



Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН

Современные ограничения на временные изменения постоянной тонкой структуры

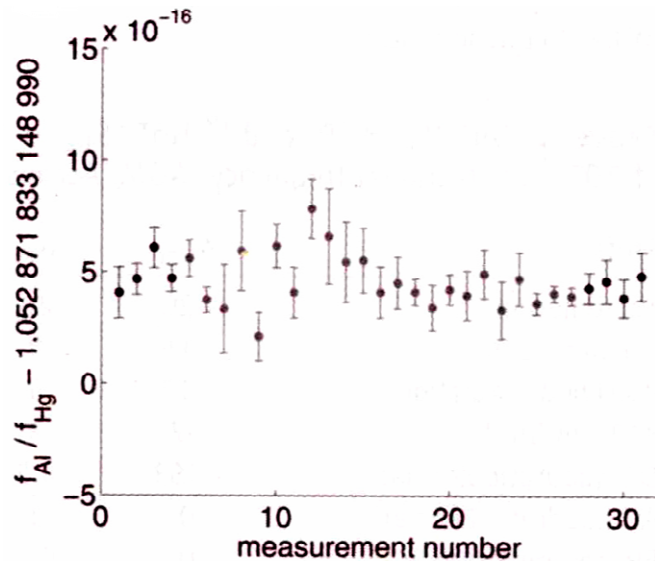
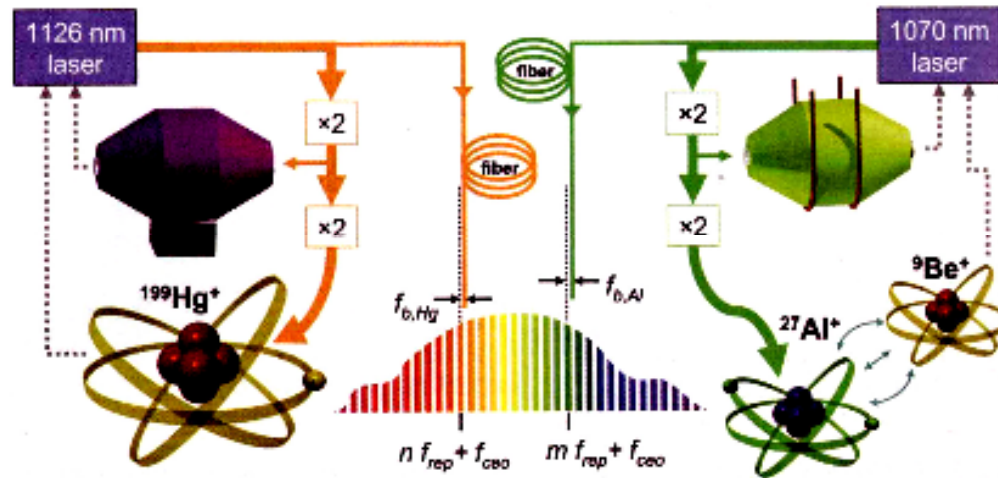
М.С. Онегин

*Всероссийское совещание по прецизионной физике и
фундаментальным физическим константам*

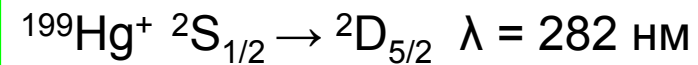
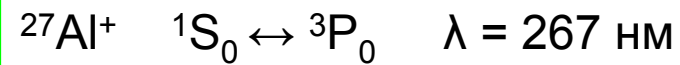
Дубна, 2009

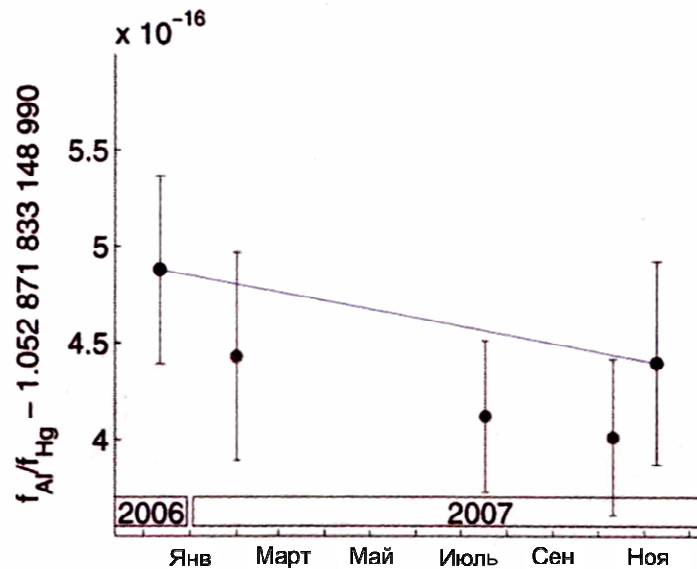
Стабильность оптических часов

Схема эксперимента
(T. Rosenband et al, Science 319 (2008) 1808)



