

# **ПРИРОДА**

№ 10, 2005 г.

**Петров Ю.В.**

## **Реактор Окло и изменение фундаментальных констант**

© “Природа”

**Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции**



**Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”**  
(грант РФФИ 03-07-90415)

*[vivovoco.nns.ru](http://vivovoco.nns.ru)  
[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[vivovoco.ibmh.msk.su](http://vivovoco.ibmh.msk.su)*

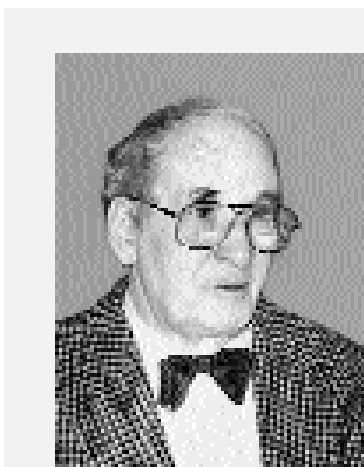
# Реактор Окло и изменение фундаментальных констант

Ю.В.Петров

Открытие в Габоне (Западная Африка) природного ядерного реактора было, пожалуй, одним из самых захватывающих событий за всю историю реакторной физики с тех пор, как Энрико Ферми с сотрудниками в 1942 г. осуществил самоподдерживающуюся цепную реакцию деления искусственным путем.

## История открытия и геологическая история

Первым, кто сказал в начале лета 1941 г., что осуществить цепную ядерную реакцию миллиард лет назад было бы намного проще, был Я.Б.Зельдович. В то время он размышлял над возможностью получения цепной реакции деления в гомогенной смеси природного урана с обычной водой. Его (совместные с Ю.Б.Харитоновым) расчеты показывали, что для этого надо обогатить природный уран примерно вдвое. Миллиард лет назад относительная концентрация легкого изотопа урана была значительно выше, и в то время цепная реакция в упомянутой смеси могла бы идти. «Яков Борисович ничего не сказал тогда о возможности естественного реактора,



*Юрий Викторович Петров, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель группы физики ядерных реакторов Петербургского института ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН. Лауреат международной премии им.Александра фон Гумбольдта (1992). Область научных интересов связана с ядерной физикой и физикой ядерных реакторов.*

но его рассуждения полностью подводят нас к естественному реактору, открытому в Габоне в 1972 г.», — вспоминает И.И.Гуревич [1]. Позже, в 1957 г., Г.Вэзерилл и М.Ингрэм пришли к той же мысли. Исходя из современной концентрации урана в урановой смолке, они заключили: около 2 млрд лет назад, когда доля  $^{235}\text{U}$  превышала 3%, условия могли приближаться к критическим. Тремя годами позже П.Куроода показал, что если в далеком прошлом в подобных месторождениях присутствовала вода, то коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде  $K_\infty$  мог превзойти единицу и могла начаться самопроизвольная цепная реакция. Однако до 1972 г. никаких следов работы природного реактора не было обнаружено.

7 июня 1972 г. во время рутинного масс-спектрометрического анализа на заводе в Пьерлатте (Франция), производящем обогащенное топливо, Х.Бузигу обнаружил, что в исходном гексафториде урана содержится  $\zeta_5 = 0.717\%$  атомов  $^{235}\text{U}$  вместо 0.720%, обычных для земных пород, метеоритов и образцов лунного грунта [2]. Французский Комиссариат по атомной энергии начал расследование этой аномалии. Явление получило название «Феномен Окло». Результаты его изучения были опубликованы в трудах двух симпозиумов МАГАТЭ [3, 4].

Простейшая гипотеза о загрязнении урана обедненной рудой (так называемыми обедненными хвостами) проверки не выдержала. Через многочисленные ступени производственной цепочки аномалия была прослежена до рудообогатительной фабрики Мунана вбли-

зи Франсвиля (Габон). Исходная руда поступала туда из месторождения Окло. Изотопный анализ богатых ураном образцов показал значительное обеднение изотопом  $^{235}\text{U}$ , а также отклонение от природного распределения в сторону увеличения доли именно тех редкоземельных изотопов, которые являются продуктами деления [5]. Это и послужило доказательством существования в далеком прошлом самопроизвольной цепной реакции. На само доказательство ушло менее трех месяцев. Из ретроспективного анализа документов, а также проб обогатительной фабрики в Мунане следовало, что в 1970—1972 гг. на переработку поступала руда, которая иногда содержала до 20% урана с долей  $^{235}\text{U}$ , сниженной до 0.64%. С учетом того, что руда при добыче перемешивалась, концентрация урана в отдельных образцах могла быть еще выше, а обеднение сильнее. Всего обедненного урана, принявшего участие в цепной реакции, было добыто более 700 т, причем незамеченный первоначально дефицит составил 200 кг  $^{235}\text{U}$ !

По соглашению с правительством Габона компания по разработке урановых руд Франсвиля согласилась приостановить добычу в районе расположения природного реактора. Франко-габонская группа во главе с Р.Нодэ приступила к систематическому изучению феномена Окло. Многочисленные образцы, полученные в результате бурения, были разосланы для анализа в различные лаборатории мира. Они позволили воссоздать картину работы природного реактора деления в эпоху докембрия.

Как показал радиогенный уран-свинцовый анализ, месторождение Окло с концентрацией урана около 0.5% в осадочном слое образовалось  $2.1 \cdot 10^9$  лет назад. В эту эпоху происходил важный биологический процесс: переход прокариотов — клеток без ядра — к более сложным одноклеточным эвкариотам, имеющим ядро. Эвкариоты начали интенсивно поглощать углекислый газ, насыщая атмосферу кислородом. Под действием кислорода оксиды урана стали переходить в более кислородосодержащие, растворимые в воде соединения. Дожди смывали их в древнюю реку. В ее устье образовывался осадочный слой песчаника, богатый ураном, толщиной 4—10 м и площадью  $600 \times 900 \text{ м}^2$ . В почти стоячей воде дельты реки более тяжелые частички урана оседали на дно быстрее, в результате чего происходило обогащение песчаного слоя ураном до 0.5% (как на обогатительной фабрике). После своего образования богатый ураном слой, покоящийся на базальтовом ложе, был засыпан осадочными породами и опустился на глубину около 4 км. Давление на него составляло около 100 МПа, из-за этого он растрескивался, и в трещины попадали грунтовые воды. Под действием фильтрационных вод, находящихся под большим давлением, и в результате не до конца выясненных процессов образовывались линзы со сверхбогатым со-

держанием урана (до 20—60% в руде). Длина линз была от 10 до 20 м, а толщина порядка 1 м; именно в них происходила цепная реакция. После ее завершения рудное тело подвергалось сложным тектоническим изменениям. Наконец, несколько миллионов лет назад оно поднялось на поверхность и стало доступным для разработки. В ходе изысканий сразу же были обнаружены шесть очагов реакции на расстоянии десятков метров (рис.1, 2) [6]. Всего были найдены остатки 17 активных зон, отделенных друг от друга.

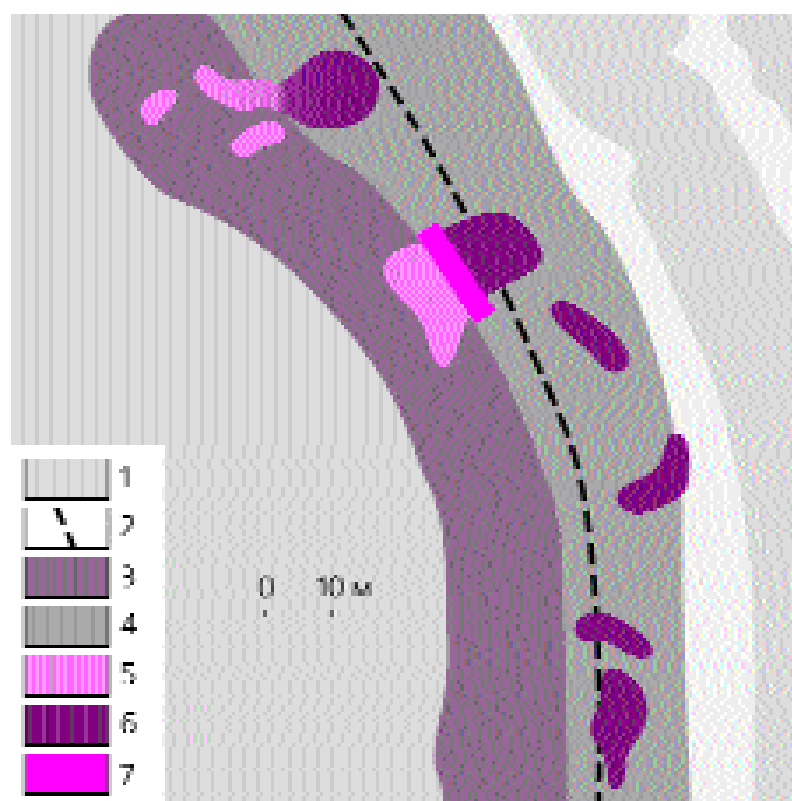


Рис.1. Расположение активных зон реактора Окло. 1 — песчаник, 2 — граница добытой руды, 3 — склон карьера, 4 — дно карьера, 5 — уничтоженная часть реактора, 6 — разведанная часть реактора, 7 — участок, предназначенный для сохранения.

