотрим реакцию деления тяжелого ядра и известную реакцию синтеза лёгких ядер. Методику расчета этих реакций применим при рассмотрении газовых разрядов в плазме.

Проведение исследования

Ядерный взрыв – это взрыв, вызванный выделением внутриядерной энергии в реакциях деления тяжелых ядер. Рассмотрим реакцию деления ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$ (Трофимова, 2006)



где $^{235}_{92}\text{U}$ – изотоп урана; $^{139}_{54}\text{Xe}$ – изотоп ксенона; $^{95}_{38}\text{Sr}$ – изотоп стронция; ${}^1_0\text{n}$ – нейтрон.

Нейтроны при делении ядра имеют сравнительно малую энергию ($\approx 2 \text{ МэВ}$), поэтому далее их энергия учитываться не будет.

Закон сохранения массы и энергии для этой реакции имеет вид

$$E_1 = c^2 [M_{^{235}_{92}\text{U}} - (M_{^{139}_{54}\text{Xe}} + M_{^{95}_{38}\text{Sr}})] = c^2 \Delta M_1,$$

где E_1 – энергия, выделяемая в реакции; M – массы изотопов; ΔM_1 – дефект массы в данной реакции; c – скорость света в вакууме.

Проведем вычисления, пользуясь «Справочными материалами» приведёнными ниже (таблица):

$$M_{^{235}_{92}\text{U}} = 235,04393 \text{ а.е.м.};$$

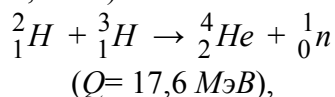
$$M_{^{139}_{54}\text{Xe}} + M_{^{95}_{38}\text{Sr}} = 233,83815 \text{ а.е.м.};$$

$$\Delta M_1 = 1,20578 \text{ а.е.м.}$$

Энергия этой реакции

$$E_1 = c^2 \Delta M_1 = 1,79953 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \approx \approx 1123 \text{ МэВ}. \quad (1)$$

Рассмотрим реакцию синтеза лёгких ядер (Трофимова, 2006)



где ${}^2_1\text{H}$ – изотоп водорода (дейтерий); ${}^3_1\text{H}$ – изотоп водорода (тритий); ${}^4_2\text{He}$ – изотоп гелия; Q – количество теплоты, выделяемой в этой реакции.

Закон сохранения массы и энергии для этой реакции имеет вид

$$E_2 = c^2 [(M_{{}^2_1\text{H}} + M_{{}^3_1\text{H}}) - (M_{{}^4_2\text{He}} + M_{{}^1_0\text{n}})] = c^2 \Delta M_2,$$

где E_2 – энергия, выделяемая в реакции; M – массы изотопов и нейтрона; ΔM_2 – дефект массы в данной реакции.

Проведем вычисления, пользуясь данными, приведёнными ниже в таблице:

$$M_{{}^2_1\text{H}} + M_{{}^3_1\text{H}} = 5,03015 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{{}^4_2\text{He}} + M_{{}^1_0\text{n}} = 5,01127 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta M_2 = 0,01888 \text{ а.е.м.}$$

Энергия данной реакции

$$E_2 = c^2 \Delta M_2 = 2,81812 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} \approx \approx 17,6 \text{ МэВ}. \quad (2)$$

Эта энергия численно равна количеству теплоты рассматриваемой реакции и определяет кинетическую энергию изотопа гелия и нейтрона.

Энергия E_1 (1) по аналогии с энергией E_2 (2) выделяется в виде теплоты, которая эквивалентна кинетической энергии продуктов распада ядра урана. Энергия $E_1 \gg E_2$ и сообщает ядрам изотопов водорода при столкновении необходимую кинетическую энергию, обеспечивающую сближение ядер и их синтез. Поэтому реакция деления используется как «запал» в термоядерной бомбе, начинкой которой являются изотопы водорода.

Более детальные исследования по определению температуры деления $^{235}_{92}\text{U}$ и температуры синтеза лёгких ядер водорода представлены в других работах (Петров, Карнишин, 2016; Петров, Данилов, 2016).

В статье А.Л. Арцимовича и др., посвященной управляемому термоядерному синтезу (Физический ..., 1983), основные условия реакции синтеза определяются так: «Для осуществления реакции синтеза ядра должны быть сближены на расстояние порядка 10^{13} м , после чего процесс их слияния происходит с заметной вероятностью за счет туннельного эффекта. Для преодоления потенциального барьера (кулоновских сил. – Ю.П.) сталкивающимся протонам должна быть со-

общена энергия ≈ 10 кэВ». Однако авторы некоторых работ считают, что радиус действия ядерных сил $10^{-14} \div 10^{-15}$ м (Трофимова, 2006).

