

**СЕЧЕНИЕ ЗАХВАТА
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
ЯДРОМ ^{88}Zr**

И.А.Митропольский

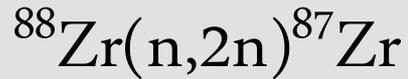
J.A. Shusterman et al. The surprisingly large neutron capture cross-section of ^{88}Zr . //Nature, 2019, v.565, p.328–330.



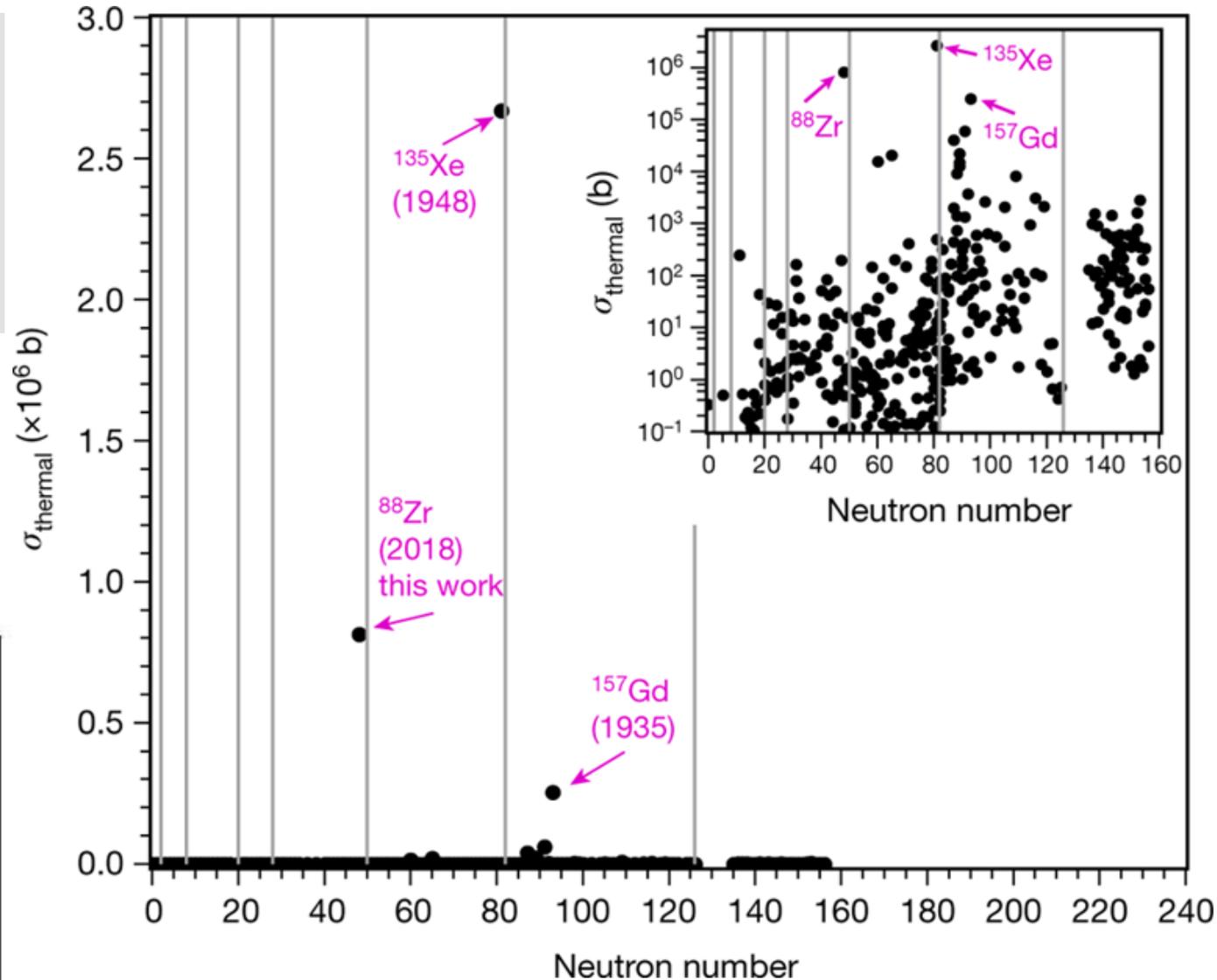
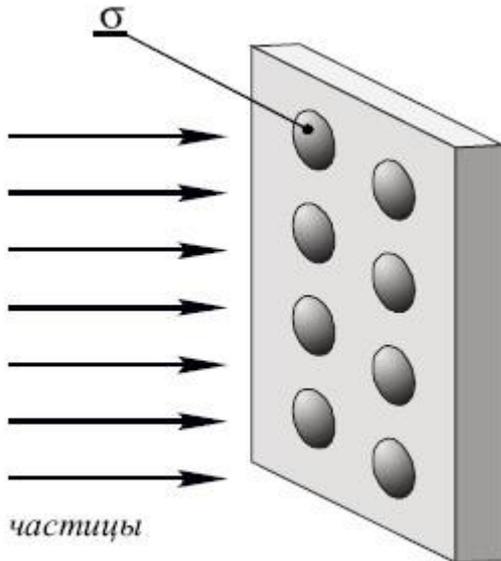
Вероятность того, что ядро может захватить нейтрон – сечение нейтронного захвата – важнейшая характеристика для задач нуклеосинтеза, физики реакторов, ядерной медицины, военных приложений.