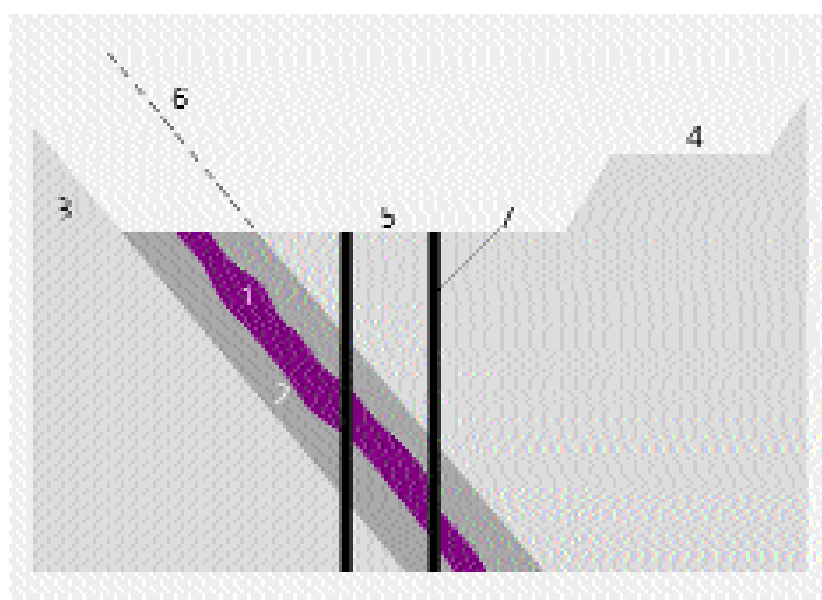


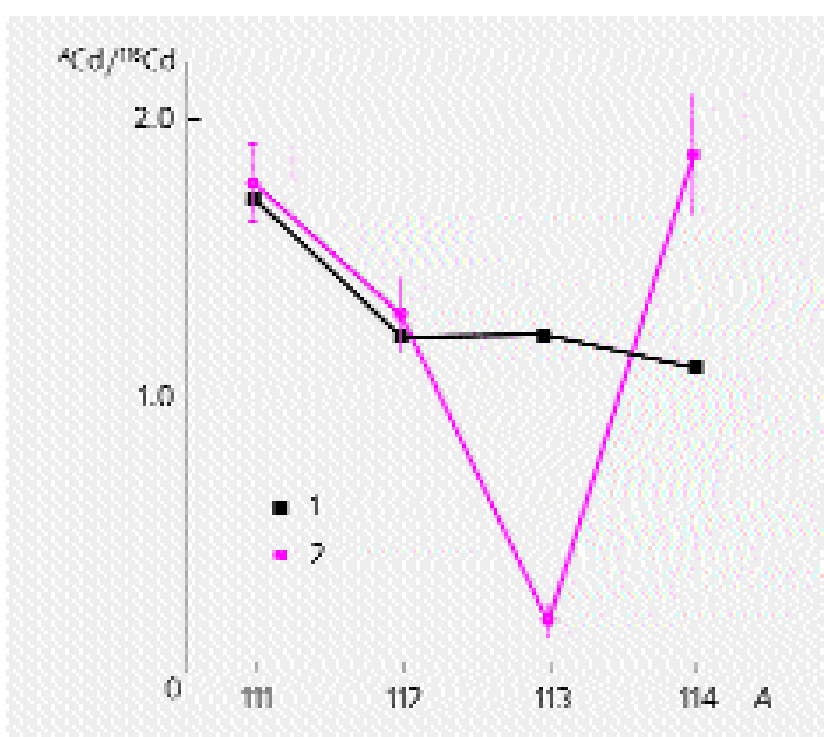
Рис.2. Схематический разрез карьера. 1 — богатая ураном жила, 2 — рудное тело, 3 — склон карьера, 4 — профиль карьера, 5 — дно карьера, 6 — добытая руда, 7 — зондаж.

**Таблица 1**  
**Изотопы неодима в природе и в реакторе Окло [2]**

Изотопы ${}_{60}\text{Nd}$	142	143, 144	145, 146	148	150
1 Природная концентрация, %	27.11	36.02	25.52	5.73	5.62
2 95% делений ${}^{235}\text{U}$ + 5% делений ${}^{238}\text{U}$	0	54.78	33.65	8.28	3.29
3 Концентрация в образцах Окло	0	54.95	33.46	8.25	3.34

Прямым доказательством протекания в Окло цепной реакции служит распределение по изотопам химических элементов. Оно различается для природных элементов и для осколков деления. Для сравнения особенно удобен элемент  ${}_{60}\text{Nd}$  (табл.1) [2]. Природное распределение содержит изотоп  ${}^{141}\text{Nd}$ , а в осколках деления он не образуется, что позволяет выделить осколки из смеси изотопов. Во второй строке табл.1 приведено расчетное распределение осколков при делении, а в третьей — измеренное в пробах Окло; совпадение очевидно. Сильные поглотители тепловых нейтронов быстро выгорают в реакторах на тепловых нейтронах. Этот факт дает возможность определить, на каких нейтронах работал реактор: на быстрых или на тепловых. На рис.3, где показан выход изотопов  ${}_{48}\text{Cd}$ , в области сильного поглотителя  ${}^{113}\text{Cd}$  виден большой провал. Недостающие нейтроны в результате реакции  ${}^{113}\text{Cd} + n \rightarrow {}^{114}\text{Cd}$  добавляются к изотопу  ${}^{114}\text{Cd}$ . Таким образом, цепная реакция в Окло шла на тепловых нейтронах.

Возраст реактора составляет  $T_0 = 1.8$  млрд лет, продолжительность цепной реакции — 600 тыс. лет. Общее количество выработанной реактором энергии оценивается в  $1.5 \cdot 10^4$  МВт·лет. Два блока



**Рис.3. Выгорание  ${}^{113}\text{Cd}$  в реакторе Окло [2].**  
1 — выход изотопов  ${}_{48}\text{Cd}$  при делении; 2 — то же для пробы из Окло (A — массовое число).

Ленинградской АЭС при стопроцентной загрузке производят столько тепловой энергии за два с небольшим года. Средняя мощность реактора Окло была всего лишь 25 кВт. Обогащение изотопом  ${}^{235}\text{U}$  на момент начала реакции составляло 3.1%. Уран такого же обогащения используется на отечественных реакторах ВВЭР-1000 атомных электростанций. Поскольку отношение ядер Н/У примерно одинаково и размеры обоих реакторов сопоставимы, можно сразу же без детальных расчетов сказать, что цепная реакция в Окло была возможна [7].

## Портрет зоны RZ2

Активные зоны реактора Окло пронумерованы; наиболее полные данные имеются для зоны RZ2. Она представляет собой неправильной формы прямоугольную пластину, лежащую на базальтовом ложе под углом  $45^\circ$ . Толщина пластины равна 1 м, ширина — 11–12 м, а длина — 19–20 м (см. рис.1, 2), т.е. ее объем  $V$  составляет около  $240 \text{ м}^3$ . При мощности  $P = 25 \text{ кВт}$  среднее энерговыделение равно  $q = P/V = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^3$ . Это намного меньше энерговыделения в гниющей навозной куче. Однако за счет длительного нагревания под большим давлением температура зоны могла достигать от 450 до 1100 К. Современный состав пустой породы (без воды и урана) хорошо изучен; изменение его на несколько процентов мало меняет коэффициент размножения. Кроме характеристик породы, важно знать содержание урана и воды на начало работы реактора. Связь между содержанием урана в зоне и удельной плотностью обезвоженной руды была измерена экспериментально (рис.4) [8]. Для определения влияния разброса содержания урана на параметры зоны RZ2 были выбраны три исходные относительные плотности  $U$  в сухой руде: 35, 45 и 55%. Эти современные значения необходимо привести к моменту образования реактора. Отношение плотности урана в сухой руде в момент образования реактора  $\gamma_{U,i}(0)$  к его современной плотности  $\gamma_{U,i}(T_0)$  равно

$$\gamma_{U,i}(0)/\gamma_{U,i}(T_0) = (1 - \zeta_5)\exp(T_0/\tau_8) + \zeta_5\exp(T_0/\tau_5) = 1.355, \quad (1)$$

здесь  $\zeta_5 = 0.72 \cdot 10^{-2}$  — современное содержание легкого изотопа  ${}^{235}\text{U}$  в смеси;  $\tau_5 = 1.0 \cdot 10^9$  лет — вре-

**Таблица 2**  
**Современный и первоначальный состав руды в зоне RZ2**

	<i>i</i>	1	2	3
1 Современная доля U в сухой руде, %	$Y_{U,i}(T_0)$	35	45	55
2 Современная плотность U в сухой руде, г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{U,i}(T_0)$	0.994	1.481	2.101
3 Начальная плотность U в сухой руде, г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{U,i}(0)$	1.347	2.015	2.847
4 Начальная относительная плотность U в сухой руде, %	$Y_{U,i}(0)$	38.4	49.4	59.6

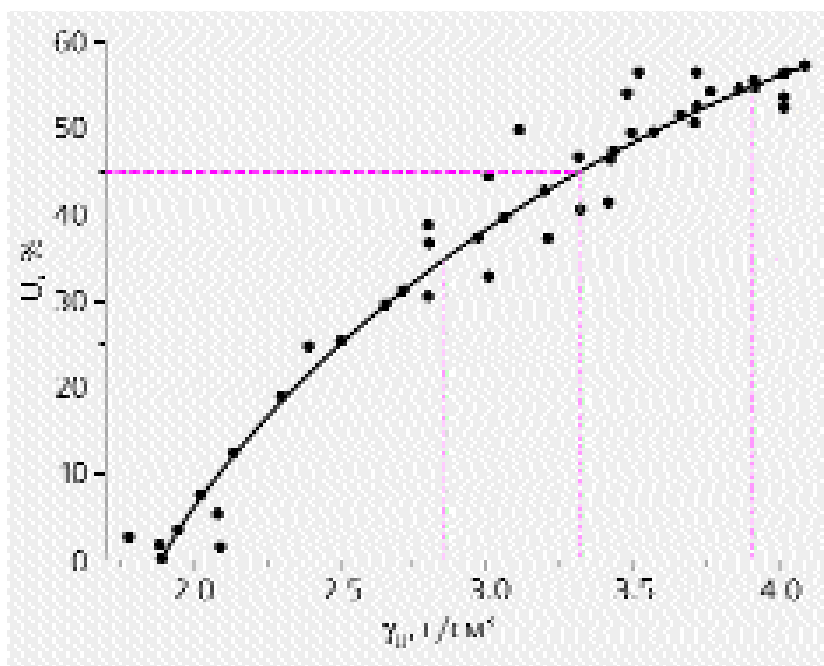


Рис.4. Современное содержание урана  $Y_U(T_0)$  в % от веса сухой руды (относительная плотность) в зависимости от абсолютного значения плотности урана в сухой руде  $\gamma_U$  в реакторе Окло [8].