Исследовались переходы





$$f_{Al^+} / f_{Hg^+} = 1.052871833148990438(55)$$

Наклон кривой – $(5.3 \pm 7.9) \times 10^{-17}$ лет⁻¹

В теоретических расчетах V.A. Dzuba, V.V. Flambaum, J.K. Webb, E.J. Angstromann показано, что относительное изменение α на величину δ приводит к сдвигу энергии перехода в $^{199}\text{Hg}^+$ на величину - 3.19δ ;
а в ионе $^{27}\text{Al}^+$ на величину 0.008δ .

В итоге в работе T. Rosenband et al получено ограничение на скорость изменения α (предварительный результат):

$$\dot{\alpha} / \alpha = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} \text{ лет}^{-1}$$

Исследование метеоритов

$$N_{\text{Re}} = ({}^{187}\text{Re}) / ({}^{188}\text{Os})$$

$$N_{\text{Os}} = ({}^{187}\text{Os}) / ({}^{188}\text{Os})$$

$$N_{\text{Re}}(t) = A e^{-\lambda(t-t_1)}$$

$$N_{\text{Os}}(t) = A (1 - e^{-\lambda(t-t_1)}) + B$$

$$N_{\text{Os}}(t) = S(t) N_{\text{Re}}(t) + B$$

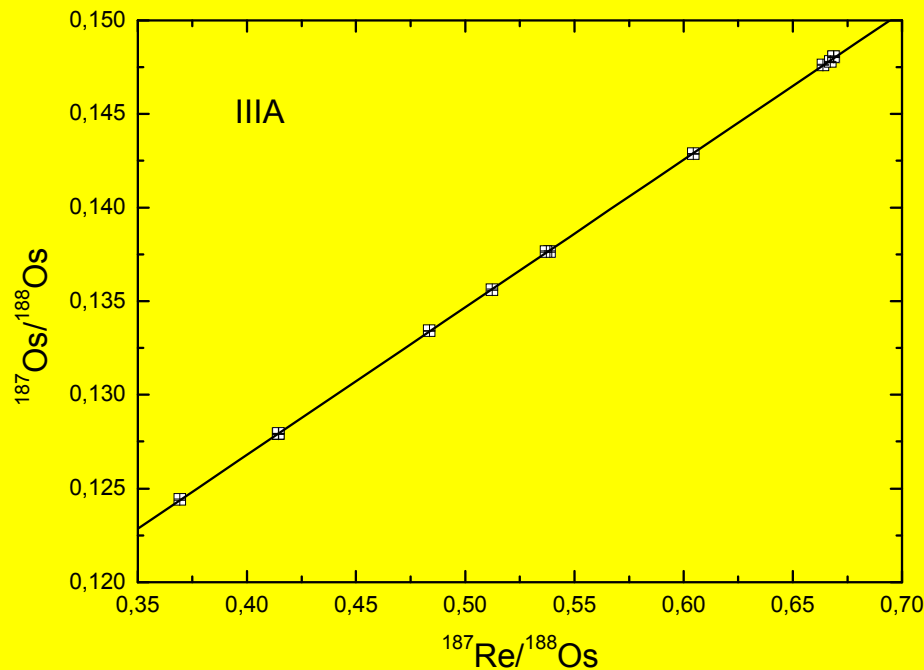
$$S(t) = e^{\lambda(t-t_1)} - 1$$

Для IIIA метеоритов возраст
 $t - t_1$ равен 4558 ± 12 млн.лет

Наклон $S(t)$ - $0.07887(22)$ (95%CL)

B - 0.09524 (95%CL)

$$\lambda = (1.666 \pm 0.008) \times 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$$



$$\lambda = (1.666 \pm 0.008) \times 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$$

Прямые измерения: $\lambda_0 = (1.639 \pm 0.025) \times 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda = (-0.027 \pm 0.026) \times 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -0.016 \pm 0.016$$

$$\lambda \sim G_F^2 Q_\beta^3 m_e^2 \qquad Q_\beta = 2,66 \pm 0,02 \text{ кэВ}$$