Сечения нейтронного захвата

1984:



$$E_n = 14.8 \text{ MeV}$$



Распад $^{88}\text{Zr} \rightarrow ^{88}\text{Y}$

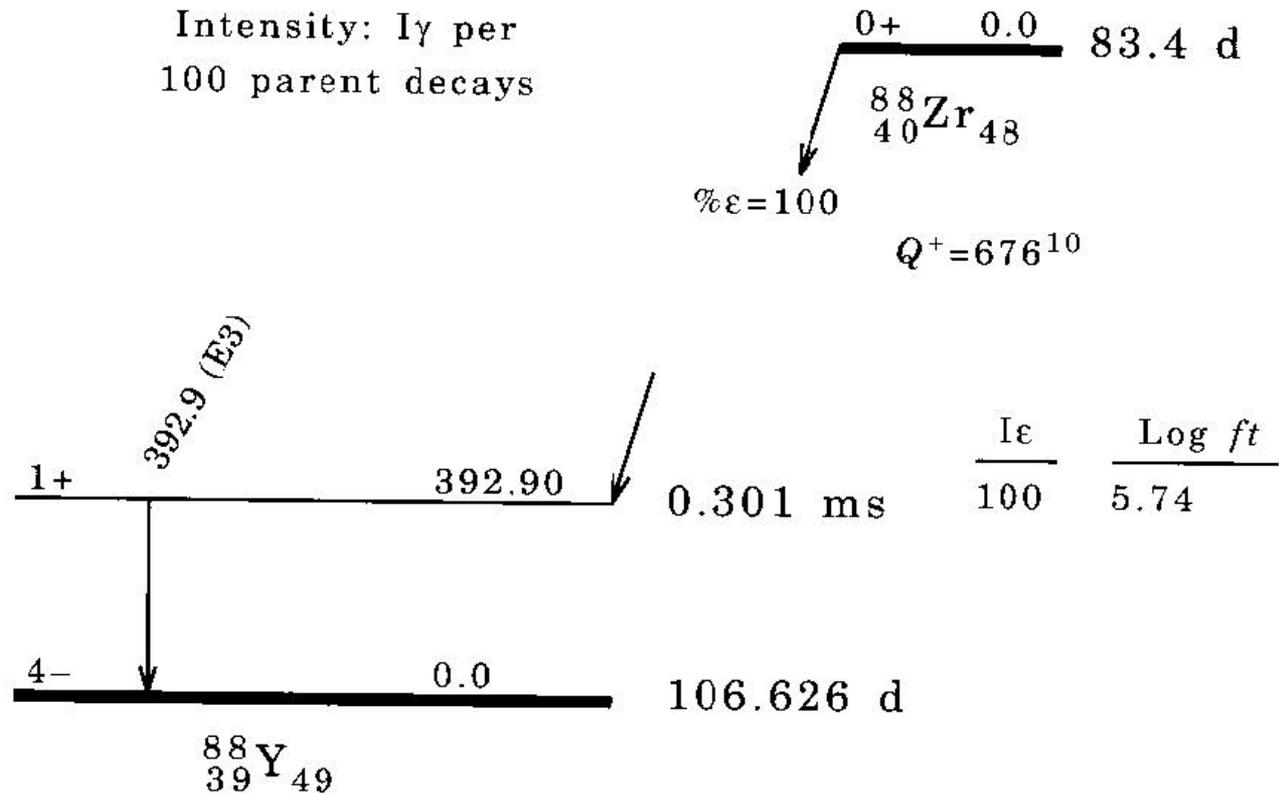
$T_{1/2} = 83.4(3) \text{ d}$, EC 100%

$Q_{\text{EC}}(^{88}\text{Zr}) = 0.670(6) \text{ МэВ}$

$E_{\gamma} = 392.87(9) \text{ кэВ}$, **97.29%**

Decay Scheme

Intensity: I_{γ} per
100 parent decays



Распад $^{88}\text{Y} \rightarrow ^{88}\text{Sr}$

$T_{1/2} = 106.626(21) \text{ d}$, EC 100%

$Q_{\text{EC}}(^{88}\text{Y}) = 3.6225(15) \text{ МэВ}$

E_{γ} : 850.6(8) 0.07

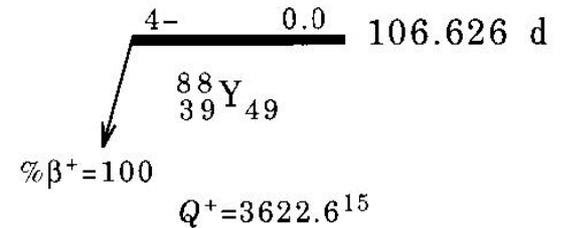
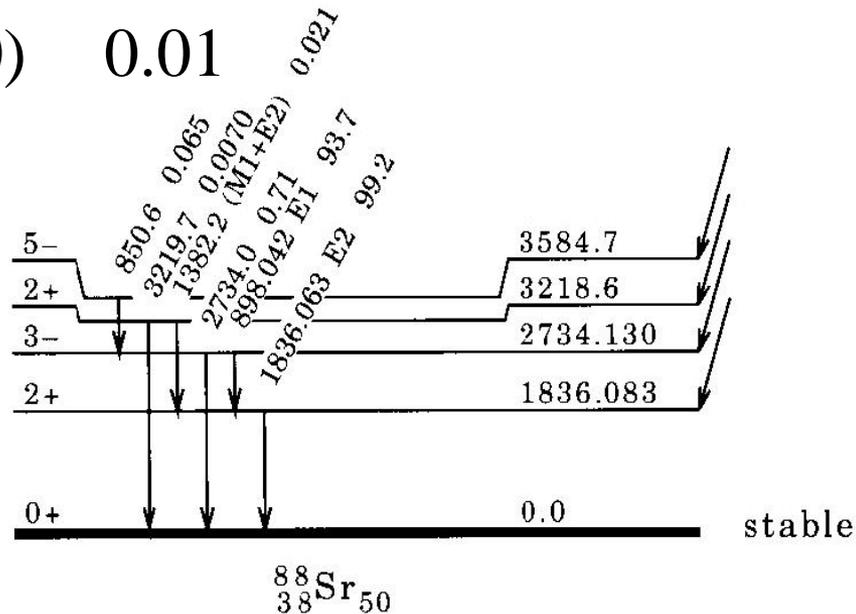
898.042(3) 93.68 Decay Scheme

