

	$T_{1/2}$, лет	t , млрд. лет	C_{U5} , %
^{235}U	$7,038 \cdot 10^8$	0	0,720
^{238}U	$4,468 \cdot 10^9$	2	3,6
		3	7,8
		4	16,1

1953 год, Конференция по ядерным процессам в месторождениях. Везерилл и Инграмм сообщили, что, по их расчетам, урановые месторождения древнее 2 млрд. лет могли действовать как ядерные реакторы. Проанализировав концентрацию изотопов Хе в урановой смолке они не нашли даже следов цепной реакции деления.

1956 год. Статья Куроды. (J. Chem. Phys., 1956, v. 25, p.781)
Впервые опубликовано количественное теоретическое обоснование возможности самопроизвольного развития цепной реакции деления в природе.

Показано, что при отношении $\text{H}_2\text{O}/\text{U} \approx 1$ примерно 2 млрд. лет назад в месторождении большого объема с высокой концентрацией урана могла протекать цепная ядерная реакция деления с коэффициентом размножения нейтронов больше единицы.

Начались интенсивные поиски отклонений от нормального изотопного состава ^{235}U и продуктов реакции деления.

1970 Шуколюков Ю.А. В книге “Деление ядер урана в природе” написал:

“...В природе, по-видимому, нет и не было условий для самопроизвольного начала цепной реакции деления”.

В 1972 году в лаборатории Комиссариата по атомной энергии Франции было отмечено статистически значимое расхождение изотопного состава ^{235}U в образцах (0.7171 вместо стандартного 0.7202).

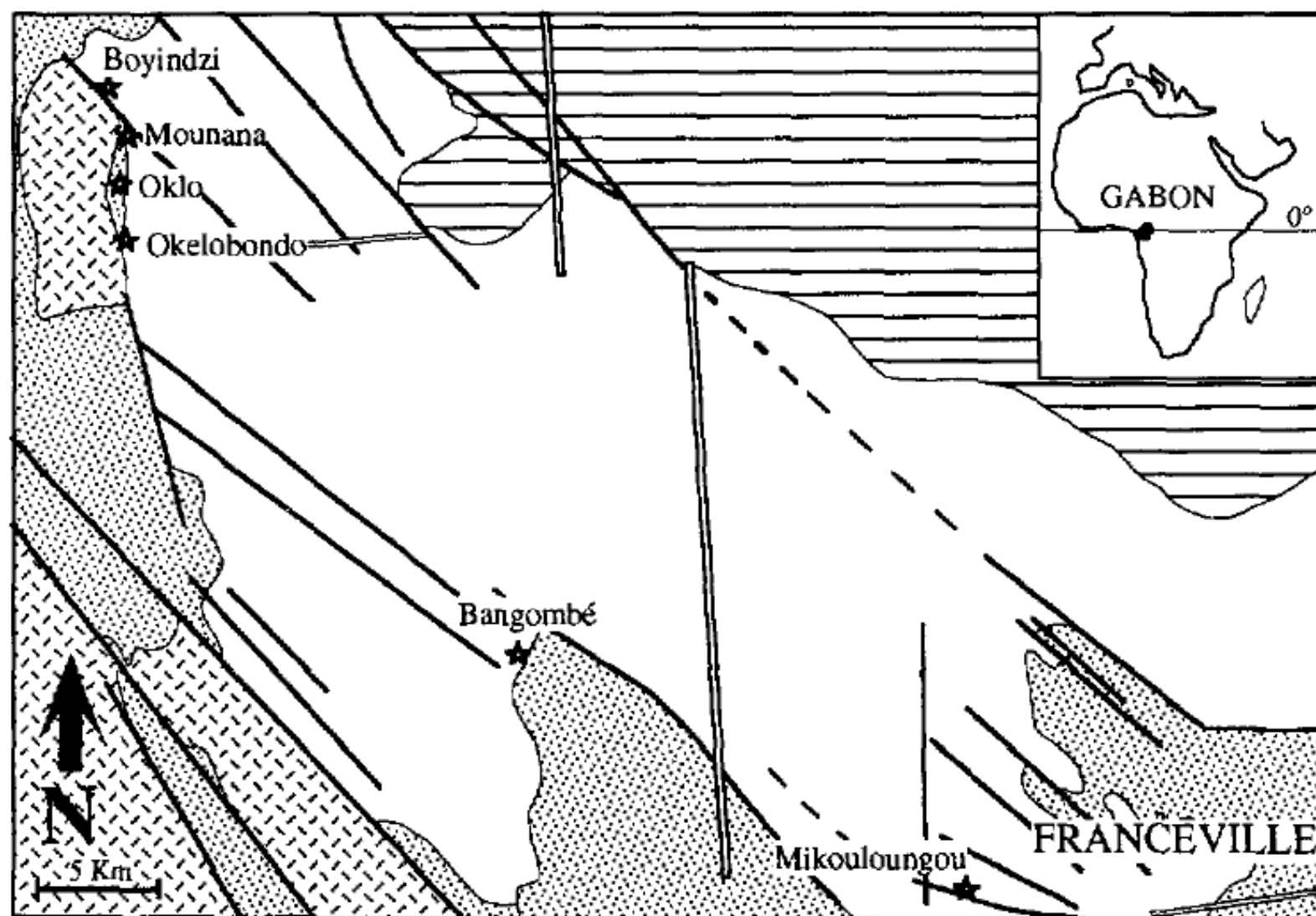
Проверка показала, что в уране, полученном из промышленного месторождения Окло (Габон, Африка), был явный дефицит изотопа ^{235}U . В некоторых партиях руды изотопная концентрация ^{235}U была вдвое меньше нормальной.