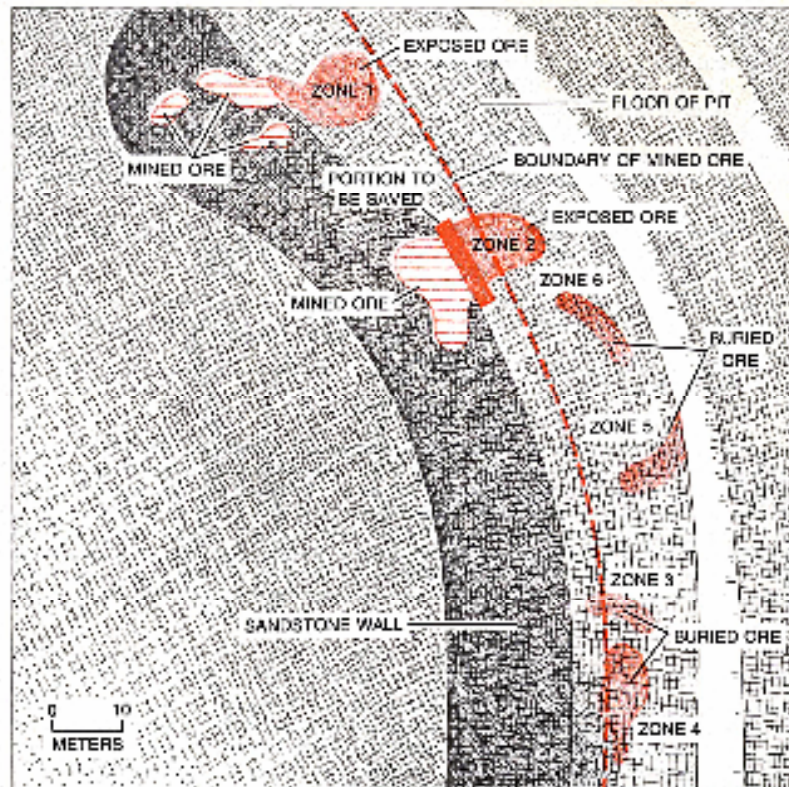
• Кулоновская энергия ядра $Q_C \sim \alpha$

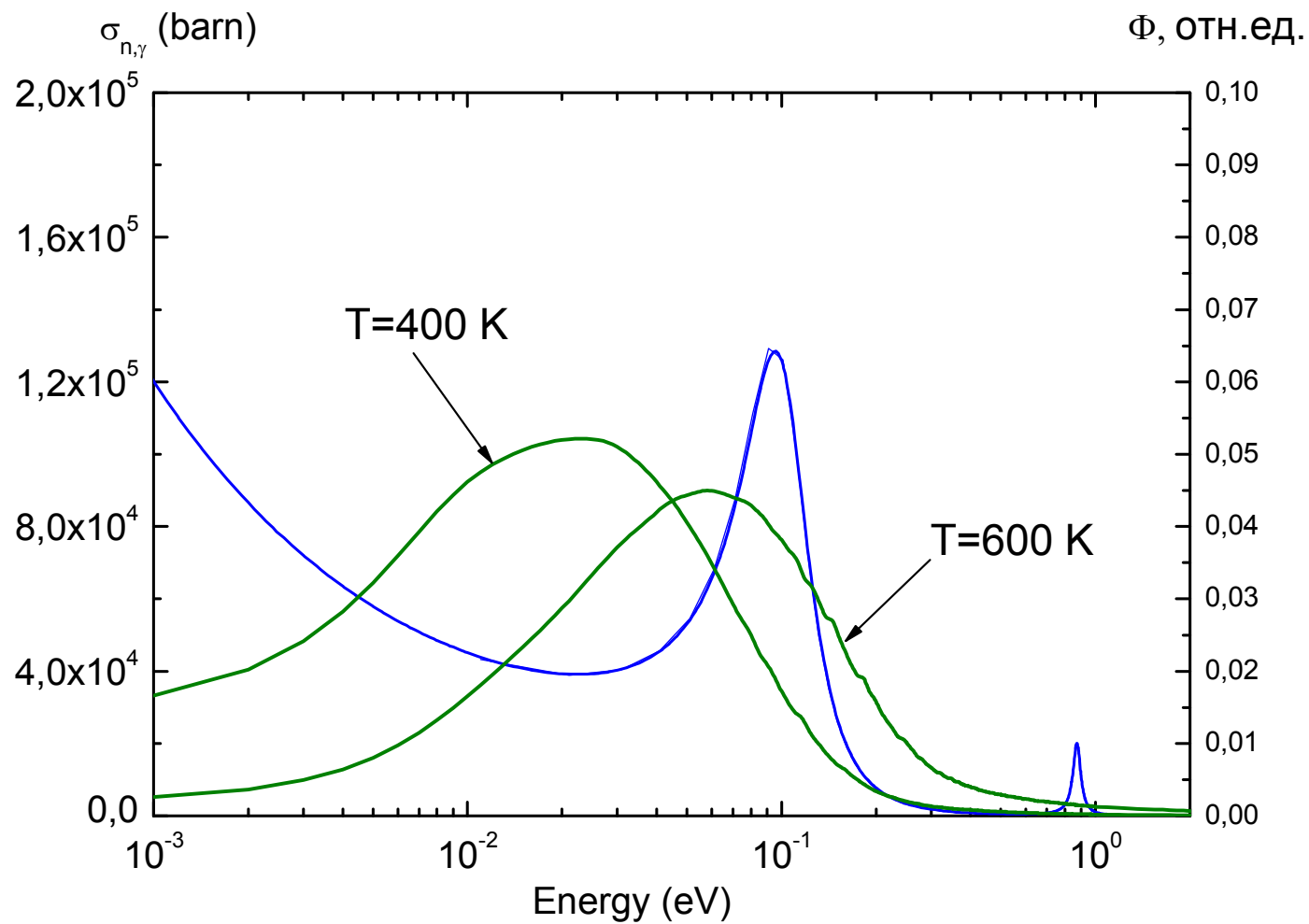
$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta Q}{Q_C} = \frac{Q_\beta}{Q_C} \frac{\Delta Q_\beta}{Q_\beta} = \frac{Q_\beta}{Q_C} \frac{\Delta\lambda}{3\lambda}$$