1382.2(10) 0.02 Intensities: I_{γ} per 100 parent

1836.063(12) 99.24 decays

2734.0(5) 0.71

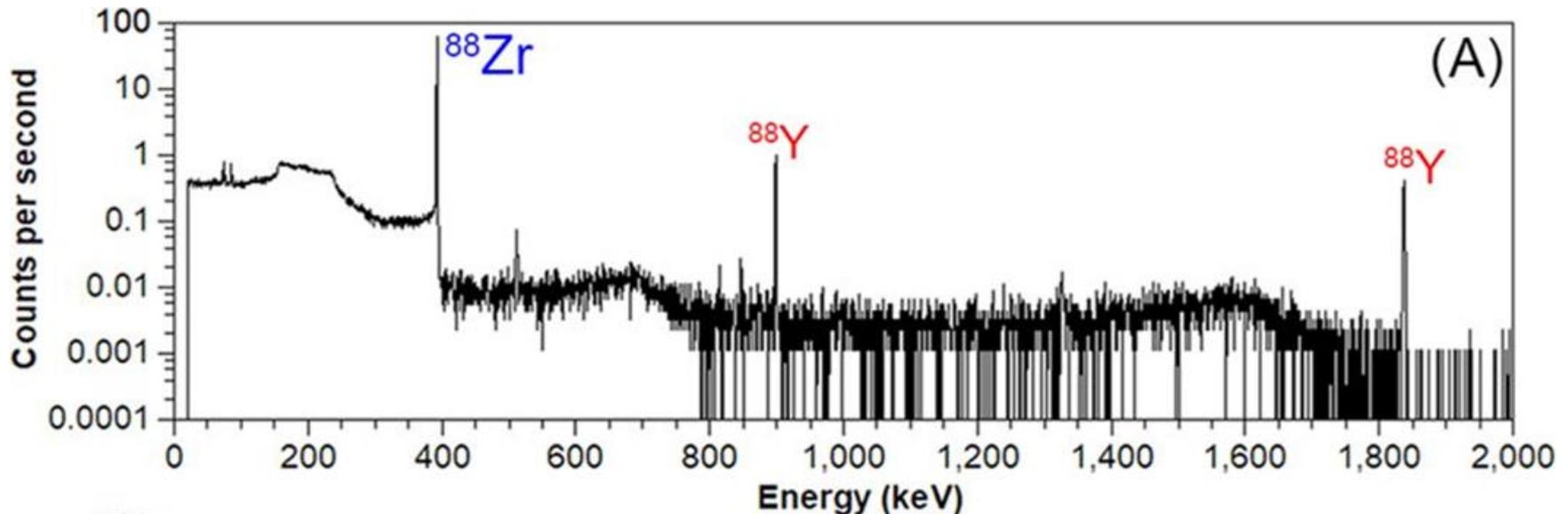
3219.7(20) 0.01



$I\beta^+$	$I\epsilon$	$\text{Log } ft$
	0.065	6.89
	0.028	9.45 ^{1u}
	94.4	6.8517
0.21	5.3	9.80 ^{1u}

^{88}Zr

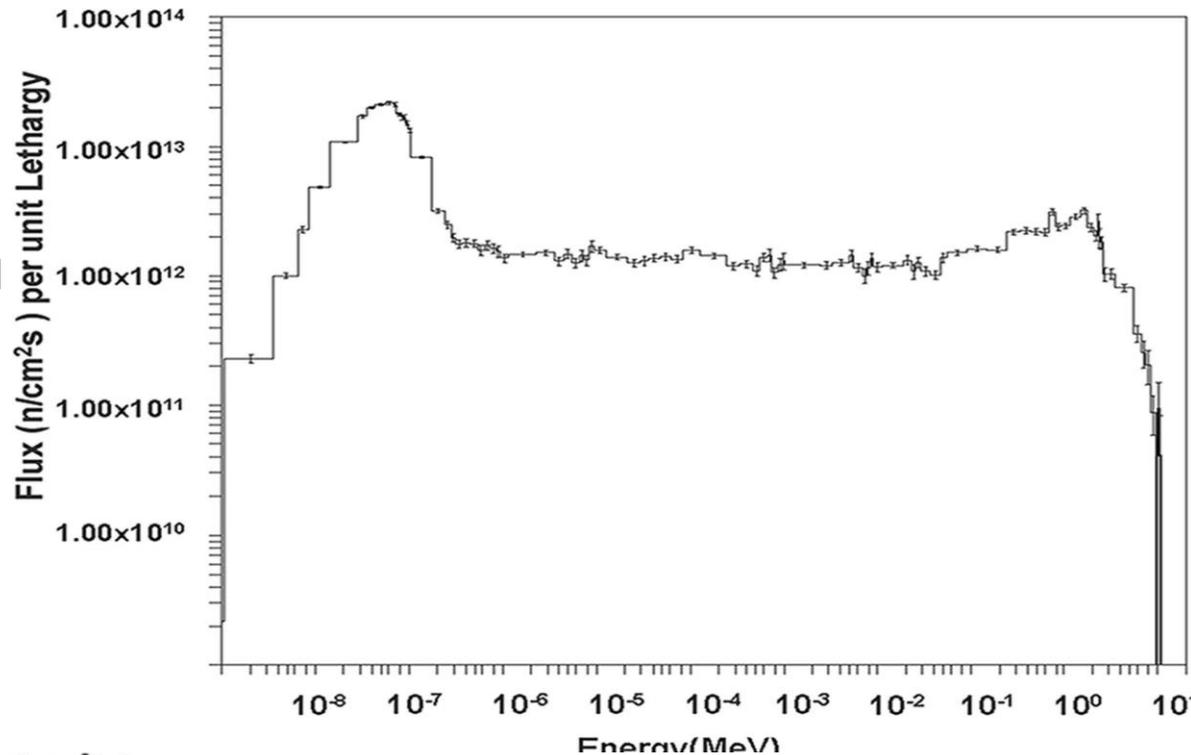
получали на циклотроне Университета Алабамы,
 $^{89}\text{Y}(p,2n)^{88}\text{Zr}$,
химически очищали (хроматография) и
запаивали в кварцевые ампулы по ~ 37 кБк.