Было также обнаружено накопление некоторых изотопов РЗЭ ($^{143}, ^{144}\text{Nd}$) и выгорание других (^{149}Sm , ^{151}Eu).

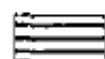
Создана совместная франко-габонская группа под руководством Р. Нодэ для изучения феномена Окло.

Местоположение природного реактора Окло

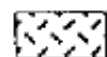




FA Formation



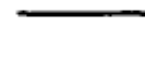
FC-FE Formation



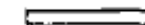
Basement



FB Formation



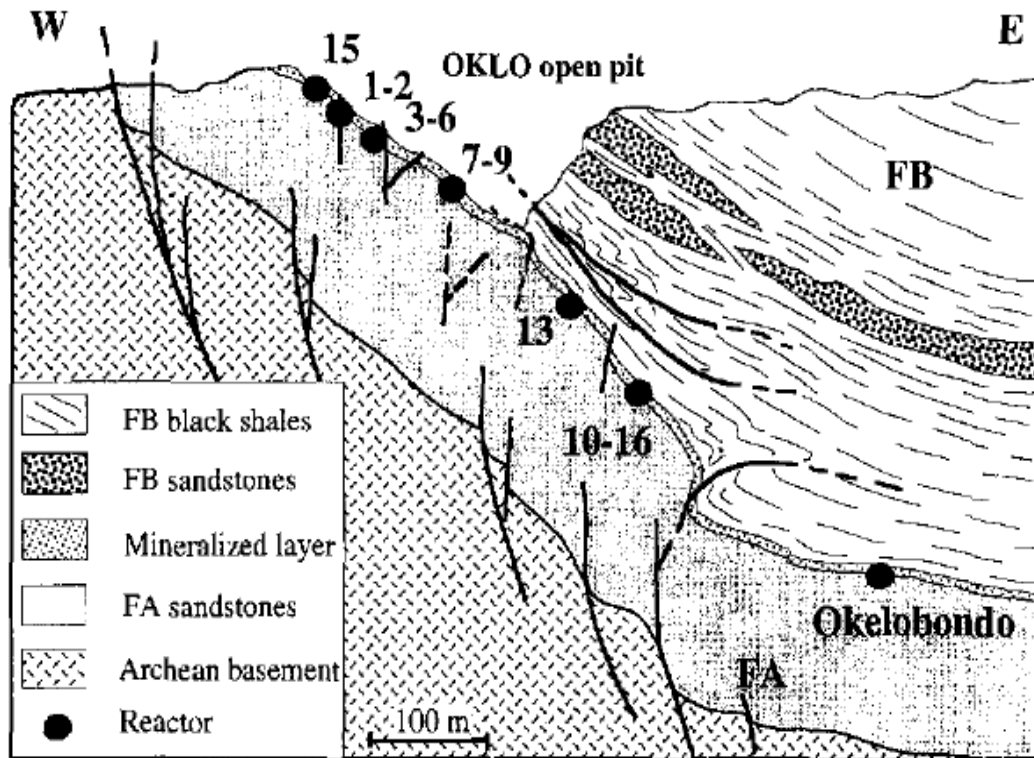
Fault



Dolerite dyke

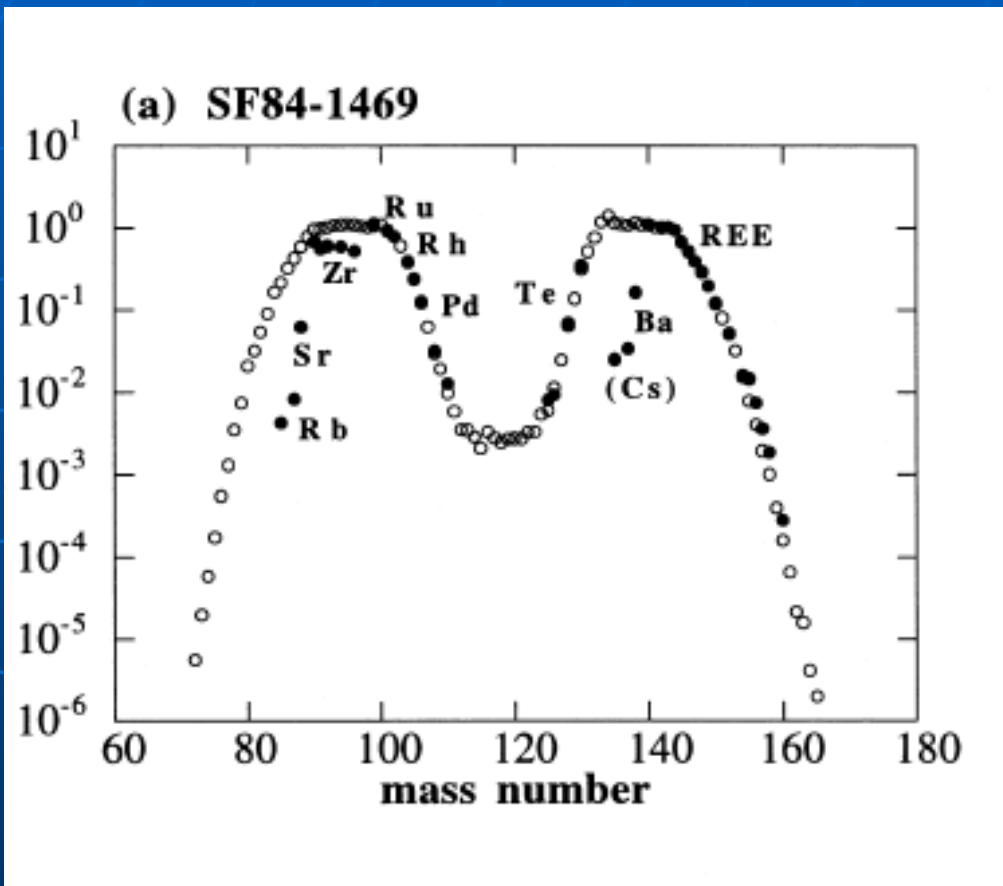


Uranium ore



Всего было открыто 16 реакторных зон. Зоны 1-9 расположены вблизи поверхности. Уран здесь добывался открытым способом.

Типичная распространенность элементов в пробах реактора Окло



Выход
сильнопоглощающих
стабильных изотопов при
делении ^{235}U тепловыми
нейтронами

	Y, %
^{149}Sm	1,08
^{155}Gd	$3,212 \cdot 10^{-2}$