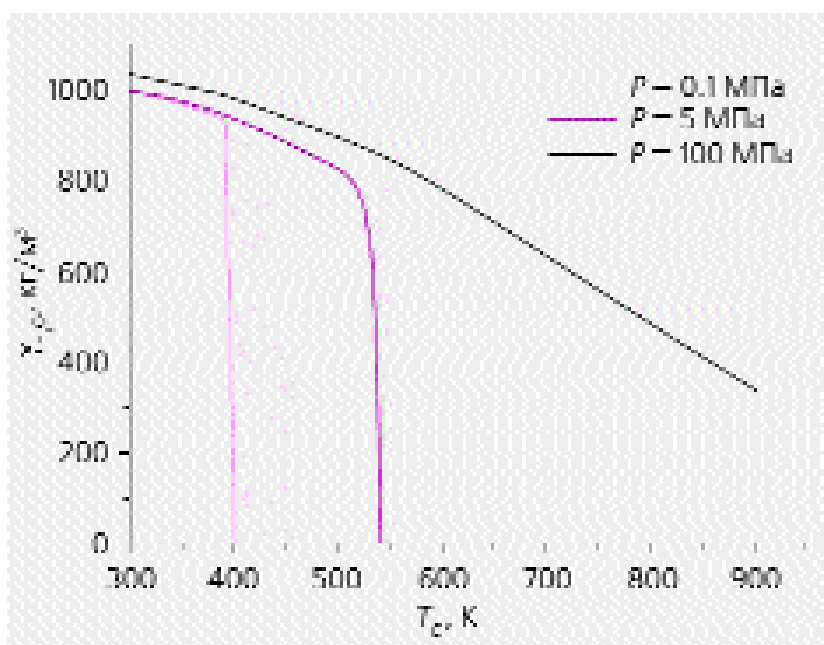


Рис.5. Зависимость плотности воды  $\gamma_{H_2O}$  от температуры  $T_c$  при разных давлениях  $P$ .

мя жизни  $^{235}\text{U}$ ;  $\tau_8 = 6.5 \cdot 10^9$  лет — время жизни  $^{238}\text{U}$ . Отношение (1) не зависит от исходной концентрации урана; в дальнейшем будем обозначать состав зоны буквой  $i$ :  $i = 1$  соответствует первому варианту (35%),  $i = 2$  — второму,  $i = 3$  — третьему. Результаты для «свежей» зоны (до начала реакции)

приведены в табл.2. Плотность воды в реакторе составляет 0.3–0.5 г/см<sup>3</sup>. Эта вода делится на связанную (кристаллическую) и свободную, которая испаряется из пор. На рис.5 показана зависимость плотности воды от температуры при давлении 100 МПа. При температуре зоны 700 К плотность воды составляет 0.23–0.30 г/см<sup>3</sup>. Этого достаточно, чтобы реактор был критичен после учета *мощностного эффекта*. Последний складывается из *температурного* и *пустотного эффектов*. Температурный эффект заключается в изменении реактивности  $\rho_T(T_c)$  (реактивность  $\rho = 1 - 1/K_{\text{эфф}}$ ) с ростом температуры зоны  $T_c$  при неизменном содержании воды. Для зоны RZ2 он отрицателен. Пустотный эффект подразумевает изменение реактивности  $\rho_v$  при удалении воды (при постоянной температуре  $T_c$ ). В этом случае в конкуренцию вступают увеличение реактивности за счет уменьшения поглощения водой, с одной стороны, и уменьшение реактивности вследствие увеличения резонансного захвата в  $^{238}_{92}\text{U}$ , а также роста утечки нейтронов из активной зоны при их замедлении — с другой. Пустотный эффект для зоны RZ2 также отрицателен, и при  $T_c = 700$  К дает в общий эффект вклад на уровне 73%. Таким образом, критическое состояние зоны ( $K_{\text{эфф}}(T_c) = 1$ ) фиксируется ее температурой. При  $T_c > T_c^0$  содержание воды в реакторе уменьшается и цепная реакция затухает. При  $T_c < T_c^0$  реактор разгоняется до тех пор, пока температура становится равновесной:  $T_c = T_c^0$ . При этом реализуется один из двух режимов работы реактора. В первом режиме реактор работает все время при температуре, точно равной  $T_c^0$ , которая с ростом выгорания  $^{235}\text{U}$  и накоплением шлаков медленно падает. Другой возможный режим — пульсирующий. Когда температура поднимается выше  $T_c^0$ , свободная вода выкипает и за счет пустотного эффекта реактор останавливается. После охлаждения зоны вода возвращается обратно, и он начинает работать вновь.

## Детали для знатоков

Для более детального изучения нейтронно-физических характеристик реактора Окло недавно были выполнены подробные расчеты свежей невыгоревшей зоны RZ2 [9]. Расчеты проводились с помощью современных программ, основанных на методе Монте-Карло: отечественной MCU REA,



созданной в центре «Курчатовский институт», и международной MCNP4C. Обе программы дают близкие результаты. В качестве расчетных констант использовались наиболее современные ядерные данные; для описания связанного водорода в воде привлекалась модель Нелкина. При больших поперечных размерах форма реактора несущественна. Для расчетов был выбран плоский цилиндр высотой  $H = 1$  м и радиусом, который определяется выгоранием зоны. При выгорании 50%  $^{235}\text{U}$  радиус зоны  $R_i$  составил для трех исходных вариантов состава свежей зоны (табл.2) 9.9, 8.1, 6.8 м. При вычислении  $R_i$  учитывался распад образующегося  $^{239}\text{Pu}$  в  $^{235}\text{U}$ .

Если размеры активной зоны велики по сравнению с длиной миграции  $M$  (среднеквадратичной длиной диффузии), применима одногрупповая диффузионная теория нейтронов. Для голы (без отражателя) зоны RZ2 эффективный коэффициент размножения равен:

$$K_{\text{эфф}}^{(i)} = \frac{K_{\infty}^{(i)}}{1 + B^2 M_i^2}; B^2 = B_H^2 + B_{R,i}^2; \quad (2)$$

здесь  $B_H = \pi/H$  — высотный геометрический параметр и  $B_{R,i} = 2.405/R_i$  — радиальный геометрический параметр. Радиальный параметр  $B_{R,i}^2$  вносит вклад в  $B^2$  лишь около 1%, и им можно пренебречь; тогда  $B^2 = 0.99 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ . Значения  $K_{\infty}^{(i)}$  и  $M_i^2$  слабо зависят от состава зоны  $i$ , но сильно от ее температуры (рис.6). С ростом  $T_c$  величина  $K_{\infty}$  падает, а утечка из зоны растет. Результаты расчетов реактивности как функции температуры для двух вариантов содержания урана и трех — воды показаны на рис.7. Первоначально высокая надкритичность зоны компенсируется за счет мощностного эффекта. Температура, при которой реактор критичен, равна  $T_c = 725$  К с разбросом из-за разного состава  $\pm 55$  К. Учет отражателя (того же состава, что и зона, но без урана) мало меняет общую кар-

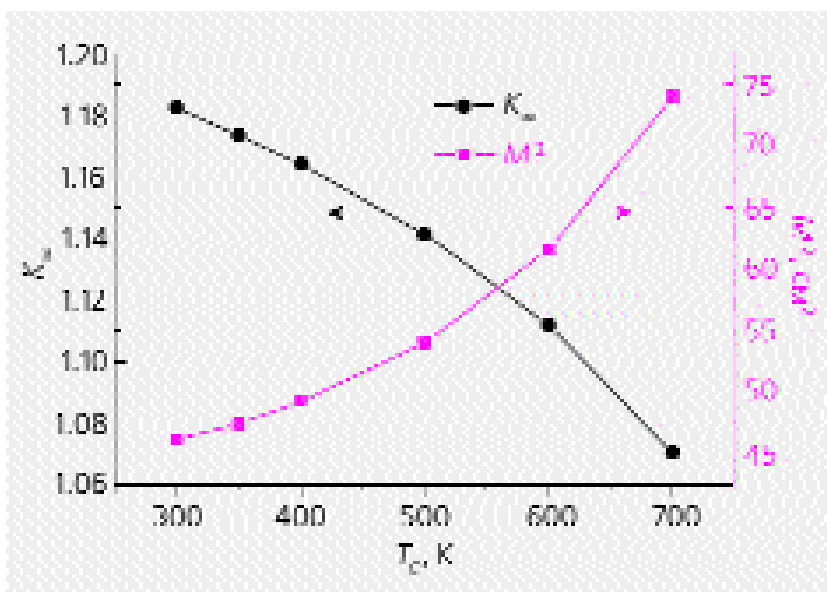


Рис.6. Зависимости  $K_{\infty}(T_c)$  и  $M^2(T_c)$  для зоны, содержащей 49.4 вес.% урана в современной сухой руде и долю воды 0.405, при  $P_c = 100$  МПа [9].