Облучение тепловыми нейтронами



Поток нейтронов
(Университет
Миссури)
 $(6.7-8.7) \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
мониторировался с
помощью фольг с
точностью 7%-11%.
Время облучения:
от 5 мин. до 50 час.

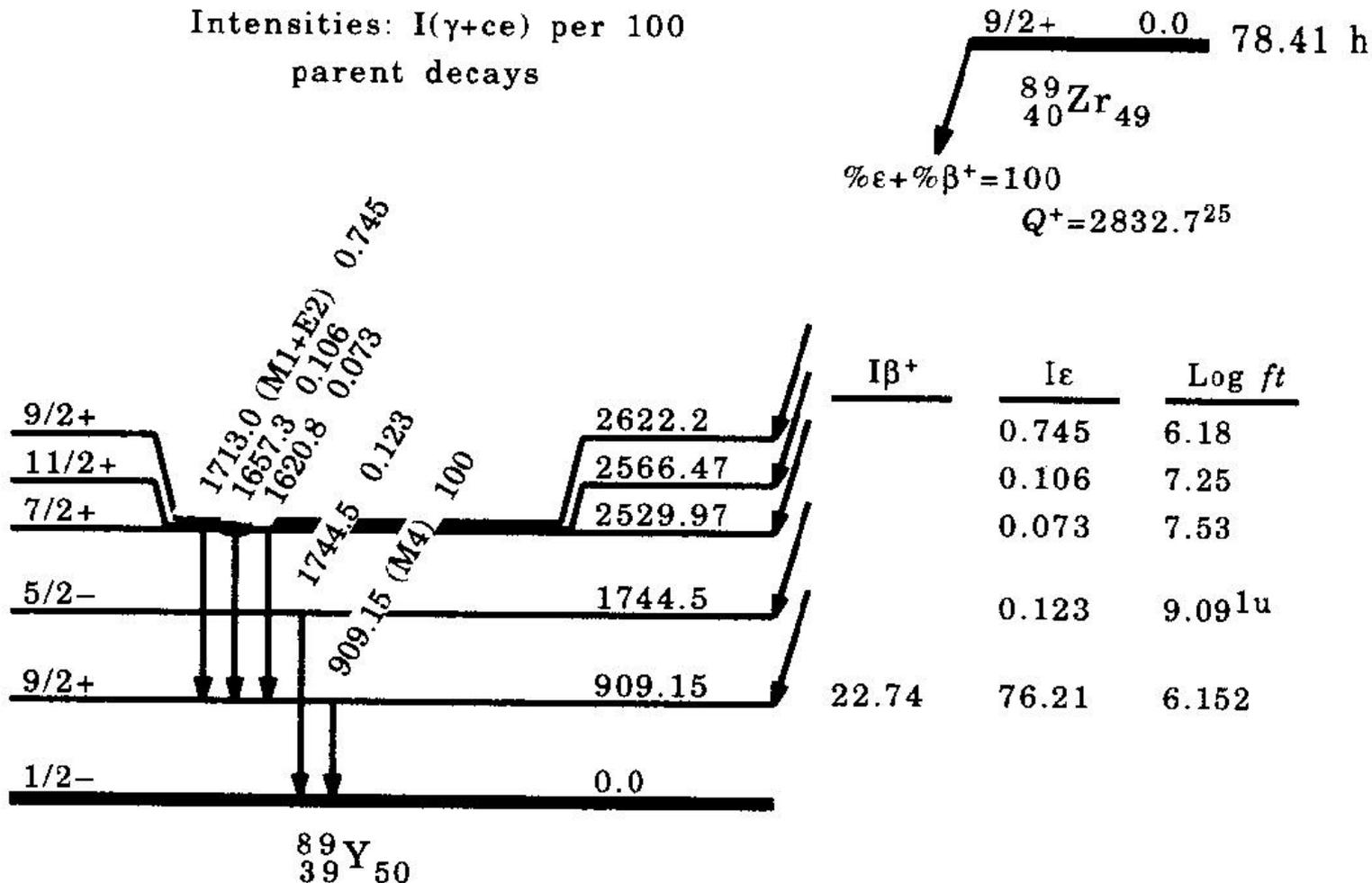


Sample	Measured Average Flux (n/cm ² /s)		Ratio Thermal/Resonance	Monitor Foils Used
	Thermal (×10 ¹³)	Resonance (×10 ¹²)		
1	8.54±0.77	2.74±0.41	31.17	Fe, Zr, Mo, Y
2	7.65±0.61	2.35±0.34	32.59	Fe, Zr, Mo, Y
3	7.30±0.52	2.43±0.33	30.05	Fe, Zr, Mo, Y
4	6.68±0.48	2.79±0.37	23.92	Fe, Zr
5	7.20±0.52	2.59±0.34	27.80	Fe, Zr
6	6.81±0.52	2.60±0.35	26.23	Fe, Zr
7	8.71±0.96	4.23±0.71	20.59	Fe, Zr