^{157}Gd	$6,233 \cdot 10^{-3}$

Параметры резонансов

	^{149}Sm	^{155}Gd	^{157}Gd
E_r , МэВ	97,3	26,8	31,4
Γ_n^0 , МэВ	1,71	0,635	2,66
Γ_γ , МэВ	60,5	108	106
g_0	9/16	5/8	5/8

В работе Дамура и Дайсона был также вычислен для ядра ^{149}Sm коэффициент зависимости сдвига в положении резонанса от постоянной тонкой структуры α .

$$E_r^{now} = 0,0973 \text{ эВ}$$

$$E_r = E_1 - E_2 = Q - E_1^*$$

$$H = H_n + H_c$$

E_1 – собственное значение энергии для ядра ^{150}Sm в возбужденном состоянии

E_2 – собственное значение гамильтониана ядра ^{149}Sm в основном состоянии

$$H_c = e^2 R_{ij}^{-1}$$

Для собственного состояния гамильтониана с собственным значением E можно получить выражение

$$e^2 dE / de^2 = \langle H_c \rangle$$

$$e^2 dE_r / de^2 = \langle H_c \rangle_1 - \langle H_c \rangle_2$$

Можно измерить изменение среднеквадратичного радиуса распределения протонов при добавлении нейтрона к ядру – так называемый изотопический сдвиг атомных спектров.