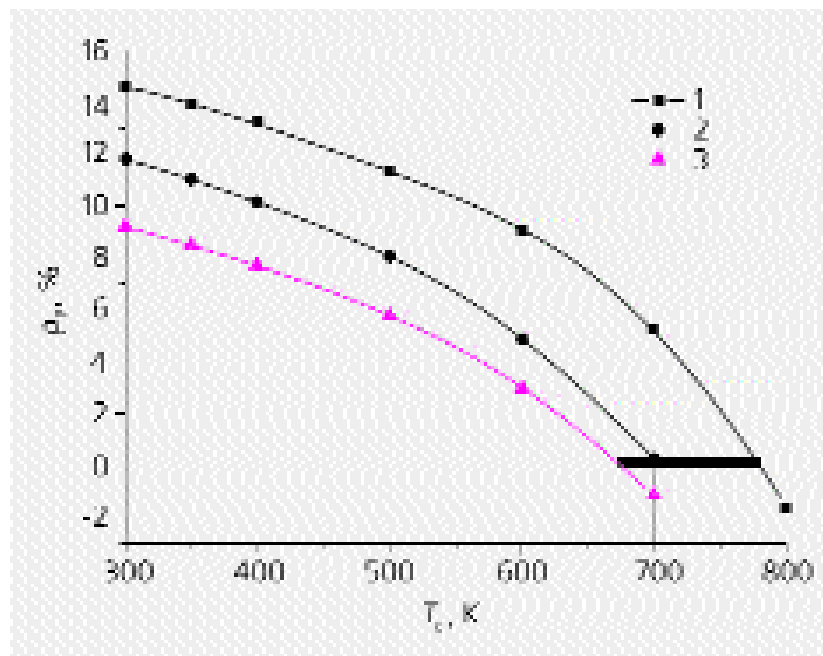


Рис.7. Мощностной эффект [9]. Зависимость реактивности  $\rho_r$  (в %) свежей зоны реактора Окло от температуры  $T_c$  при давлении  $P_c = 100$  МПа для разных соотношений начального содержания урана в руде/доля воды: 1 — 49.4 вес.% U/0.455; 2 — 49.4 вес.% U/0.405; 3 — 38.4 вес.% U/0.355.

тину, поскольку его вклад в реактивность составляет всего 1.8%.

Средний поток тепловых нейтронов с энергией  $E_n < 0.625$  эВ составляет  $\Phi_{th} = 0.7 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>с; его значение в центре зоны равно  $\Phi_{th}(T_c, 0) = 2.5 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>с. Основной захват нейтронов происходит в изотопах  $^{235}\text{U}$  (52%) и  $^{238}\text{U}$  (39%), за ними следуют железо  $^{56}\text{Fe}$  (3.5%) и водород (2.7%). На остальные компоненты руды приходится менее 3% захватов.

Низкий поток нейтронов отличает реактор Окло от обычных реакторов. Так, например, в зоне RZ2 отсутствует отравление ксеноном. Несмотря на огромное сечение поглощения тепловых нейтронов изотопом  $^{135}\text{Xe}$ , поток  $\Phi_{th}$  настолько мал, что вероятность распада ксенона на несколько порядков превышает вероятность поглощения им нейтронов. Еще одно различие — необычное поведение плутония  $^{239}\text{Pu}$ , который образуется после захвата нейтрона изотопом  $^{238}\text{U}$  и двух последующих  $\beta$ -распадов. Вероятность захвата нейтронов плутонием составляет лишь несколько процентов от вероятности его распада. Изотоп  $^{239}\text{Pu}$  распадается с испусканием  $\alpha$ -частицы и образует  $^{235}\text{U}$ , увеличивая содержание последнего примерно на 50%.

В тех случаях, когда сильные поглотители нейтронов стабильны, они заметно выгорают за время работы реактора. Такой поглотитель, как  $^{149}\text{Sm}$ , выгорает в сто раз быстрее, чем  $^{235}\text{U}$ . В современной руде содержится только тот  $^{149}\text{Sm}$ , который образовался за последние десятки тысяч лет работы реактора, а образовавшийся за предшествующее время полностью выгорел. Скорость вы-

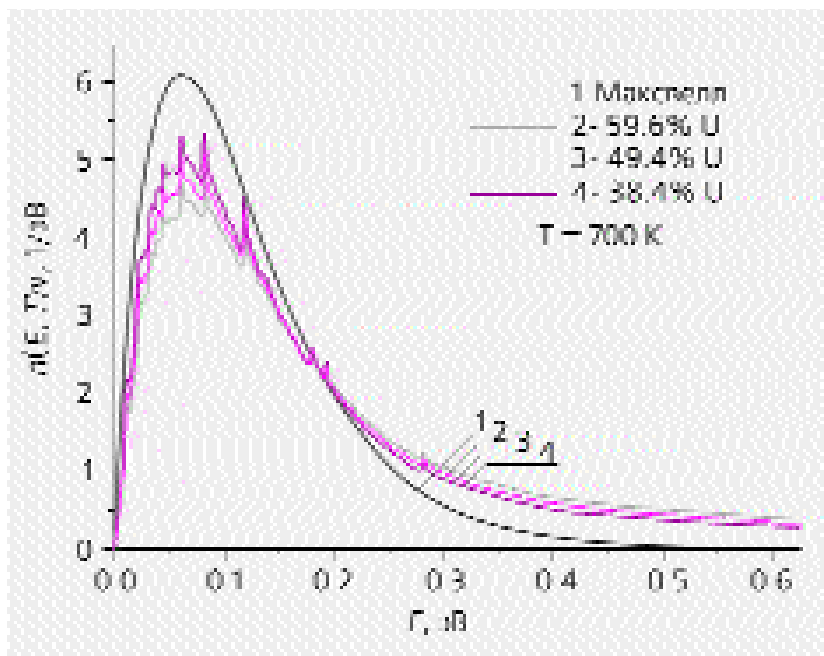


Рис.8. Спектр нейтронов в свежей голой активной зоне реактора Окло при разной начальной концентрации урана (доля воды 0.405) [9] в сравнении со спектром Максвелла.

горания зависит от эффективного сечения этого процесса, усредненного по реакторному спектру. Реакторные спектры для  $T_c = 700$  К для всех трех разных вариантов исходного состава зоны (рис.8) значительно отличаются от спектра Максвелла, который многие авторы используют для усреднения сечений сильных поглотителей. Максвелловский спектр имеет гораздо более высокий пик, но зато он экспоненциально мал выше 0.3 эВ, где реакторные спектры спадают по закону Ферми  $1/E_n$ . Для определения равновесной температуры  $T_c^0$ , а также спектров нейтронов в конце процесса необходим расчет выгорания реактора с учетом накопления осколков деления, трансуранов и т.п. Такие расчеты сейчас проводятся в Петербургском институте ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН.

Итак, вся совокупность данных о феномене Окло находит естественное объяснение в рамках реакторной физики.

**«Оказалось, что в создании реакторов деления человек был не новатором, а невольным имитатором природы».**

Джордж Коэн [6]

## Уроки Окло

Удивительный факт сохранения до наших дней следов работы естественного реактора представляет большой интерес для изучения проблемы захоронения отходов атомной энергетики. Как показывают исследования, проведенные с этой точки зрения, сам реактор оказался прекрасным хранилищем радиоактивных отходов. Миграция в течение почти 2 млрд лет тяжелых элементов — то-

рия, урана и плутония — была крайне мала. Остались на месте редкоземельные элементы и даже многие более легкие продукты деления. Они оказались в тех же самых зернах уранинита, что и выгоревший уран, и не выходили в окружающую минералы глину. Именно это обстоятельство и позволило проделать анализы, результаты которых изложены в предыдущем разделе. Многие из легких осколков (цирконий, рутений, родий, палладий, ниобий, серебро) также сохранились почти полностью. Напротив, инертные газы, криптон и ксенон, почти полностью ушли, причем, судя по недостатку продуктов их распада, они покидали реактор еще в процессе его работы. Металлы, легко растворимые в воде, сохранились только частично. Однако, как показывает анализ распределения изотопа  $^{90}\text{Sr}$  ( $\tau_{90} = 41$  год), около 95% которого успело распасться в  $^{90}\text{Zr}$  внутри реактора, миграция их была невелика в течение времени порядка  $\tau_{90}$ . Радиогенный свинец сохранился только частично из-за сильного изменения химических свойств в цепочке последовательных радиоактивных превращений. Большой интерес для изучения миграции осколков представляет «зона загрязнения», расположенная на границе реактора.