Распад $^{89}\text{Zr} \rightarrow ^{89}\text{Y}$

Decay Scheme

Intensities: $I(\gamma+ce)$ per 100
parent decays



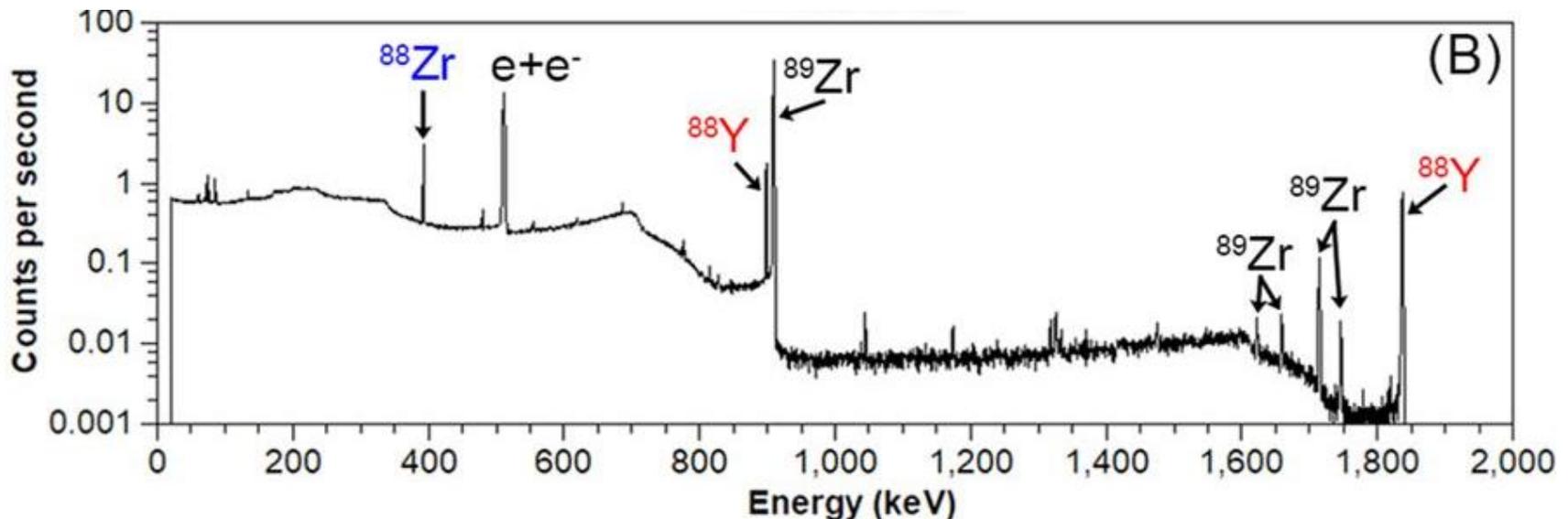
Распад $^{89}\text{Zr} \rightarrow ^{89}\text{Y}$

$T_{1/2} = 78.41(12) \text{ h}$ (3.27 d), EC 100%

$Q_{\text{EC}}(^{89}\text{Zr}) = 2.833(3) \text{ МэВ}$

E_{γ} :	909.15(15) кэВ,	99.04%
	1620.8(2) кэВ,	0.07%
	1657.3(2) кэВ,	0.11%
	1713.0(6) кэВ,	0.75%
	1744.5(2) кэВ,	0.12%