Влияние конечного размера ядра на положение спектральной линии в первом приближении можно описать формулой

$$\Delta E = \frac{2\pi}{3} Z e^2 \langle r^2 \rangle \rho_e(0)$$

В квазиклассическом приближении имеет место формула

$$\langle H_c \rangle = \frac{1}{2} e^2 \int V \rho d^3x$$

$$\int \rho d^3x = Z = 62$$

$$dE_r / de^2 < \int V_1 \delta \rho d^3x$$

$$V_1(r) = Z \frac{3R_1^2 - r^2}{2R_1^3}$$

$$\frac{dE_r}{de^2} < -\frac{Z^2}{2R_1^3} \delta_{12}(r^2)$$

Эксперимент:

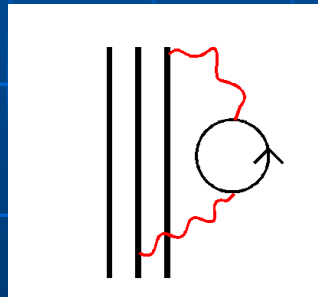
$$\delta_{12}(r) = 0,211 \pm 0,017 \text{ фм}^2 \quad (3\sigma)$$

Приняв $R_1 = 8,11 \text{ фм}$ и заменив e^2 на α , D&D получили

$$\alpha \frac{dE_r}{d\alpha} < -(1,09 \pm 0,09) \text{ МэВ}$$

$$R_C = 1,2 A^{1/3} = 6,38 \text{ фм}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$$



Формула Бете-Вайскопфа для энергии связи ядер содержит кулоновский член:

$$\langle H_C \rangle = 0,717 Z(Z-1)A^{-1/3}$$

$$\alpha \frac{dE_r}{d\alpha} < -1,14 \text{ МэВ}$$

$$\left| \alpha \frac{dE_r}{d\alpha} \right| > 1,0 \text{ МэВ}$$

$$E_r(\alpha^{\text{Окю}}) - E_r(\alpha^0) = - \left| \alpha \frac{dE_r}{d\alpha} \right| (\alpha^{\text{Окю}} - \alpha^0) / \alpha$$

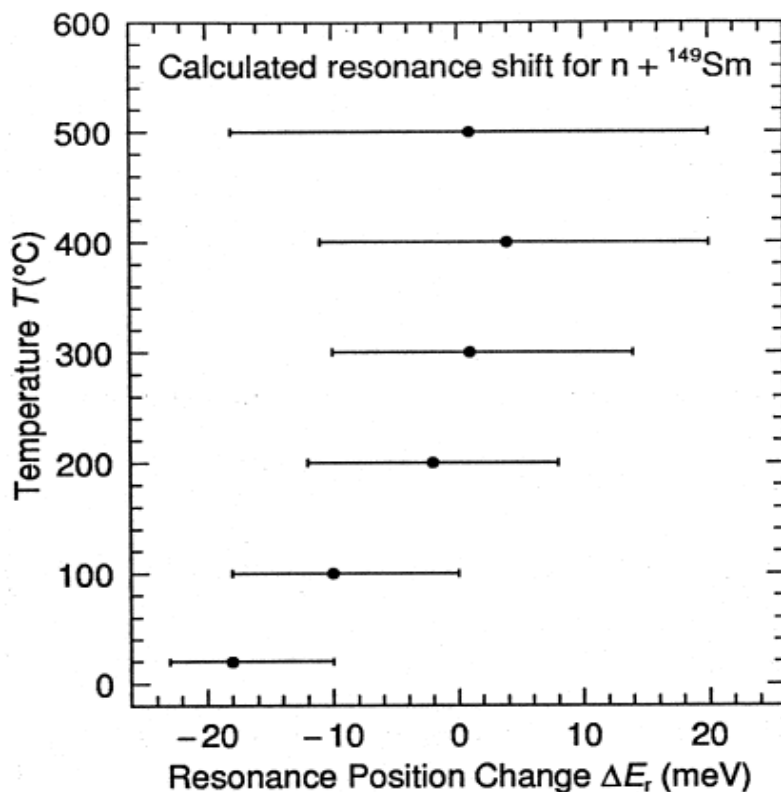
Окончательно

$$-0,9 \cdot 10^{-7} < \frac{\alpha^{\text{Окю}} - \alpha^0}{\alpha} < 1,2 \cdot 10^{-7}$$

1 Nucl. Phys. B**573** p.377. Y. Fujii, A. Iwamoto, T. Fukahori et al

В этой работе исследовались геохимические пробы из Зоны 10 и 13. В отличие от Зоны 2, эти зоны находятся на глубине около 200м от уровня Земли. Вместе с тем, залежи урана в них менее насыщены. Весовое содержание урана не превышает 25%.