• $Q_\beta \ll Q_C \simeq 15,8 \text{ МэВ}$

$$-0,24 \times 10^{-5} < \frac{\Delta\alpha}{\alpha} < 0,08 \times 10^{-5} \quad (P = 0,95)$$

Реактор Окло





Синяя кривая – сечение захвата нейтрона ядром ^{149}Sm
Зеленые кривые – поток нейтронов в зоне при различных температурах

Из наблюдаемых в пробах в настоящее время концентраций $^{235}\text{U} - N_5$ и $^{238}\text{U} - N_8$ можно вычислить величину

$$w = \frac{0,00725}{N_5 / N_8}$$

Используя w и флюенс нейтронов τ , можно вычислить эффективное сечение захвата нейтрона ядром ^{149}Sm :

$$\hat{\sigma}_{149} = \frac{1}{\tau} \left[\ln w + \frac{y_{149}}{y_{147}} \frac{\ln w}{w-1} \frac{N_{147} + N_{148} - n \cdot N_{144}}{N_{149}} \right],$$

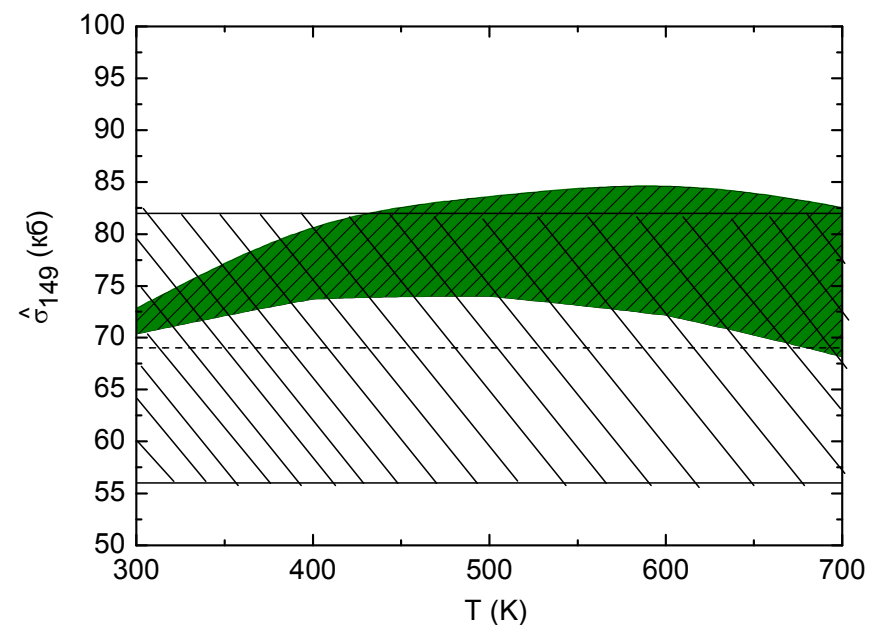
$$n = \frac{n_{147} + n_{148}}{n_{144}} \simeq 8,54.$$

Здесь, $N_{144, 147, 148, 149}$ – концентрации ядер $^{144,147,148,149}\text{Sm}$ в образцах руды, $n_{144,147,148}$ – нормальные распространенности изотопов $^{144,147,148}\text{Sm}$.