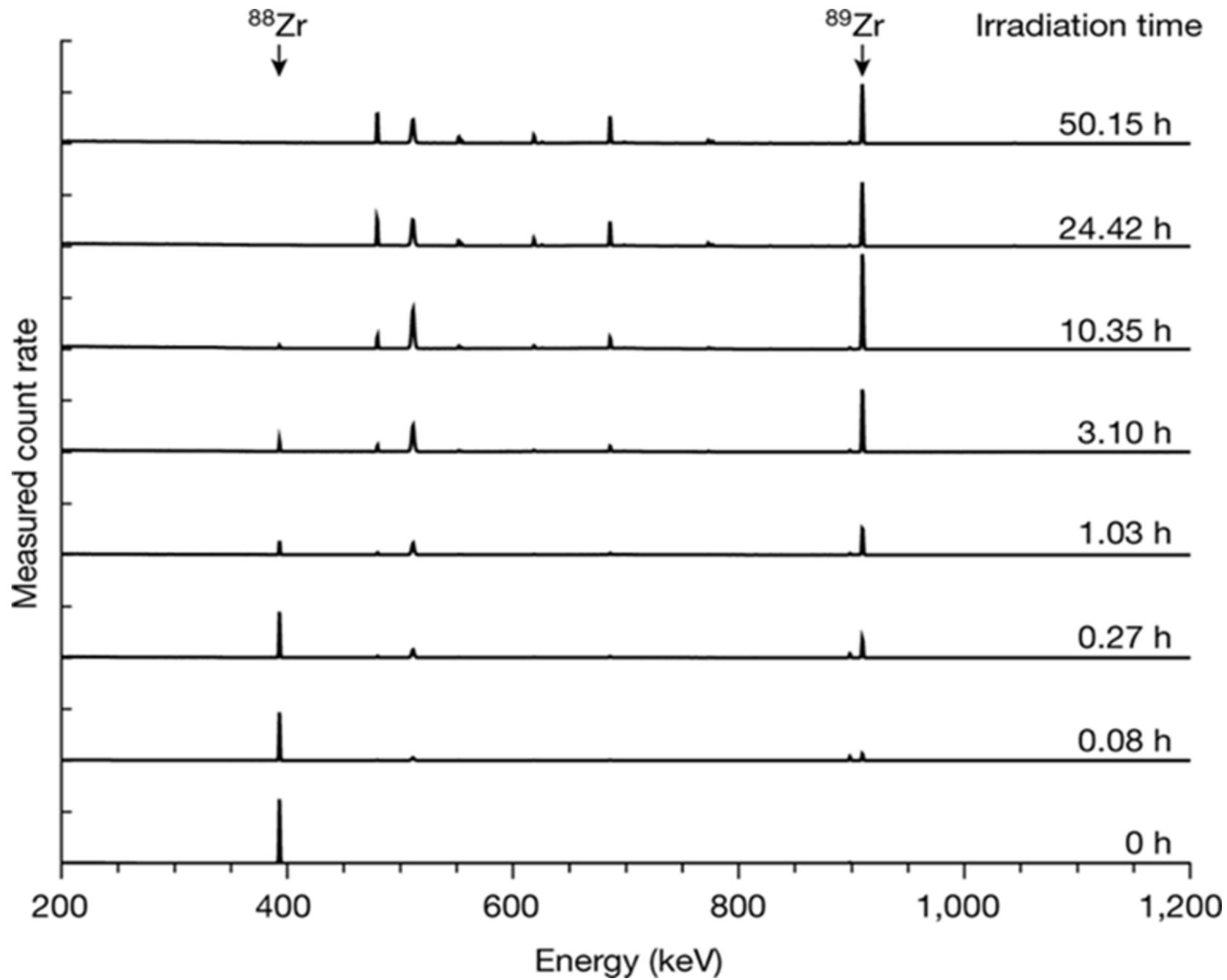
После 10 час.
облучения
нейтронами и
последующей
семидневной
выдержки ↓



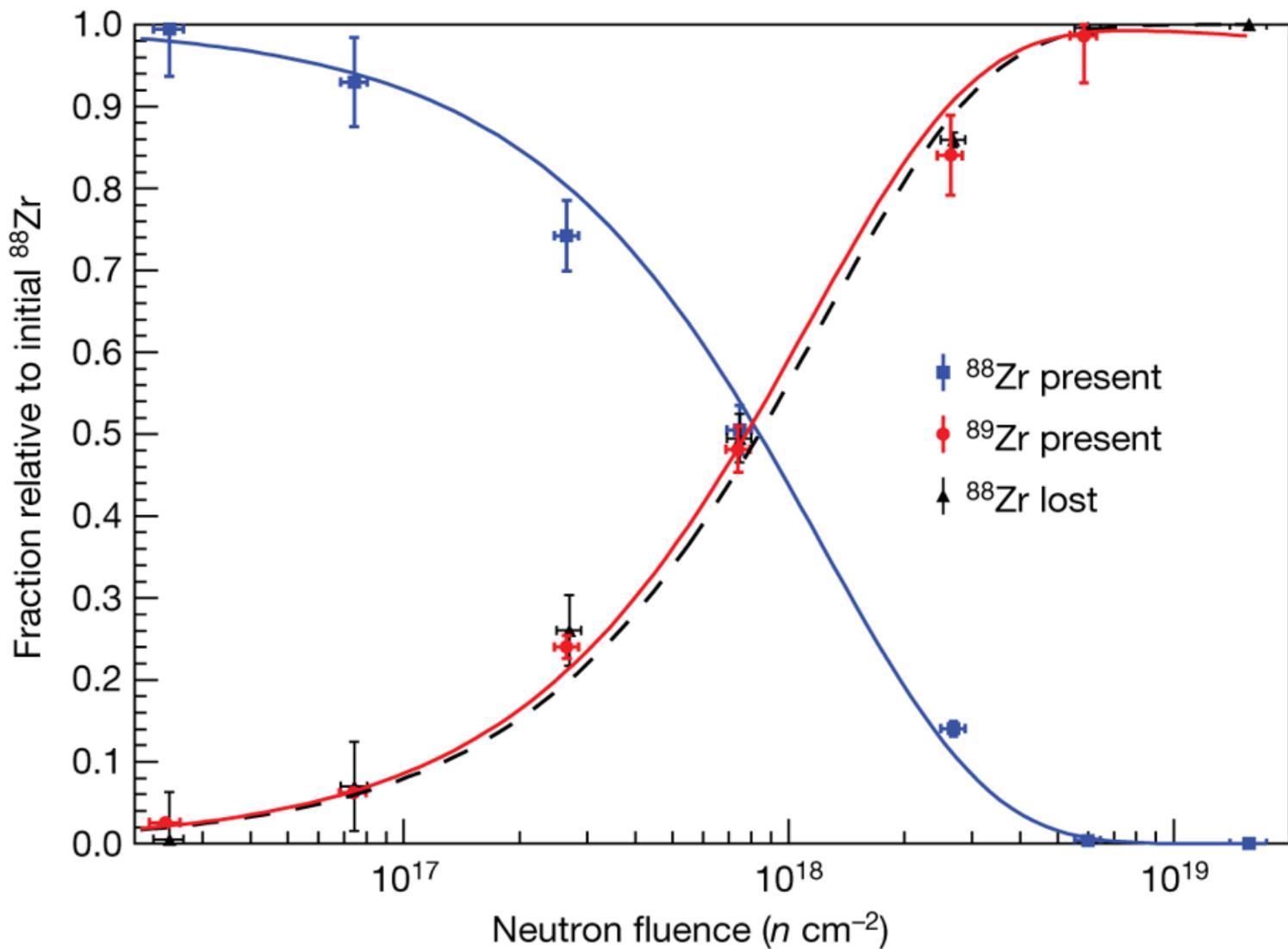
Гамма-спектры

Измерение гамма-спектров начиналось через два дня после окончания нейтронного облучения и продолжалось в течение нескольких месяцев для мониторинга γ -лучей, испускаемых распадами ^{88}Zr , ^{89}Zr и ^{88}Y , а также для поиска признаков распада других видов.