Всего было проанализированы геохимические данные для 6 проб.



$$\Delta E_r = 4 \pm 16 \text{ мЭВ}$$

$$\Delta E_r = -97 \pm 8 \text{ мЭВ}$$

$$T = 200 - 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$-0,2 \cdot 10^{-7} < \frac{\alpha^{\text{Окю}} - \alpha^0}{\alpha} < 0,12 \cdot 10^{-7}$$

Использовался спектр
Максвелла

Исследовалось также распределение изотопов ${}^{155,157}\text{Gd}$. Определялось эффективное сечение захвата. Решение уравнений для сдвига резонанса для этих изотопов также имеет два решения, но согласуется с нулевым сдвигом левое решение, в отличие от ${}^{149}\text{Sm}$. Таким образом, совместный анализ указывает на решение согласующееся с нулевым сдвигом положения резонанса.

2001 Phys. Rev. Lett. **87** 091301 Webb J.K., Murphy M.T, Flambaum V.V., Dzuba V.A., Barrow J.D. et al.

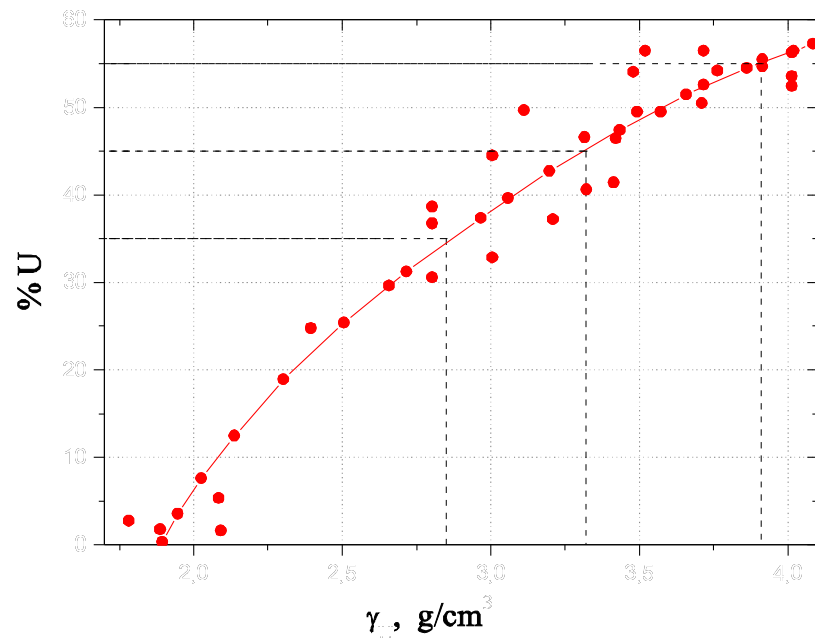
$$\Delta\alpha/\alpha = -0,72 \pm 0,18 \cdot 10^{-5} (4\sigma)$$
$$0,5 < z < 3,5$$

В конце 2001 года Петров Ю.В., Онегин М.С., Сахновский Э.Г. подали заявку на получение гранта РФФИ для уточнения ограничений на изменение фундаментальных констант.

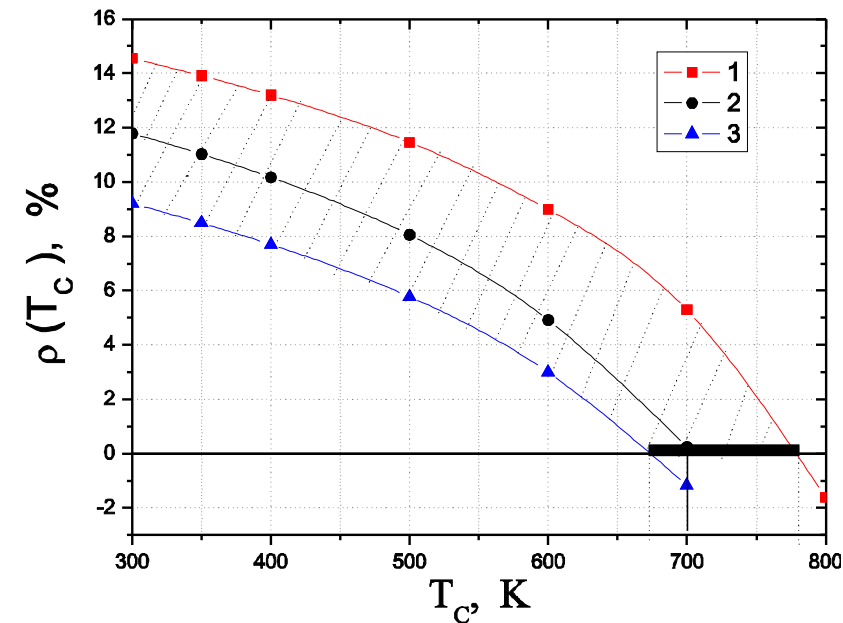
Заявку на 2 года поддержали (02-02-16546-а).