В статье В.А. Панькова и Б.П. Кузьмина (2008) описана экспериментальная методика синтеза элементов из воды, приведенной в состоянии плазмы при электрическом разряде. Наиболее полный обзор экспериментальных и теоретических работ по низкоэнергетическому разряду и синтезу ядер представлен группой исследователей Казанского университета (Ивойлов и др., 2009). В нём на основании проведенных экспериментов делается ряд выводов, из которых можно выделить следующие: 1) «... о появлении новых элементов после проведения электро-разряда»; 2) «... все химические элементы, синтезированные в процессе разряда, являются стабильными изотопами». Выводы, сделанные по результатам этих экспериментальных работ, учтены в наших исследованиях.

Рассмотрим физический процесс синтеза ядер и по полученным результатам построим его физическую модель.

Электрический разряд в газах, образующий плазму при высоких температурах, происходит под действием сил электрического поля. Это поле создается в камере, где производится газовый разряд. Работа A , совершаемая силами электрического поля, может быть представлена следующим образом:

$$A = z \cdot q_e \cdot \Delta\varphi = q_z \cdot \Delta\varphi, \quad (3)$$

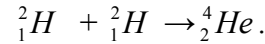
где z – атомный номер ядра; q_e – заряд электрона; $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения заряда. Чтобы два ядра с атомными номерами z_1 и z_2 слились на расстоянии синтеза $(r_c)_{q_1, q_2}$ необходимо, чтобы энергия $(W_c)_{q_1, q_2}$ этих ядер, при которой совершается синтез, была сравнима с энергией электростатического отталкивания между ними.

Энергия электростатического отталкивания двух ядер с зарядами $q_1(z_1, q_e)$ и $q_2(z_2, q_e)$ может быть представлена как потенциальная энергия $(W_{II})_{q_1, q_2}$ заряда $q_1(z_1, q_e)$ в поле заряда $q_2(z_2, q_e)$:

$$(W_{II})_{q_1, q_2} = \frac{z_1 z_2 q_e^2}{4 \pi \varepsilon_0 (r_c)_z} = (W_c)_{q_1, q_2}, \quad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная.

Рассмотрим электрический разряд в камере, содержащей изотопы водорода 2_1H :



Закон сохранения массы и энергии для этой реакции имеет вид

$$E_3 = c^2[(M_{{}^2_1H} + M_{{}^2_1H}) - M_{{}^4_2He}] = c^2 \Delta M_3,$$

где E_3 – энергия, выделяемая в реакции; M – массы изотопов; ΔM_3 – дефект массы.

Проведем вычисления, пользуясь «Справочными материалами» (таблица):

$$M_{{}^2_1H} + M_{{}^2_1H} = 4,02820 \text{ а.е.м.}$$

$$M_{{}^4_2He} = 4,00260 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta M_3 = 0,02560 \text{ а.е.м.}$$

Энергия этой реакции

$$E_3 = c^2 \Delta M_3 = 3,82080 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Эта энергия может быть измерена при торможении ядра гелия ($z_1 = 2$) с разностью потенциалов $(\Delta\varphi_{\text{тор}})_{{}^4_2He}$:

$$2q_e(\Delta\varphi_{\text{тор}})_{{}^4_2He} = E_3,$$

$$(\Delta\varphi_{\text{тор}})_{{}^4_2He} = E_3/2q_e = 1,2 \cdot 10^7 \text{ В.} \quad (5)$$

Энергия пропорциональна силе, а ядерные силы на два порядка больше электрических сил, поэтому можно предполагать, что энергия $(W_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H}$ в 100 раз меньше E_3 :

$$(W_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H} = E_3/100 \approx 3,82 \cdot 10^{-14} \text{ Дж.} \quad (6)$$

Используя формулу (4), с учетом формулы (6) найдем расстояние $(r_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H}$:

$$(r_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H} = \frac{z_1 z_2 q_e^2}{4 \pi \varepsilon_0 (W_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H}} = 6,04 \cdot 10^{-15} \text{ м,}$$

где $z_1 = z_2 = 1$ для изотопов 2_1H . Из формулы (3), считая, что работа $A = (W_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H}$, найдем разность потенциалов $(\Delta\varphi_{\text{тор}})_{{}^2_1H, {}^2_1H}$, необходимую для синтеза ядер ${}^2_1H, {}^2_1H$:

$$2q_e(\Delta\varphi_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H} = (W_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H},$$

$$(\Delta\varphi_c)_{{}^2_1H, {}^2_1H} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ В} = 120 \text{ кВ.}$$