Sample	^{88}Zr activity at beginning of irradiation (kBq)	Irradiation time (hrs)	^{88}Zr activity at EOB (kBq)	^{89}Zr activity at EOB (kBq)
1	37.0 ± 1.5	0.08	36.8 ± 1.5	19.1 ± 0.8
2	37.5 ± 1.5	0.27	34.9 ± 1.4	55.4 ± 2.4
3	34.9 ± 1.4	1.03	25.8 ± 1.1	194.2 ± 8.0
4	35.3 ± 1.4	3.10	17.8 ± 0.8	400.5 ± 16.4
5	36.0 ± 1.4	10.35	5.1 ± 0.3	679.3 ± 27.7
6	33.2 ± 1.3	24.42	0.13 ± 0.02	659.1 ± 26.9
7	35.8 ± 1.4	50.15	< 0.003	568.3 ± 23.6



Динамика активности



Определение сечений захвата

Число атомов ^{88}Zr оставшихся после нейтронного облучения в потоке Φ :

$$N_{88}(\Phi) = N_{88}(0)e^{-\sigma_{88}\Phi} .$$

Число атомов ^{89}Zr произведённых за время облучения

$$N_{89}(\Phi) = N_{88}(0) \frac{\sigma_{88}}{\sigma_{89} - \sigma_{88}} \left(e^{-\sigma_{88}\Phi} - e^{-\sigma_{89}\Phi} \right)$$

Из подгонки оказалось, что

$$\sigma_{89} < 1.2 \times 10^4 \text{ барн}$$

Результаты

Из результатов по выгоранию ^{88}Zr сечение было определено как

$$\sigma = (8.27 \pm 0.64) \times 10^5 \text{ барн}$$

По производству ^{89}Zr -

$$\sigma = (8.95 \pm 0.72) \times 10^5 \text{ барн}$$

Неопределенности возникают в основном из определения потока нейтронов.

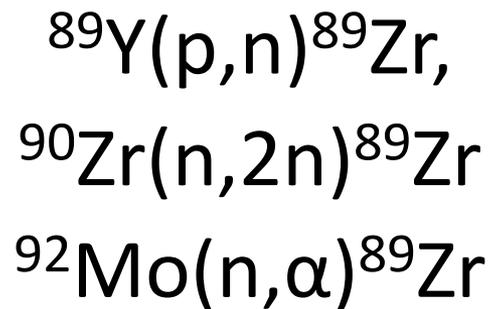
Усреднение этих значений их дает сечение захвата тепловых нейтронов ^{88}Zr :

$$\sigma = (8.61 \pm 0.69) \times 10^5 \text{ барн}$$

$$\sigma = 8.6(7) \times 10^5 \text{ барн}$$

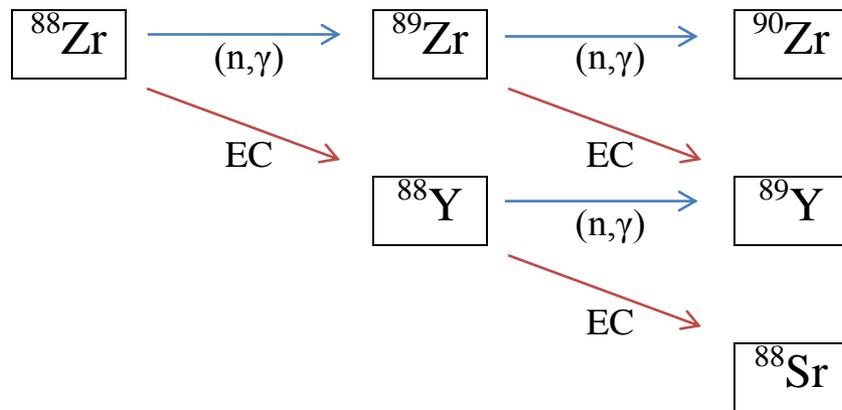
Оценка систематики

- Выгорание ^{89}Zr в больших нейтронных потоках σ_{89} : $^{89}\text{Zr}(n,\gamma)^{90}\text{Zr}$
- Роль резонансного поглощения
- Конкурирующие реакции, приводящие к появлению ^{89}Zr или исчезновению ^{88}Zr в облученных образцах:



Контроль за содержанием примесей.