Главная идея, высказанная Петровым Ю.В., состояла в том, чтобы использовать в анализе не спектр Максвелла, а реальный рассчитанный спектр нейтронов для того состава и температуры зоны, какой имел место в реакторе в Зоне 2 в момент протекания цепной реакции деления.

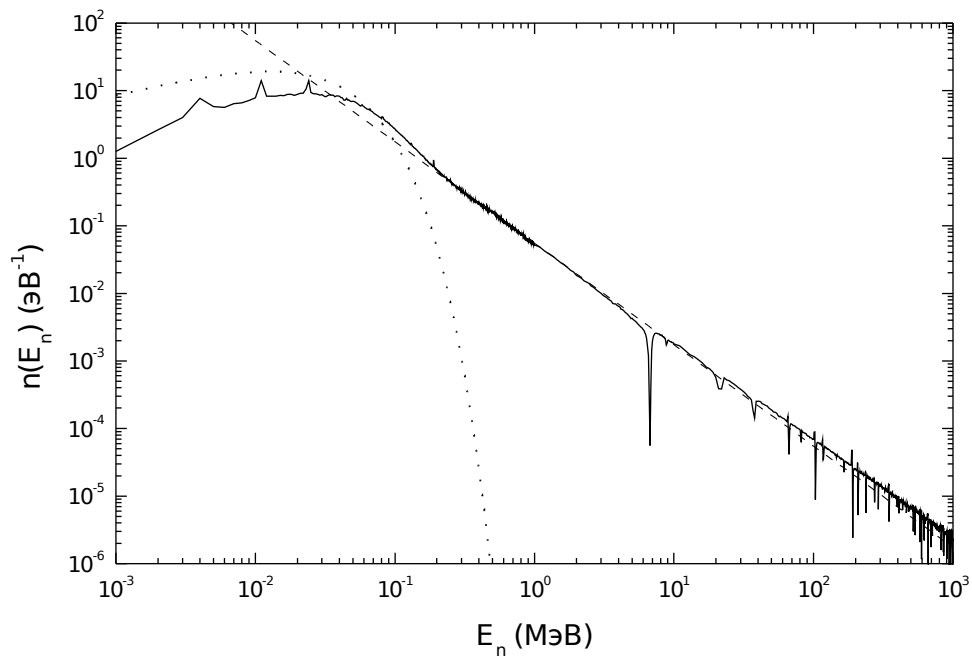
Однако реализация этой идеи встретила существенные вычислительные трудности. Предполагалось рассчитать методом Монте-Карло Зону 2 реактора Окло в течении всего времени его существования начиная от свежего состояния и кончая выгоревшим спустя 700 тысяч лет.



ана
 ация плотности
 ависимости от
 нцентрации урана.
 ы пределы в
 ожет меняться
 воды. Выбран
 ой породы. На
 х данных был
 диапазон
 о, при которых мог
 ровать реактор.