Полученный результат в 100 раз меньше разности потенциалов $(\Delta\varphi_{\text{тор}})_{\frac{4}{2}\text{He}}$. Для приобретения энергии, необходимой при синтезе ядер, на долю каждого сталкивающегося ядра необходима разность потенциалов вдвое меньше $(\Delta\varphi_c)_{\frac{2}{1}\text{H},\frac{2}{1}\text{H}}$, т.е. 60 кВ.

Рассмотрим реакцию синтеза ядер изотопов азота ${}^{14}_7\text{N}$ с образованием изотопа кремния: ${}^{14}_7\text{N} + {}^{14}_7\text{N} = {}^{28}_{14}\text{Si}$.

Расчеты проводились по аналогии с расчетами синтеза ядер водорода ${}^2_1\text{H}, {}^2_1\text{H}$. С учётом данных таблицы дефект массы $\Delta M_4 = 0,02922 \text{ а.е.м.}$. Энергия этой реакции

$$E_4 = c^2 \Delta M_4 = 4,36084 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Соответственно энергия синтеза $(W_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}} = E_4/100 = 4,36084 \cdot 10^{-14} \text{ Дж.}$

Расстояние $(r_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}}$, нужное для синтеза:

$$(r_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}} = \frac{z_1 z_2 q_e^2}{4\pi \epsilon_0 (W_c)} = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ м.}$$

Здесь $z_1 = z_2 = 7$ для изотопов ${}^{14}_7\text{N}$. Разность потенциалов $(\Delta\varphi_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}}$, необходимых для синтеза ядер:

$$(\Delta\varphi_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}} \approx 19 \text{ кВ.} \quad (8)$$

Численные значения $(r_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}}$ (7) и $(\Delta\varphi_c)_{\frac{14}{7}\text{N},\frac{14}{7}\text{N}}$ (8) по порядку величин, необходимых для ядерного синтеза, соответствуют данным А.П. Арцимовича и др. (Физический ..., 1983).

Результаты дальнейших исследований показали, что синтез стабильных ядер водорода, гелия, азота, кислорода даёт возможность создавать и другие тяжелые ядра таблицы Д.И. Менделеева. В процессе исследований расчеты проводились для каждого элемента от водорода до меди. При этом разности потенциалов $\Delta\varphi_c$, необходимых для синтеза ядер в газовом разряде, находились в интервале значений от ≈ 10 до $\approx 50 \text{ кВ}$. Такую разность потенциалов всегда можно создать в лабораторных условиях, следовательно, можно создать и тяжелые элементы.

Выводы

Предложена физическая модель синтеза лёгких ядер при газовом разряде.

В основе разработанной модели лежит закон сохранения массы и энергии. В соответствии с этим законом и учитывая, что ядерные силы в 100 раз больше электрических, определена разность потенциалов $\Delta\varphi_c$ электрического поля, необходимая для синтеза лёгких ядер.

Атмосферу Земли можно представить как «искровую камеру», в которой $\Delta\varphi_c$ создаётся разрядами молний. Разряд происходит в большом диапазоне напряжений. Результатом взаимодействия молний с атмосферой, водой океанов и морей можно предполагать образование железомарганцевых конкреций.

При этом в меньших количествах конкреции содержат почти все элементы таблицы Д.И. Менделеева.

Согласно расчетам при образовании марганца и железа необходимая разность потенциалов $\Delta\varphi_c$ одинакова и составляет 25 кВ.

Справочные материалы

Масса ядра	Значение, а.е.м.	Масса ядра	Значение, а.е.м.	Масса ядра	Значение, а.е.м.
	2,01410	$M_{\frac{235}{92}\text{U}}$	235,04393		4,002603
$M_{\frac{2}{1}\text{H}}$	3,01605	$M_{\frac{139}{54}\text{Xe}}$	138,91879	$M_{\frac{14}{7}\text{N}}$	14,00307
$M_{\frac{1}{0}\text{n}}$	1,00866	$M_{\frac{95}{38}\text{Sr}}$	94,91936	$M_{\frac{28}{14}\text{Si}}$	27,97692
Символ	Значение	Единица	Символ	Значение	Единица
c	$2,99792458 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	ϵ_0	$8,85419 \cdot 10^{-12}$	ф/м
q_e	$1,602189 \cdot 10^{-10}$	Кл	-	-	-
1 а.е.м. = $1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$			1 эВ = $1,60217 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$		

Библиографический список

Арцимович А.Л. и др. Управляемый термоядерный синтез // Физический энциклопедический словарь. 1983. С.784–787.