Предварительный анализ результатов эксперимента, поставленного природой в течение почти 2 млрд лет, позволяет надеяться на длительное безопасное хранение радиоактивных отходов атомной энергетики. Проблема надежного захоронения радиоактивных отходов уже сейчас успешно решается в ведущих ядерных странах, в том числе и в России в Красноярске-26. В США подземное хранилище отходов высокой удельной активности построено в горах Юкка Маунтин (штат Невада). В хранилище, расположенном в ста милях от Лас-Вегаса, в будущем должно быть надежно захоронено 70 тыс. тонн таких веществ. Общая стоимость проекта составит 3.2 млрд долл. В скальной толще горы с помощью мощного проходческого щита (рис.9) пробурены широкие галереи, от ко-

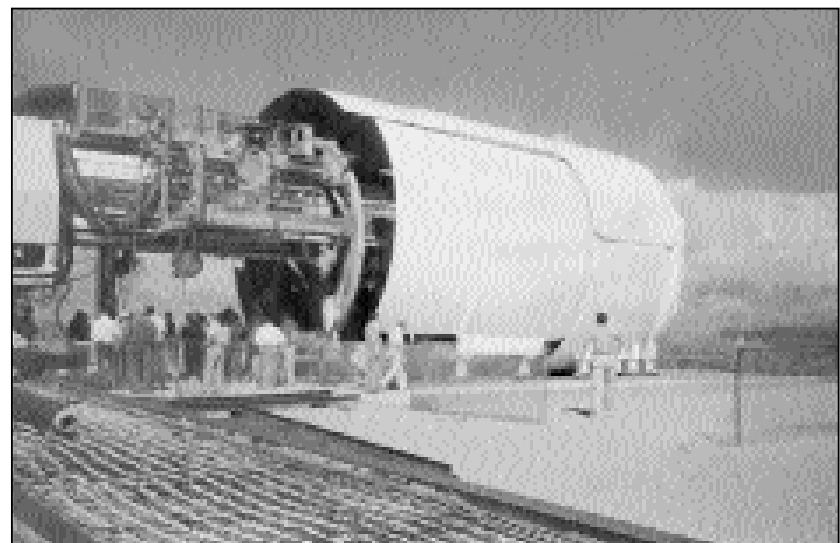


Рис. 9. Буровая машина для прокладки штолен в хранилище радиоактивных отходов Юкка Маунтин. Фото автора

торых отходят залы с контейнерами, содержащими остеклованные отходы. Поскольку скорость диффузии элементов экспоненциально растет с температурой, в хранилище проводятся эксперименты, в которых в течение длительного времени (несколько лет) эти элементы остаются нагретыми до температуры 500 К. Никакой заметной их миграции наружу до сих пор не наблюдалось. Тем не менее противники атомной энергетики говорят: «Вы можете измерить миграцию осколков в течение десятков лет, но откуда вы знаете, что они не выйдут наружу и не отравят окружающую среду через тысячу лет?» Опыт, поставленный природой в Габоне, показывает, что радиоактивные отходы можно безопасно хранить не тысячу, а миллиарды лет.

Цепная реакция возникла через 300 млн лет после образования месторождения Окло. Поэтому результаты датирования окружающей руды традиционными методами U/Pb, Rb/Sr, K/Ar можно сравнить с определенным независимо абсолютным возрастом естественного реактора, что представляет интерес для геохронологии. Он работал в важную с точки зрения биологической эволюции эпоху докембрия. Примечательно, что возраст реактора совпадает с периодом перехода прокариотов к эукариотам. Реактор Окло создавал повышенный уровень радиации и мог оказывать локальное влияние на частоту мутаций одноклеточных. Результаты предварительных исследований показывают заметно более высокую степень эволюции органической материи по мере приближения к реактору.

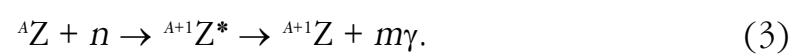
Наиболее ценным для физики оказался тот факт, что реактор Окло является прибором, чувствительным к величинам нейтронных сечений в далеком прошлом. Сравнивая их с современными значениями, можно оценить, в какой мере они, а значит, и фундаментальные константы постоянны во времени [7, 10].

## Постоянны ли константы?

В 1935 г. известный астрофизик и математик Е.Милн задался вопросом: откуда мы знаем, что фундаментальные постоянные действительно постоянны, а не меняются со временем? Он считал, что на этот вопрос может ответить только эксперимент. Вскоре П.Дирак предположил, что в момент Большого взрыва в соответствии с гипотезой больших чисел все константы были одного порядка, но за время существования Вселенной  $t_0$  гравитационная константа падала со скоростью, обратно пропорциональной  $t_0$ :  $(dG/dt)/G \sim t_0^{-1}$  [11]. В 1961 г. Р.Дикке выдвинул антропологический принцип. Согласно этому принципу, параллельно существует множество Вселенных. Мы живем в той из них, в которой все устроено таким образом, чтобы на определенном этапе мог появиться

и в дальнейшем существовать человек. Среди многих необходимых для этого условий были и космологические: синтез элементов в звездах, существование резонанса в системе трех  $\alpha$ -частиц, благодаря которому образуется  $^{12}_6\text{C}$ , и т.п. В 1967 г. Г.Гамов, который был убежденным сторонником антропологического принципа, предположил, что в ранней Вселенной все константы были малы, а с расширением Вселенной сильные и электромагнитные константы, наоборот, росли [12]. В частности, рост электромагнитной константы  $\alpha = 1/137$  должен был приводить к увеличению сверхтонкого расщепления спектральных линий. Обе гипотезы противоречили геологическим и палеоботаническим данным о ранней истории Земли: климат 1–3 млрд лет назад был бы либо слишком жарким, либо слишком холодным для зарождения жизни. Стало ясно, что изменение констант должно было происходить гораздо медленнее. На более жесткий экспериментальный предел на скорость изменения ядерных констант в 1972 г. получил Ф.Дайсон. Он проанализировал  $\beta$ -распад долгоживущих ядер:  $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar}$  ( $\tau_K = 1.8 \cdot 10^9$  лет) и  $^{187}\text{Rb} \rightarrow ^{187}\text{Os}$  ( $\tau_{\text{Rb}} = 6.3 \cdot 10^9$  лет), у которых разница энергий между материнским и дочерним ядрами мала. Если в далеком прошлом энергия кулоновского отталкивания протонов ядра уменьшалась из-за падения константы  $\alpha$ , то распад сначала замедлялся, а потом и прекращался вовсе. Однако анализ древних минералов не показал никаких отклонений. Отсюда Дайсон получил ограничение на относительную величину изменения электромагнитной константы  $\delta\alpha/\alpha$  и на скорость ее изменения:  $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 2 \cdot 10^{-14}$  год $^{-1}$ .

В 1976 г. автор и его аспирант А.И.Шляхтер поняли, что реактор Окло — наиболее подходящий инструмент для точного измерения скорости изменения фундаментальных констант [7, 10]. Сильно поглощающие осколки деления, такие как  $^{149}_{62}\text{Sm}$ , являются остро настроенными приемниками тепловых нейтронов. Тепловой нейтрон (с энергией  $E_T = 0.025$  эВ) при захвате ядром  $Z$  с массой  $A$  образует составное ядро  $^{A+1}Z^*$  с энергией возбуждения, равной энергии связи 6–8 МэВ, которое переходит в основное состояние, испуская  $m$  штук  $\gamma$ -квантов:



Уровни составного ядра вблизи энергии связи образуют частокол с расстоянием между резонансами порядка десятков электронвольт. Для нейтронов с положительной энергией эти уровни одновременно оказываются резонансами с малой шириной  $\Gamma_\gamma \cong 0.1$  эВ (рис.10). У сильных поглотителей тепловые нейтроны попадают на резонанс, в результате чего сечение возрастает в  $10^5$ – $10^6$  раз. Если фундаментальные константы в далеком прошлом менялись, то менялся ядерный потенциал и все резонансы сдвигались по энергетической шкале на величину  $\Delta E_r$ . Это про-



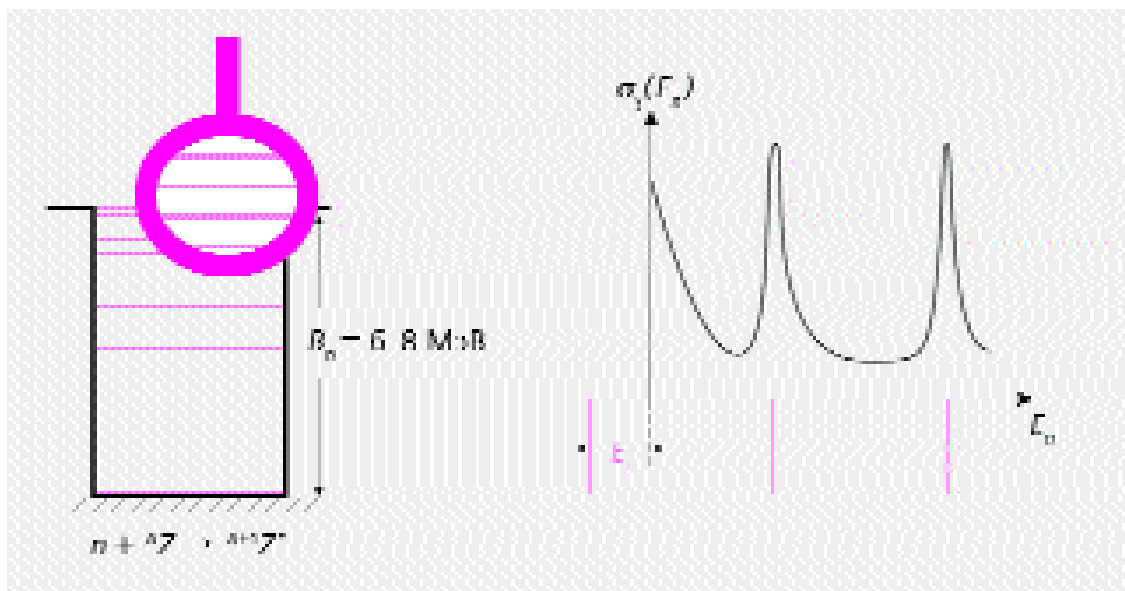


Рис.10. Сильный поглотитель как чувствительный детектор изменения  $\alpha$  [7,10]. Слева — плотность уровней составного ядра  $^{A+1}Z^*$ ; справа — резонансы в сечении реакции  $n + ^AZ \rightarrow ^{A+1}Z^*$ . Сечение захвата нейтрона ведет себя как  $\sigma_\gamma(E_r) \sim (\Gamma_\gamma/E_r)^2$ , где  $E_r$  — расстояние до резонанса, а  $\Gamma_\gamma$  — его ширина. При сдвиге  $E_r$  захват нейтронов сильно меняется.