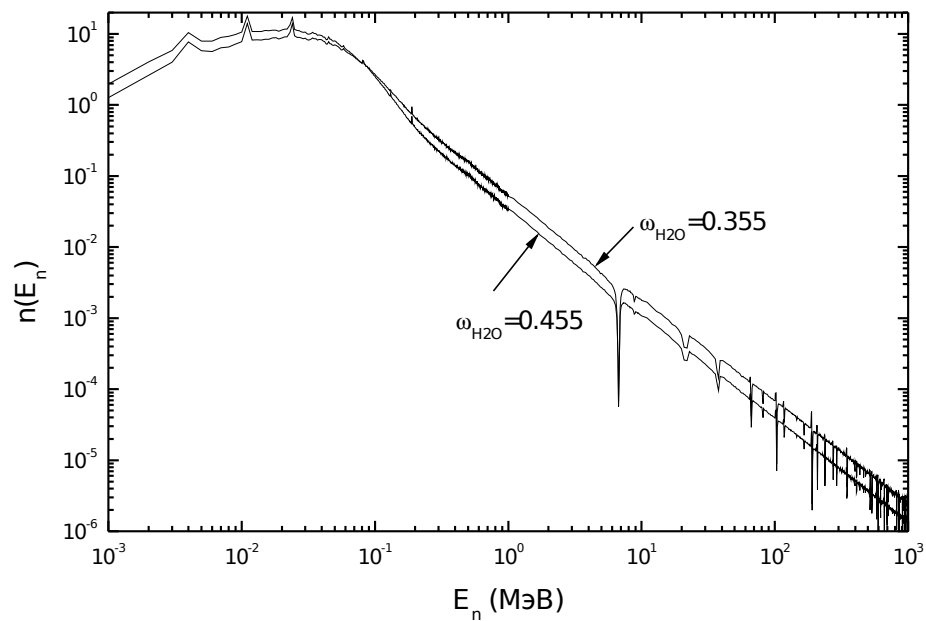
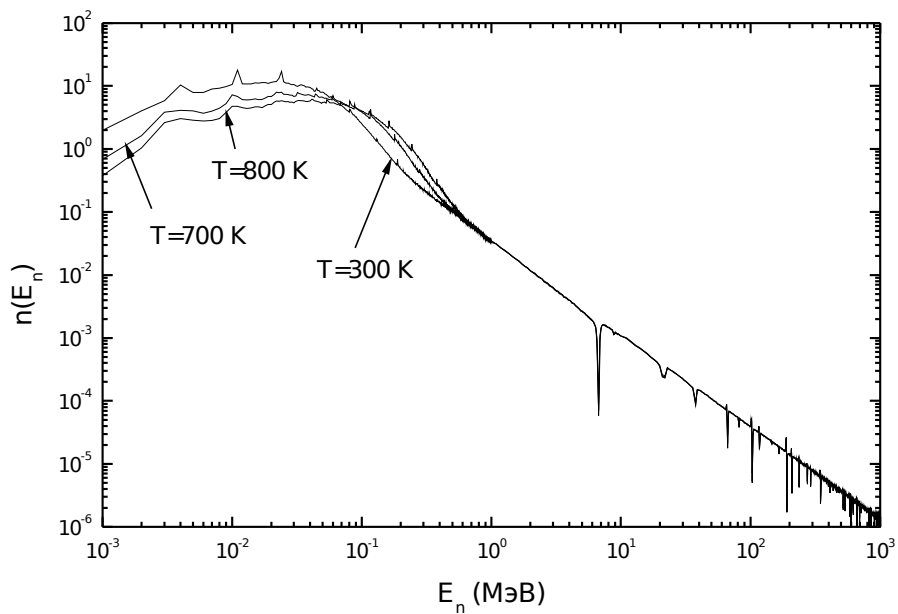
абочих
 о оказался
 $T_c < 800$ K
 зоны:
 $T_c < 780$ K