*A.I. Shlyakhter. Nature. **264**, 340 (1976).*

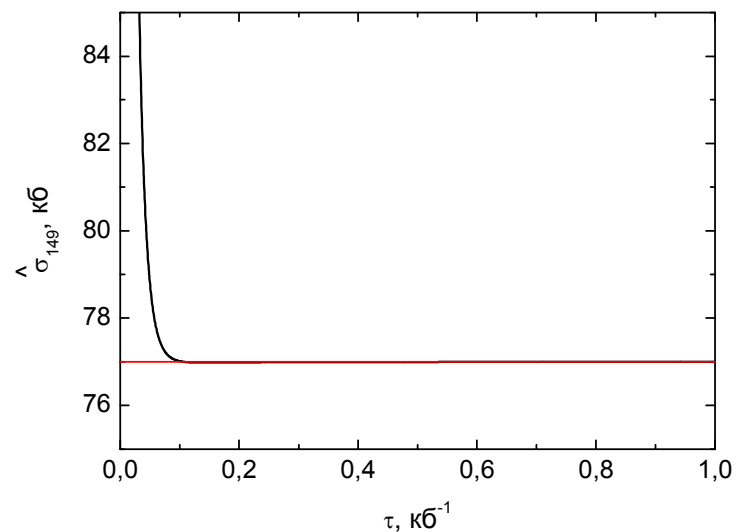
*T. Damour and F. Dayson. Nuclear Physics, **B480**, 37 (1996).*

Название образца	Эффективный флюенс τ , кб ⁻¹	$\hat{\sigma}_{149}$ кб	Ссылка
KN50-3548	1,25	93	[9]
SC36-1408/4	0,81	73	[8]
SC36-1410/3	1,07	73	[8]
SC36-1413/3	1,43	83	[8]
SC36-1418	0,94	64	[8]
SC39-1383	0,68	66	[10, 19]
SC39-1385	0,80	69	[10, 19]
SC39-1387	1,01	36	[10, 19]
SC39-1389	1,02	64	[10, 19]
SC39-1390	0,87	82	[10, 19]
SC39-1391	1,02	82	[10, 19]
SC39-1393	0,77	68	[10, 19]
SC35bis-2126	0,92	57	[10, 19]
SC35bis-2130	1,44	81	[10, 19]
SC35bis-2134	1,21	71	[10, 19]
SC43-2421	0,85	48	[10]
SC63-1970	0,43	52	[10]
SC63-1972	0,83	58	[10]
SC63-1974	1,01	72	[10]
SC63-1976	0,88	87	[10]
SC63-1978	0,80	63	[10]
SC30-2035	0,49	70	[10]
SC30-2039	0,85	74	[10]
SC52-1472	0,23	75	[11]
		69 ± 13	

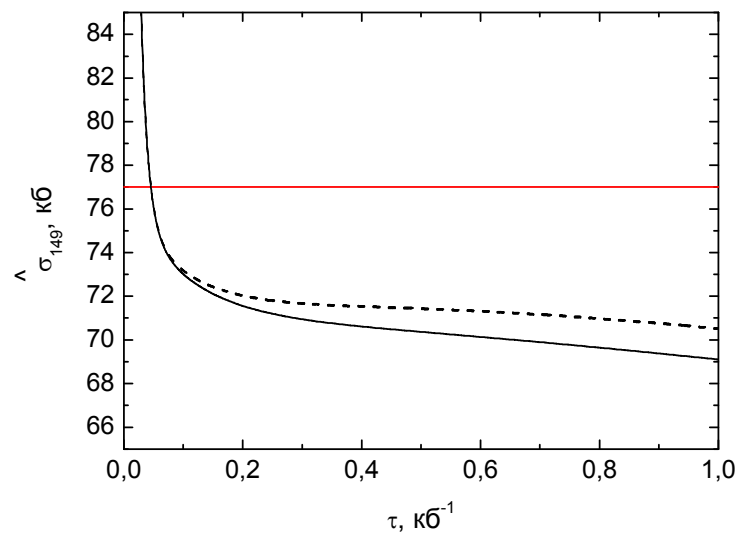


$$\hat{\sigma}_{149} = \frac{\int \sigma_{149}^{(n,\gamma)}(E) \Phi(E) dE}{\tau}$$

$$\sigma_{(n,\gamma)}(E) = g_0 \frac{\pi \hbar^2}{2mE} \frac{\Gamma_n(E) \Gamma_\gamma}{(E - E_\gamma)^2 + \Gamma_{tot}^2 / 4}$$



- Эффективный учет накопления ^{239}Pu в зоне



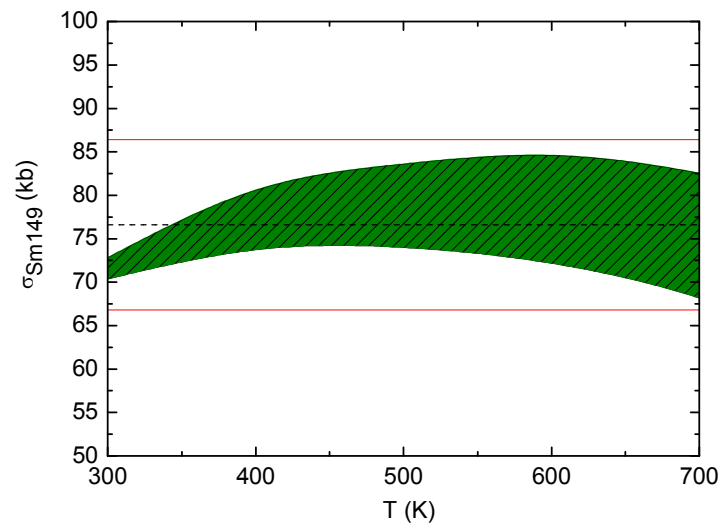
- Точный учет накопления ^{239}Pu в зоне и вклада от делений ^{239}Pu (β) и ^{238}U (α) в накопление ^{149}Sm .