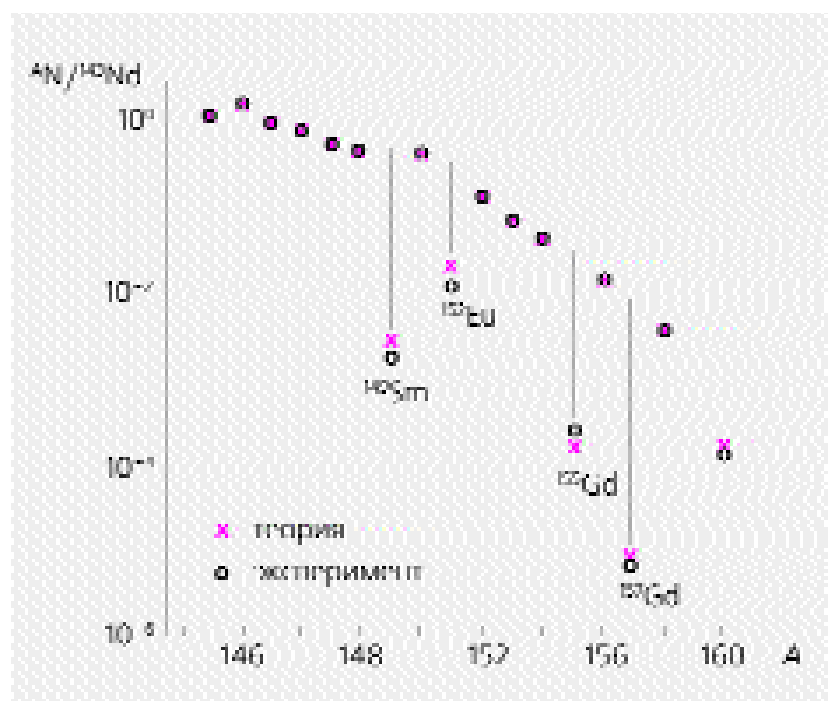


Рис.11. Сравнение расчетных и измеренных концентраций тяжелых осколков деления  $^AN$  относительно содержания  $^{143}\text{Nd}$  для одной из проб реактора Окло [7].

исходило аналогично смещению частоты приема в обычном радиоприемнике при изменении параметров резонансного контура.

На рис.11 показано современное распределение выхода тяжелых осколков в зависимости от массового числа  $A$ . В области сильных поглотителей наблюдаются глубокие провалы. Расчет этих провалов для современных значений сечений поглощения прекрасно согласуется с экспериментальными измерениями в зоне RZ2. Это означает, что все сильные поглотители были сильными и 2 млрд лет назад. Если сечения и изменились, то менее чем на  $\Gamma_\gamma/2$ :

$$\Delta E_r \leq \Gamma_\gamma/2 = 0.05 \text{ эВ.} \quad (4)$$

Отсюда следует ограничение на среднюю скорость изменения электромагнитной константы  $\alpha$ :

$$(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 3 \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1}. \quad (5)$$

Это значение на три порядка точнее оценки Дайсона. Сама константа  $\alpha$  могла измениться за  $2 \cdot 10^9$  лет лишь на ничтожную величину:  $\delta\alpha/\alpha < 5 \cdot 10^{-8}$ .

## Последние новости

Результат (5) оставался наиболее точным в течение 20 лет. В 1996 г. Т.Дамур и Ф.Дайсон на основе более обширного экспериментального материала заново проанализировали результаты работы [10] и пришли к выводу, что они верны [13]. Они также показали, что большая неопределенность температуры реактора ( $T_c = 450-1000$  К) повышает неопределенность в определении  $\Delta E_r$  (табл.3, строка 3). В работе [14] измерены и проанализированы данные для зоны RZ10, расположенной на глубине 150 м от поверхности карьера, и зоны RZ2. Эти данные не столь полны и подробны, как для RZ2, да и измерений сечений захвата  $^{149}_{62}\text{Sm}$  было сделано в несколько раз меньше. Авторы сузили неопределенность в температуре зоны, в результате чего значения  $\Delta E_r \leq 0.02$  эВ и  $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 1.0 \cdot 10^{-17}$  год $^{-1}$  заметно понизились (табл.3, строка 4). В этих работах в качестве нейтронного спектра, по которому производилось усреднение сечений сильных поглотителей, использовался спектр Максвелла. Но вскоре, как уже упоминалось, было показано, что реакторный спектр значительно отличается от максвелловского (рис.8). Поскольку реакторный спектр растет быстрее максвелловского при энергиях выше 0.3 эВ, значение  $\Delta E_r$  сдвигается по энергетической шкале вправо (табл.3, строка 5). Усреднение сечений  $\gamma$ -захвата по реакторному спектру увеличивает значения  $\Delta E_r$ , приведенные в работах [13, 14] для максвелловского спектра. Требование критичности реактора существенно сокращает разброс температуры зоны — даже с учетом вариаций начального состава свежей зоны ее температура составляет  $715 \pm 55$  К. Самая достоверная современная оценка неизменности  $\alpha$  получена для реакторного спектра свежей зоны (табл.3, строка 5):

**Таблица 3**

**Ограничения на скорость изменения  $\alpha$  на основе данных о содержании  $^{149}\text{Sm}$  в реакторе Окло (строки 1–5) и других результатов (6, 7)**

Организация	Авторы, год	$\Delta E_r, \delta\alpha/\alpha, (d\delta\alpha/dt)/\alpha$	Зона, спектр, $T_c$
1 ЛИЯФ, Гатчина, СССР	Ю.Петров, 1976 г. [7]	$\Delta E_r \leq 0.05$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 5 \cdot 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 2.5 \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_c = 300$ К
2 ЛИЯФ, Гатчина, СССР	А.Шляхтер, 1976 г. [10]	$\Delta E_r \leq 0.02$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 1 \cdot 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 0.5 \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_c = 300$ К
3 Институт повышенных знаний, Принстон, США	Т.Дамур и Ф.Дайсон, 1996 г. [13]	$\Delta E_r \leq 0.09$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 9 \cdot 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 5.0 \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_c = (450-1000)$ К
4 Университет Токио, Япония	Я.Фуджи и др., 2000 г. [14]	$\Delta E_r \leq 0.02$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 2 \cdot 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 1.0 \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ10, максвелловский, $T_c = (470-670)$ К
5 ПИЯФ, Гатчина, Россия	Ю.Петров и др., 2002–2004 гг. [9]	$\Delta E_r \leq 0.06$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 6 \cdot 10^{-8}$ ; $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 3.0 \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, реакторный спектр, $T_c = (725 \pm 55)$ К
Космофизические и лабораторные данные			Метод
6 ИУСАА, Пьун, Индия	Х.Чанд и др., 2004 г. [16]	$\delta\alpha/\alpha \leq (-60 \pm 60) \cdot 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 12 \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	Космофизический метод мультидублетов
7 Парижская обсерватория, Франция	С.Бизе и др., 2004 г.	$(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq (-5 \pm 53) \cdot 10^{-17}$ год $^{-1}$	Метод атомных фонтанов

$$\Delta E_r \leq 0.06 \text{ эВ}, \quad (6)$$

$$(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 3.0 \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1}. \quad (7)$$

При учете выгорания топлива и зашлаковывания реактора происходит потеря реактивности, что ведет к снижению температуры зоны. С уменьшением  $T_c$  предельное значение  $\Delta E_r$  сдвигается влево, и не исключено, что оно станет отрицательным. Иными словами, изменение фундаментальных констант будет обнаружено.

Ограничения, следующие из данных о реакторе Окло, пока продолжают оставаться наиболее точными. К ним начинают приближаться астрофизические данные, основанные на измерениях тонкого расщепления линий поглощения далеких квазаров. В 1994 г. Д.А.Варшалович предложил использовать линии тонкого расщепления дублетов однократно заряженных ионов [15]:

$$nS_{1/2} \rightarrow \begin{matrix} (n+1)P_{1/2} \\ \downarrow 3 \\ (n+1)P_{3/2} \end{matrix} \quad (8)$$

Отношение длин волн  $\Delta\lambda_3/\lambda_1$  для переходов (8) водородоподобных ионов пропорционально  $\alpha^2$ . В течение пяти лет точность измерения неизменности  $\alpha^2$  была поднята на несколько порядков. Австралийская группа даже обнаружила изменение  $\alpha$  на уровне  $\Delta\lambda_3/\lambda_1 \cong -6 \cdot 10^{-6}$  при большом красном смещении спектров. Однако вскоре группа под руководством индийского астронома Х. Чанда нашла в работе австралийцев ошибку [16].