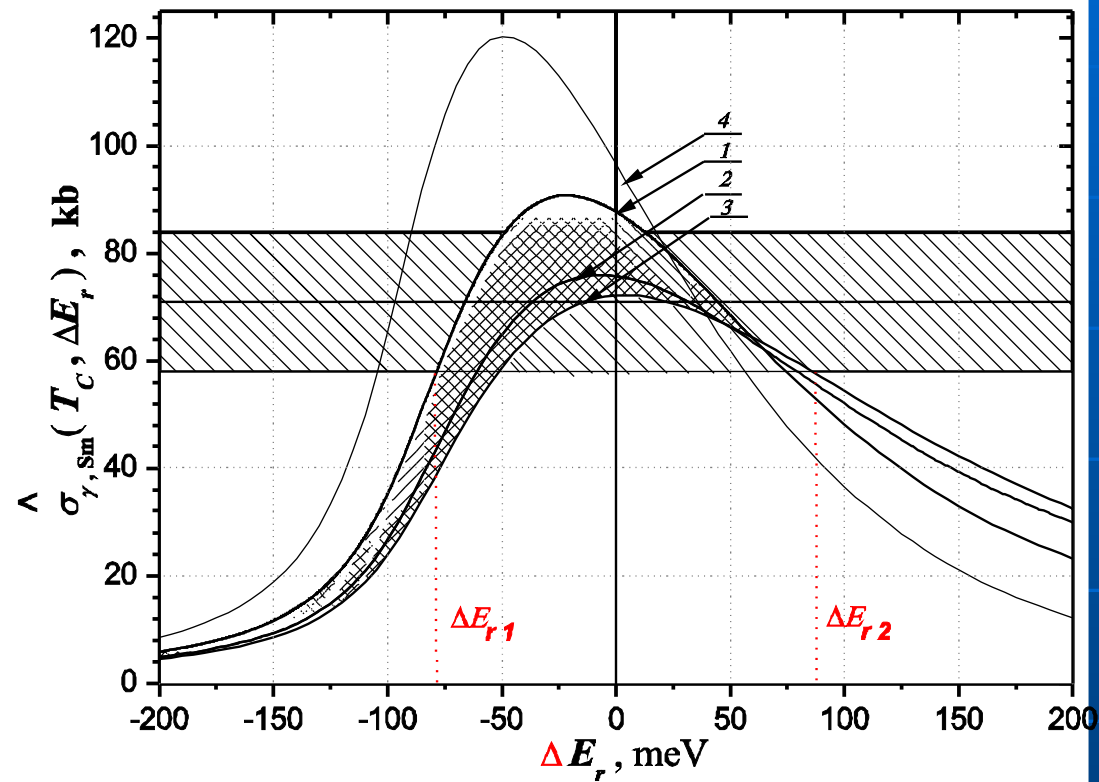


T	r	r_o
30	0	0.20
40	0.20	0.21
60	0.18	0.24
70	0.17	0.26
80	0.17	0.33
0	0.20	

Из анализа проб

$$r_o = 0,2 \quad 0,25$$





$$-73 \text{ мэВ} < \Delta E_r < 62 \text{ мэВ}$$

Если не учитывать изменение спектра при выгорании зоны.

$$-0,56 \cdot 10^{-7} < \frac{\Delta \alpha}{\alpha} < 0,66 \cdot 10^{-7}$$

$$-3,7 \cdot 10^{-17} \text{ лет}^{-1} < \frac{\Delta \alpha}{\alpha} < 3,1 \cdot 10^{-17} \text{ лет}^{-1}$$

Препринт PNPI-2581 (2004)
ArXiv:hep-ph/0506186

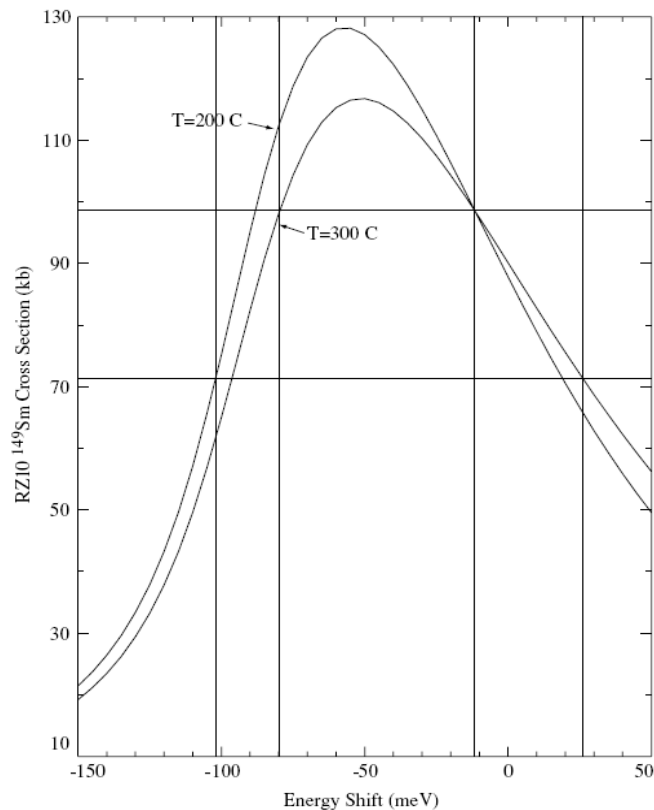
2004 Phys. Rev. D **69**, 121701(R) Lamoreaux S.K., Torgerson J.R.

$$\frac{\alpha^{\text{Окло}} - \alpha^0}{\alpha} > 0,45 \cdot 10^{-7} (6\sigma)$$

Реакторный спектр определялся из теории замедления нейтронов при предположениях не выполняющихся для зон Окло.

2006 Phys. Rev. C **74**, 064610 Petrov Yu.V., Nazarov A.I., Onegin M.S., Petrov V.Yu., Sakhnovsky E.G.

2006 Phys. Rev. C **74**, 024607 Gould C.R., Sharapov E.I., Lamoreaux S.K.



Расчеты спектров (эффективных сечений) при помощи программы MCNP. Зоны 2 и 10. (5 и 4 геохимические пробы)

Рабочий диапазон реакторных температур: 200 – 300 °C.

(Ссылка на Meshik A.P. et al. PRL 93 (2004) 182302.)

Окончательный результат получен на основе анализа проб только из Зоны 10.

$$-11,6 \text{ мэВ} < \Delta E_r < 26,0 \text{ мэВ}$$

$$-0,11 \cdot 10^{-7} < \frac{\Delta \alpha}{\alpha} < 0,24 \cdot 10^{-7}$$