Такой учет был выполнен в работе Y. Fujii et al в работе NP, B573, 377 (2000) для зоны 10. Однако в этой работе в качестве нейтронного спектра использовался нереалистичный спектр Максвелла.

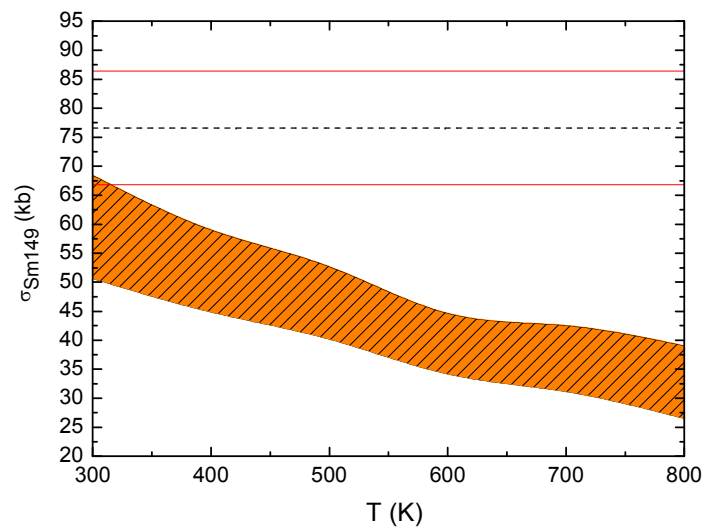
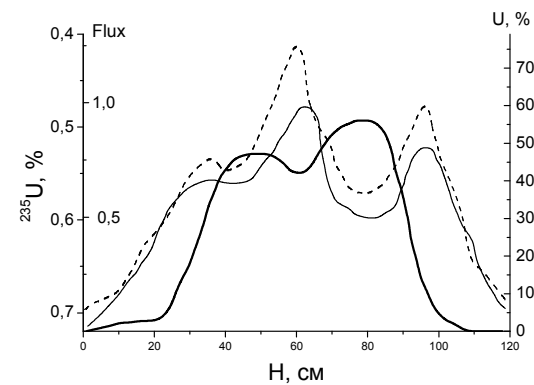
Скважина SC-36 зоны 2

Анализ образцов 1408/4, 1410/3, 1413/3, 1418

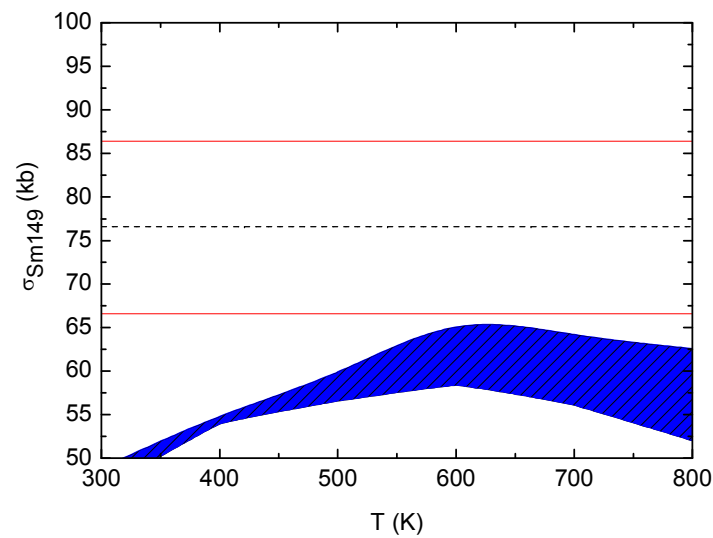
Препринт ПИЯФ №2767 (2008)