С точностью гораздо большей они показали, что  $\alpha$  не меняется:

$$\begin{aligned} \delta\alpha/\alpha &= (-60 \pm 60) \cdot 10^{-8}; \\ (d\delta\alpha/dt)/\alpha &\leq 12 \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

(табл.3, строка 6 и рис.12).

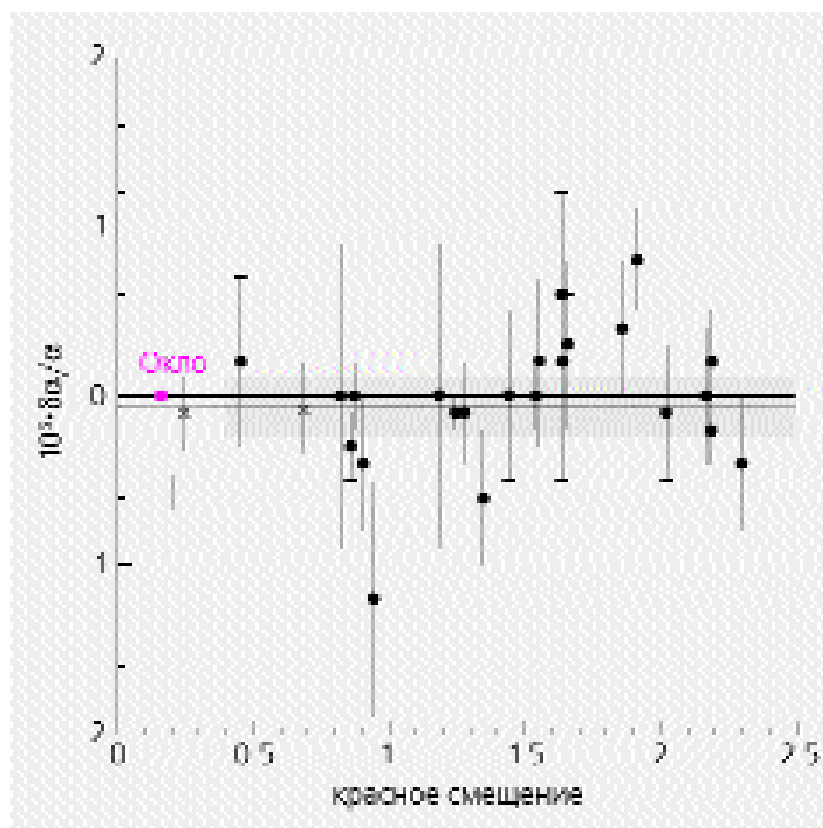


Рис.12. Космофизические данные о  $\delta\alpha/\alpha$  [16].  
• — измерения Чанда и др.; • — данные Окло;  
x — молекулярные линии; --- — данные австралийской группы с ошибкой 1 $\sigma$ .

Лабораторные измерения  $\alpha$  тоже быстро прогрессируют. Хотя время измерений в лаборатории в  $10^9$  раз меньше, зато точность может быть достигнута во много раз выше. В Парижской обсерватории уже получена точность  $(d\delta\alpha/dt)/\alpha = (-5 \pm 53) \cdot 10^{-17}$  год $^{-1}$ . Она пока более чем в четыре раза хуже, чем для космических данных. В ближайшее десятилетие точность всех трех методов должна сблизиться.

На сегодняшний день не существует никаких доказательств изменения фундаментальных констант. Но что будет означать, если такие изменения на уровне  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  все-таки будут обнаружены? Являются ли они следствием изменения скалярных полей, которые наблюдаются в виде темной энергии? Или же эти изменения возникают в результате расширения Вселенной? После Большого взрыва гравитационное поле первоначально определялось средней плотностью энергии.

Через  $7 \cdot 10^9$  лет стал доминировать космический вакуум [17]. Может быть, расширение Вселенной все-таки влияет на характеристики этого вакуума? Возможно, безразмерная константа  $\alpha$  и константа сильного взаимодействия  $\alpha_s$  остаются постоянными, а меняется отношение массы протона к массе электрона  $m_p c^2 / m_e c^2$  или скорость  $c$ , как это предположил Л.Б.Окунь [18]? Или константы сильно менялись только на «инфляционной стадии» образования Вселенной, а затем оставались постоянными? Ответ на эти основополагающие вопросы мироздания — дело будущих исследований.

**На сегодняшний день не существует никаких доказательств изменения фундаментальных констант. ■**

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 02-02-16546а.

## Литература

1. Гуревич И.И. «Яков Борисович Зельдович — лишь одна из его многих проекций» // Знакомый незнакомый Зельдович. Ред. С.С.Герштейн, Р.А.Сюняев. М., 1993. С.91—98.
2. Bodu R., Bouzigues H., Morin N., Pfiffelmann J.-P. // C. R. Ac. Sci. 1972. V.D275. P.1731.
3. The Oklo phenomenon. Vienna, 1975.
4. Natural Fission Reactors. Vienna, 1978.
5. Dozol J.F., Neuilly M. // Ref. [3]. P.357—369.
6. Cowan G.A. // Scientific American. 1976. V.235. P.36—47.
7. Петров Ю.В. // Успехи физических наук. 1977. Т.123(3). С.477—486.
8. Naudet R., Filip A., Renson C. // Ref. [3]. P.83—101.
9. Петров Ю.В., Назаров А.И., Онегин М.С., Петров В.Ю., Сахновский Э.Г. // Атомная энергия. 2005. Т.98. С.306—316.
10. Shlyakhter A.I. // Nature. 1976. V.264. P.340.
11. Dirac P.A.M. // Nature. 1937. V.139. P.323.
12. Gamov G. // Phys. Rev. Lett. 1967. V.19. P.759—761.
13. Damour T., Dyson F. // Nucl. Phys. 1996. V.B480. P.37—54.
14. Fujii Ya., Iwamoto A., Fukahori T. et al. // Nucl. Phys. 2000. V.B573. P.377—401.
15. Varshalovich D.A., Potekhin A.Y. // Astron. Lett. 1994. V.20. P.771.
16. Chand H., Petitjean P., Strianand R., Aracil D. // Phys. Rev. Lett. 2004. V.92(12). P.121302/1—4.
17. Чернин А.Д. // Успехи физических наук. 2001. Т.171(11). С.1153—1175.
18. Окунь Л.Б. // Успехи физических наук. 1991. Т.161(9). С.177—194.

## Письмо Гамова Зельдовичу

В этом письме Георгий Антонович Гамов впервые (через 12 дней после отсылки письма в «Physical Review Letters» и за восемь дней до его публикации) сообщает Якову Борисовичу Зельдовичу о своей замечательной идее — линейном росте со временем жизни Вселенной  $t$  электромагнитной константы  $\alpha$ .

И автор, и адресат — ярчайшие личности прошлого века. Оба они сложились как ученые в Ленинградском физтехе, но Гамов в 1933 г. эмигрировал в Америку, когда Зельдович только начинал научную деятельность. Оба они принимали участие в создании атомного оружия для супердержав (хоть и в разной степени), оба отошли от этой деятельности, как только это стало возможным, и занялись астрофизикой, где многие процессы сходны с тем, что происходит при ядерных взрывах.

Гамов был очень необычным теоретиком — он не был аккуратен в расчетах, но яркость его физических идей с лихвой искупала этот недостаток, что заметно даже в небольшом тексте данного письма.

Как следует из предыдущей статьи, сама тема письма себя изжила: мы знаем, что фундаментальные постоянные не изменяются на временах космологического масштаба. Тем не менее, как вы увидите из комментариев, общий ход мыслей Гамова и сегодня представляет интерес.

Возможно, в 1957 г. Гамов и не знал, что Зельдович был главой теоретиков советского атомного проекта, но о том, что его адресат принимал участие в создании атомной бомбы, догадаться было нетрудно. Поэтому Гамов с уверенностью мог предполагать, что его письмо будут внимательно читать высокие чины разведок и контрразведок обеих сверхдержав. И их советники по науке. Такой вот оригинальный способ распространения новых физических идей... Эта мысль, возможно, объясняет и нарочитую небрежность текста, формулы которого, как видно из комментариев, доступны далеко не каждому. А необычность гамовского остроумия и его розыгрышей известна и из других примеров.

The Sent. 17<sup>th</sup> 1967 Gamow Dacha  
785 6th Street Boulder, Colorado

Дорогой Коллега!

Поскольку Вы меня добрым словом в Ваших статьях по космологии поминали, хочу я Вам об моих недавних достижениях в этой области рассказать [1]. Как Вы знаете, тридцать лет тому назад Дирак высказал идею, что отношение<sup>1</sup>  $e^2/\gamma m_e^2 \cong 10^{40}$  есть ничто иное, как возраст Вселенной, выраженный в «тампонах»<sup>2</sup>, т.е. элементарных единицах времени, потребных свету, чтобы пробежать элементарную единицу длины:  $\lambda \cong 10^{-13}$  см. Это вопрос психологии, почему сам Дирак и все его други и недруги (включая меня в первой категории) решили, что это значит, что  $\gamma$  уменьшается обратно пропорционально возрасту  $t$  Вселенной. Так или иначе, ничего хорошего из этого предположения не вышло, как было показано в работах Теллера, Шварцшильда и «Вашего покорного слуги».