Ивойлов Н.Г., Бикчантаев М.М., Стребков О.А., Халабуда Ю.Э., Гильмутдинов А.Х., Волошин А.В., Протасов А.В. Трансформация ядер в условиях электроразряда // Ученые записки Казанского государственного университета. Сер. физ.-матем. науки. 2009. Т. 151, кн. 3. С. 52–62.

Паньков В.А., Кузьмин Б.П. Демонстрационная методика синтеза элементов из воды в плазме электрического разряда // Актуальные проблемы современной науки. 2008. № 5(44). С.112–116.

Петров Ю.П., Данилов Ю.Л. Маркова И.А. Физические основы простейших термоядерных реакций синтеза // Современное состояние и

пути развития системы подготовки специалистов силовых структур / ПВИ ВВ МВД РФ. Пермь, 2016. С.191–195.

Петров Ю.П., Карнишин С.Г., Николаева Т.И. Щербинина Т.А. Теоретическая модель термоядерных реакций синтеза и деления тяжелых ядер // Подготовка специалистов силовых структур. Проблемы, перспективы, тенденции развития / ПВИ ВВ МВД РФ. Пермь, 2016. С.70–183.

Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов, II-е изд. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 560 с.

Трухин И., Показавев К.В., Кунцын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.

Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

Gas discharge in plasma and nuclear synthesis

Yu. P. Petrov, V. I. Kostitsyn, A. V. Gorozhancev

Perm State University

15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: petrov-1941@bk.ru

A physical model of gas discharges, which are one of the four physical processes leading to the formation of heavy elements, is proposed. The possibility of synthesis of heavy elements in laboratory conditions is shown. The results of the study suggest that in the early stages of the evolution of the Universe, the cause of the formation of heavy elements from the hydrogen-helium medium is gas discharges-lightning.

Keywords: *plasma, nucleus, electron, isotope, mass defect, nuclear forces, Coulomb forces, gas discharge, mass defect, energy, synthesis.*

References

Artsimovich L. A. et al. 1983. Upravlyayemyy termoyadernyy sintez [Controlled thermonuclear fusion]. Physical encyclopedic dictionary. p. 784 – 787 (in Russian).

Ivoylov. N.G., Bikchaptayev M.M., Strebkov O.A., Halabuda Yu.E., Gilmutdinov A.Kh., Voloshin A.V., Protasov A.V. 2009. Transformatsiya yader v usloviyakh elektro razryada [Transformation of nuclei in an electric discharge]. Scientific notes of Kazan State University, Vol. 151, Book 3, p. 52-62 (in Russian).

Pankov V. A., Kuzmin B. P. 2008. Demonstration method of synthesis from water in plasma of electric discharge [Demonstratsionnaya metodika sinteza iz vody v plazme elektricheskogo razryada] // Actual problems of modern science. Вып. 5 (44), p. 112-116 (in Russian).

Petrov Yu.P., Karnishin S.G., Nikolaeva T.I. Shcherbinina T.A. 2016. Teoreticheskaya model' termoyadernykh reaktsiy sinteza i deleniya tyazhelykh yader [Theoretical model of thermonuclear

reactions of synthesis and fission of heavy nuclei] // Training of specialists of power structures. Problems, prospects, development trends / PVI VV MVD RF. Perm, p. 70-183 (in Russian).

Petrov Yu.P., Danilov Yu.L. Markova I.A. 2016. Fizicheskiye osnovy prosteyshikh termoyadernykh reaktsiy sinteza [Physical foundations of the simplest thermonuclear fusion reactions] // Current state and development paths of the training system for power structures specialists / PVI VV MVD RF. Perm, p.191-195 (in Russian).

Trofimova T.I. 2006. Kurs fiziki: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Physics course: textbook for universities]. M: Ed. Center "Academy", p. 560 p. (in Russian).

Trukhin I., Pokazayev KV, Kunitsyn V.E. 2005. Obshchaya i ekologicheskaya geofizika [General and environmental geophysics]. M.: Fizmatlit, - 576 p. (in Russian).

Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar [Physical encyclopaedic dictionary] 1983/ Chief Editor A.M. Prokhorov. M.: Soviet encyclopedia, 928 p. (in Russian).