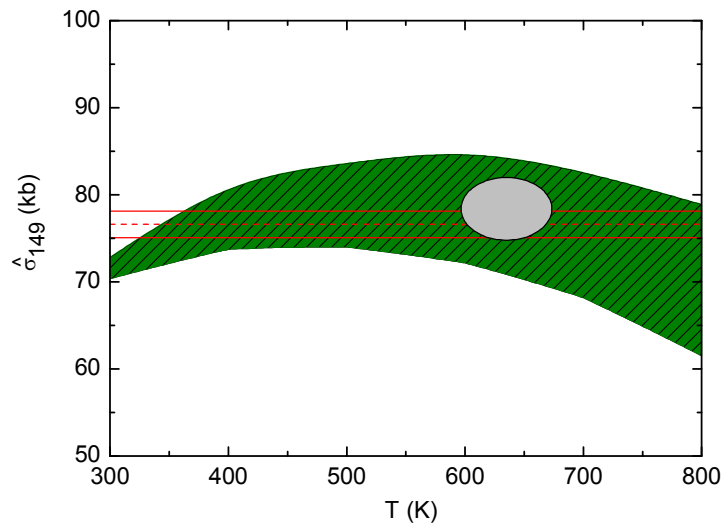
$$\hat{\sigma}_{149} = 76.6 \pm 9.8 \text{ кб}$$



$$\Delta E_r = -110 \text{ MeV}$$



$$\Delta E_r = +30 \text{ MeV}$$



Если увеличить точность определения $\hat{\sigma}_{149}$ до 2% и точнее определить условия, при которых протекала цепная реакция в Окло, можно существенно усилить ограничения на сдвиг резонанса.

Так, в работе *G.R. Gould, E.I. Sharapov and S.K. Lamoreaux – Phys.Rev. C74, 024607 (2006)* был выполнен повторный анализ эксп. данных для зоны 10. В этой работе интервал рабочих температур ограничивался областью **473 – 573 K**. Это позволило существенно сузить разрешенный диапазон для сдвига энергии резонанса:

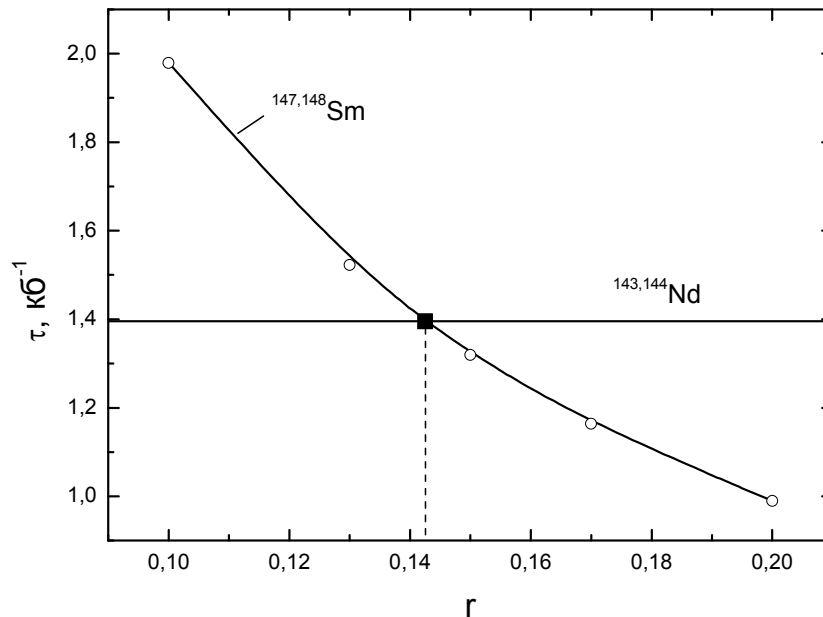
$$-11.6 \text{ мэВ} \leq \Delta E_r \leq +26.0 \text{ мэВ}$$

Параметры, влияющие на определение сечения захвата нейтрона ядром ^{149}Sm :

T – температура зоны от время работы реактора
 ω – доля воды в породе в момент работы реактора
 t_0 – время работы реактора
 p – мощность энерговыделения в реакторе

Доля воды ω в зоне определяет жесткость спектра r , которая в свою очередь влияет на сечение захвата нейтрона ядрами $^{143,145}\text{Nd}$, ^{147}Sm :