На позапрошлой неделе я решил посмотреть, что получится, если мы предположим, что  $\gamma$  остается постоянной, но  $e^2$  увеличивается пропорционально времени. Употребляя гомологическое преобразование (см. приложенный оттиск), я нашел, что  $L_\odot$  увеличивается только как  $t^3$  и, поскольку  $D_\odot$  не меняется, температура поверхности Земли изменяется только как  $t^{-3/4}$  (вместо Теллеровского  $t^{-2.25}$ ). Это совсем не опасно для Кембрийских и Архейских океанов, и также устраняет мою и Шварцшильдскую критику.

Каковы же последствия возрастающего  $e^2$ ?

Во-первых, геологические данные относительно палеохроических ореолов в слюде и полево шпате, которые были впервые интерпретированы Джоли и Рэзерфордом в 1907—13 как различные пробеги  $\alpha$ -частиц из микроскопических включений урана. Они указывали, что наблюдения не совсем совпадают с ожиданиями, и даже высказали гипотезу, что «пробег и постоянная распада, может быть, изменяются с геологическим возрастом». Но потом об этом позабыли, и мало кто этим интересовался.

Как насчет астрономии? Конечно, меньшее  $e$  в прошлом приведет к меньшему значению ридберговской постоянной, и к красному смещению спектров. Но это нельзя будет отличить от доп-

плеровского эффекта. С другой стороны, тонкая структура спектра, а также положение радиолнии 21 см могут быть показательные. Беда в том, что спектральные линии галактик не достаточно тонки<sup>3</sup>.

Я придумал один трудный опыт. Если запустить ракету с  $\text{Co}^{57}$  на расстояние Марса, можно будет  $\Delta\lambda/\lambda$  на Земле по методу Мессбауэра заметить (или шиворот-навыворот)<sup>4</sup>.

Если изменение  $e$  со временем удастся установить, будет много интересных результатов для теории элементарных частиц, и вообще. Как я сейчас это вижу, имеются два мира (или, лучше, «полумира»): ньютоновский и максвелловский.

I) Ньютоновский характеризуется: силой тяжести, тяжелыми частицами (нуклеоны, и всякие барионы), а также (вероятно) нейтринчиком, которых еще сам Бор с гравитационными волнами ассоциировал. Сюда же относятся сильные и слабые ядерные взаимодействия. Все эти явления не зависят от возраста Вселенной и выражаются простыми формулами через: 1) скорость света  $c$ , 2) квантовую постоянную  $h$ , и 3) элементарную длину  $\lambda$  ( $\cong 10^{-13}$  см). Например: масса тяжелой частицы есть:

$$M \cong \frac{h}{Mc}$$

с численным коэффициентом порядка  $2\pi^2 \dots^5$

Или, фермиевская постоянная  $g = ch\lambda^2$  (с достаточной точностью).

II) Максвелловский полумир, зависящий от времени. Это: фотоны, электроны, мюоны и, вероятно, другие мезоны. Масса здесь пропорциональна времени и определяется формулой:

$$M = \frac{e^2}{\lambda c^2} \sim t \text{ (т.к. } e^2 \sim t)$$

чисто электромагнитного характера<sup>6</sup>.

Больше деталей я еще не придумал. Я думаю, что независимость от времени гравитации, и зависимость электро-магн.<sup>7</sup> объясняет, почему Эйнштейну не удалось развить объединенную теорию поля: в одну телегу впрячь невозможно коня и трепетную лань.

С приветом, Ваш

Г.Гамов



## Комментарии

<sup>1</sup> Здесь в качестве массы Гамов, по-видимому, имеет в виду массу электрона:  $m_e = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$ ;  $e$  — заряд электрона,  $\gamma$  — гравитационная постоянная. Для фундаментальной массы  $M_s = 1.043 \cdot 10^{18} \text{ ГэВ}/c^2$ , которую ирландский профессор Дж.Стони ввел в 1881 г. [2], подобное отношение  $1/g_s = e^2/\gamma M_s^2$  равно единице. Для электрона же оно на многие порядки больше:

$$\frac{1}{g_e} = \frac{1}{g_s} \left( \frac{M_s}{m_e} \right)^2 = 4.17 \cdot 10^{42}. \quad (1)$$

Оценка Гамова  $10^{40}$  хотя и отличается от формулы (1) в 66 раз, все же демонстрирует, что отношение электрических сил к гравитационным аномально велико. В соответствии с нумерологическим принципом Дирака, предложенным им в 1937 г. [3], такие большие числа не могут появиться в результате чисто математических вычислений. В базовых законах физики они могут возникнуть только вследствие изменения возраста Вселенной  $t$ .

<sup>2</sup> В начале статьи [1] Гамов поясняет смысл термина «тампон» (или, лучше сказать, «темпон»)  $\tau$ . Это время, за которое свет проходит расстояние, равное классическому радиусу электрона  $l = e/m_e c^2$ :

$$\tau = e^2/mc^3 = (e^2/\hbar c) \cdot \hbar c/mc^3 = 0.940 \cdot 10^{-23} \text{ с}. \quad (2)$$

Современное значение времени жизни Вселенной после Большого взрыва составляет  $t_0 = 1.37(2) \cdot 10^{10} \text{ лет} = 4.32 \cdot 10^{17} \text{ с}$ , и  $t_0$  в тампонах есть

$$t_0 = (t_0/\tau) \cdot \tau = 4.59 \cdot 10^{40} \tau. \quad (3)$$

По порядку величины гигантские безразмерные числа  $1/g_e$  в формуле (1) и  $t_0/\tau$  близки. Согласно нумерологическому принципу, первое есть следствие второго. Дирак предполагал, что изначально значение  $\gamma$  было порядка  $e^2$ , а потом сильно упало с ростом  $t_0$ . Гамов же, наоборот, решил, что все константы изначально были малы (порядка  $\gamma$ ), а затем с ростом  $t_0$  значения  $e^2$  и осталь-

ных констант сильно выросли, в то время как  $\gamma$  осталось неизменным.

<sup>3</sup> Впечатляющий прогресс в астрономических методах исследования, произошедший со времени появления статьи Гамова, привел к тому, что теперь спектральные линии возбуждаемых ионов в галактиках прекрасно наблюдаются (см. подробнее [4]).

<sup>4</sup> Смысл этой фразы не ясен.

<sup>5</sup> В этой формуле есть описка, она исправлена Гамовым в его следующей публикации [5], вышедшей через месяц после даты этого письма. В знаменателе вместо массы должна стоять элементарная длина  $l$ :

$$M = h/lc, \quad (4)$$

где  $h = 2\pi\hbar$ .

<sup>6</sup> Здесь Георгий Антонович высказывает крайне оригинальную мысль [5]. Весь мир физики следует разделить на частицы и поля. Первые — это тяжелые частицы (нуклоны, барионы), которые существуют в ньютоновском мире с постоянной силой тяжести. Масса тяжелых частиц не зависит прямо от  $e^2$  (и от  $e^2/\hbar c$ ). Радиационные поля (фотоны, электроны, позитроны, мюоны и другие мезоны) образуют второй мир, мир Максвелла. Масса здесь прямо зависит от  $e^2 \sim t_0$ .

К сожалению, эта безусловно красивая идея оказалась неправильной. Современная квантовая теория рассматривает частицы и поля единым образом. Интенсивность излучения вычисляется с хорошей точностью как высшие поправки по константе взаимодействия. Неверной оказалась и сама идея о линейном росте  $e^2$  с ростом  $t_0$ . Наиболее точные ограничения на этот рост дают данные о древнем естественном реакторе Окло: за 2 млрд лет изменения электромагнитной константы  $\delta\alpha$  могли составить менее, чем  $\delta\alpha/\alpha < 10^{-7}$ . Однако пионерские работы Дирака и Гамова породили совершенно новое направление в физике Вселенной. По этой теме уже опубликованы сотни работ, и оно продолжает бурно развиваться сейчас во всем мире.

<sup>7</sup> Видимо, имеются в виду гравитационная и электромагнитная константы.

Небольшое письмо Зельдовичу интересно еще и с биографической точки зрения. В нем выпукло раскрывается необычная яркая личность Георгия Антоновича и особенности стиля его работы. Он высказывал свои новые блестящие мысли, ограничиваясь лишь качественным рассмотрением, не отвлекаясь на количественные детали. Чтобы не стеснять свободный полет научной мысли, он сознательно шел в своих работах на многочисленные математические и арифметические ошибки, оставляя их исправление профессиональным «вычислителям». Может быть, именно это качество позволило ему сделать более десятка первоклассных открытий в далеких друг от друга, совершенно разных областях науки. Среди этих работ достойное место занимает и «Электричество, гравитация и космология» [1].

© Петров Ю.В.,

доктор физико-математических наук

## Литература

1. Gamov G. Electricity, Gravity and Cosmology // Phys. Rev. Lett. 1967. V.19. P.759—761.
2. Stoney G.J. // The Philosophical Magazine and Journal of Science. 1881. V.11. P.381—390.
3. Dirac P.A.M. The Cosmological Constants // Nature. 1937. V.139. P.323; A New Basic for Cosmology // Proc. Roy. Soc. 1938. V.A165. P.199.
4. Петров Ю.В. Реактор Окло и фундаментальные константы // Природа. 2005. №10. С.3—12.
5. Gamov G. Variability of Elementary Charge and Quazitellar Objects // Phys. Rev. Lett. 1967. V.19. P.913—914.