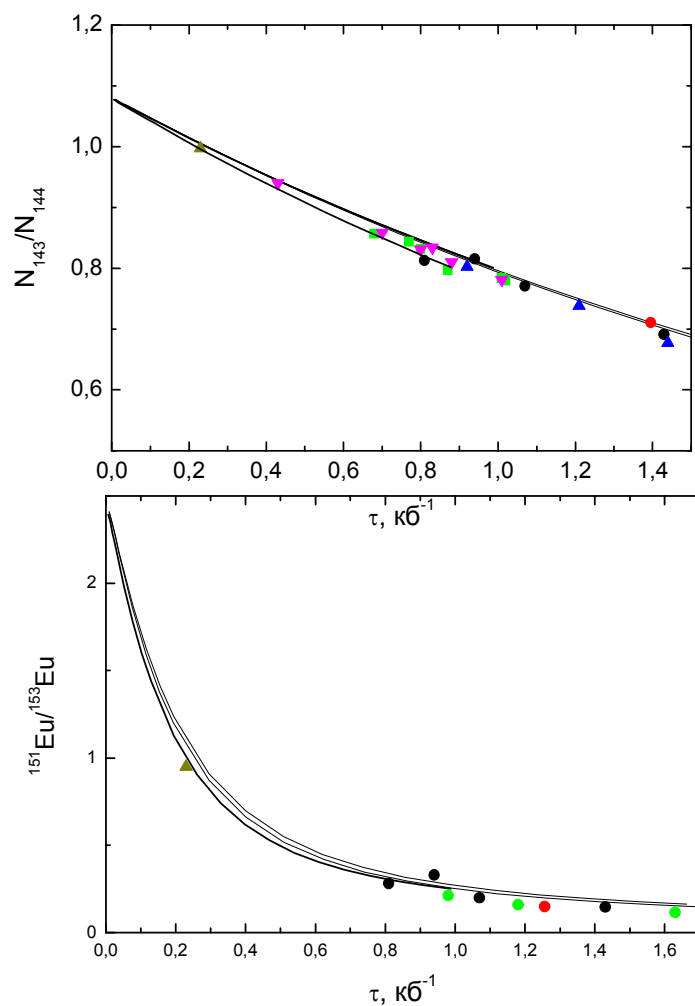
$$\hat{\sigma}(r, T) = \hat{\sigma}_0(T) + rI$$



Определение условий, при которых протекала цепная реакция деления в Окло

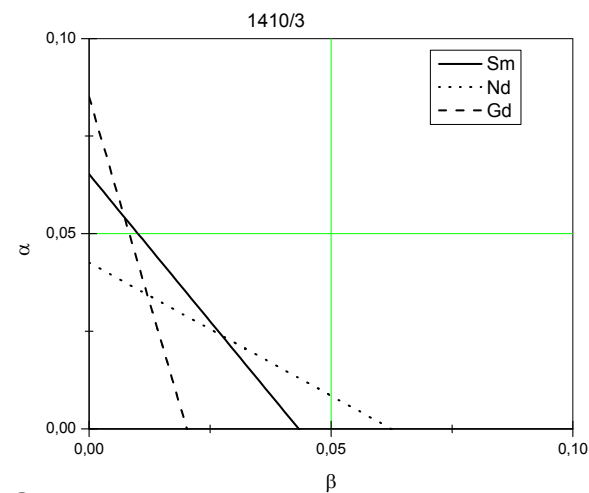
Определение флюенса нейтронов

По изотопным соотношениям $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$; $^{151}\text{Eu}/^{153}\text{Eu}$

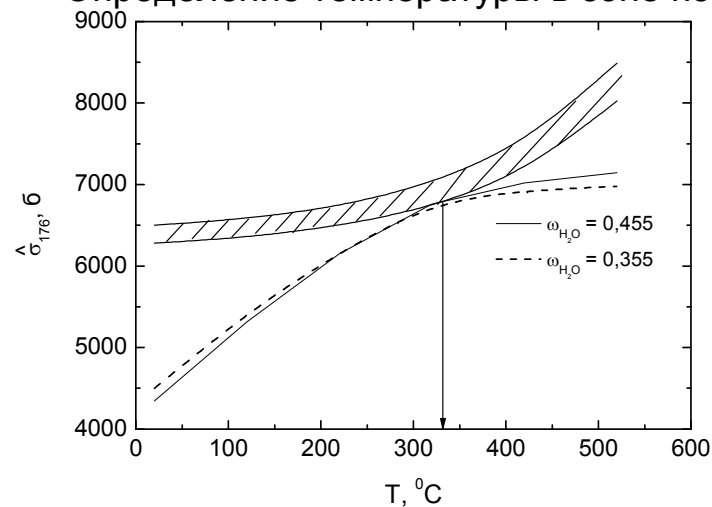


Определение доли делений $^{238}\text{U} - \alpha$, и доли делений $^{239}\text{Pu} - \beta$

$$R = \frac{Y_5'(1-\alpha-\beta) + Y_8'\alpha + Y_9'\beta}{Y_5''(1-\alpha-\beta) + Y_8''\alpha + Y_9''\beta}$$



Определение температуры в зоне по ^{176}Lu



Сравнение ограничений на изменение α , полученных по разным методикам (P=0.95)

Методика	$\Delta\alpha / \alpha$, 10^{-5}	$\Delta\dot{\alpha} / \alpha$, 10^{-15} лет $^{-1}$
Анализ метеоритов	-0.24 ÷ 0.08	-1.0 ÷ 0.35
Реактор Окло	-0.003 ÷ 0.01	-0.05 ÷ 0.014
Оптические часы Hg/Al		-0.062 ÷ 0.03