Полная схема превращений



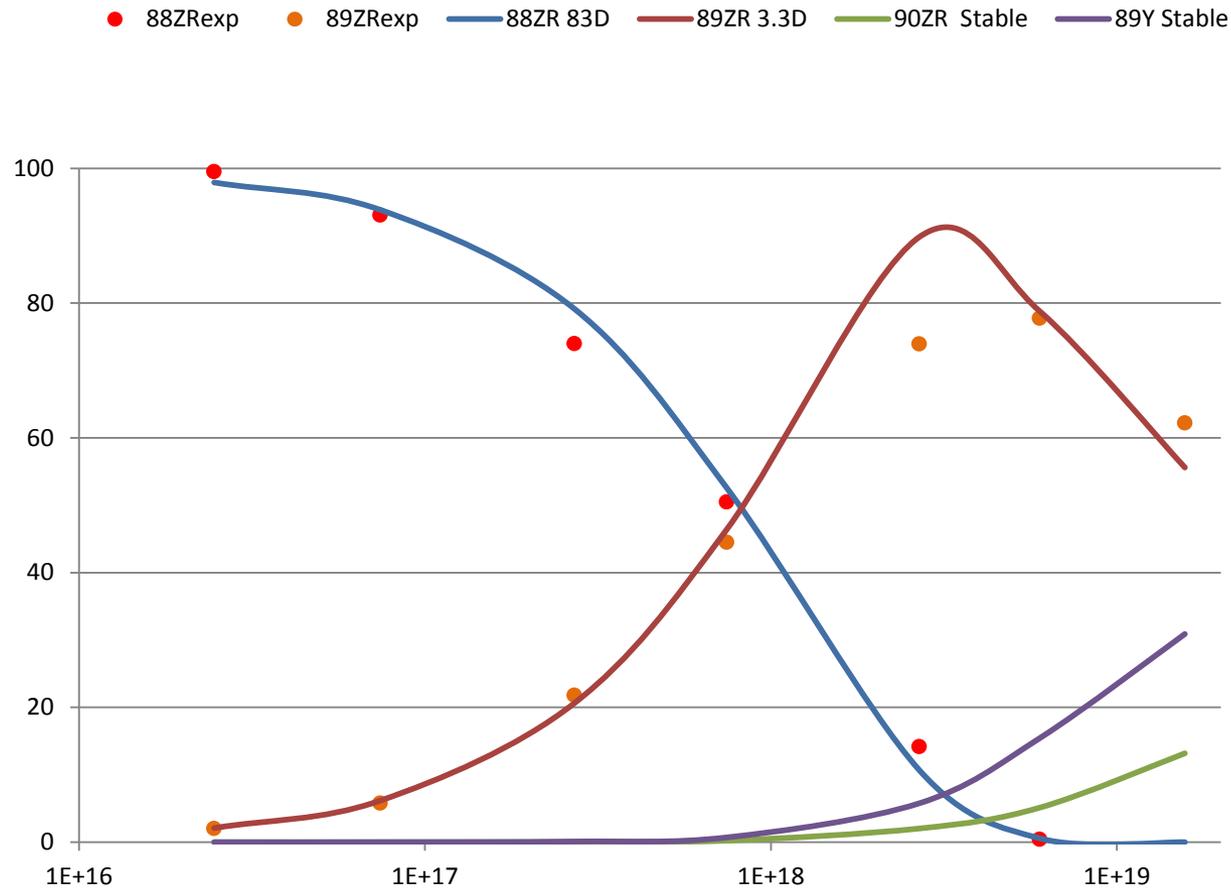
Изменение числа N_i ядер типа i при нейтронном облучении и распадах описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i} A_{ji} N_j - B_i N_i,$$

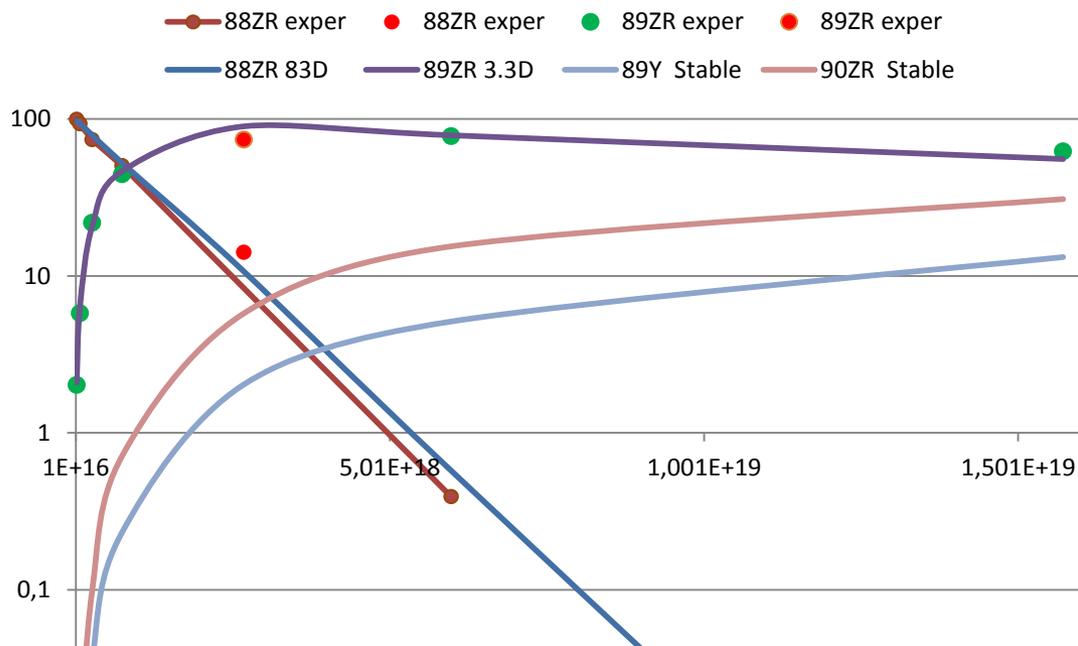
где для процесса облучения: $A_{ji} = a_{ji} + b_{ji}$, $B_i = \sum_{j \neq i} (a_{ij} + b_{ij})$

а для процесса распада: $A_{ji} = b_{ji}$, $B_i = \sum_{j \neq i} b_{ij}$

Моделирование облучения



Определение параметров



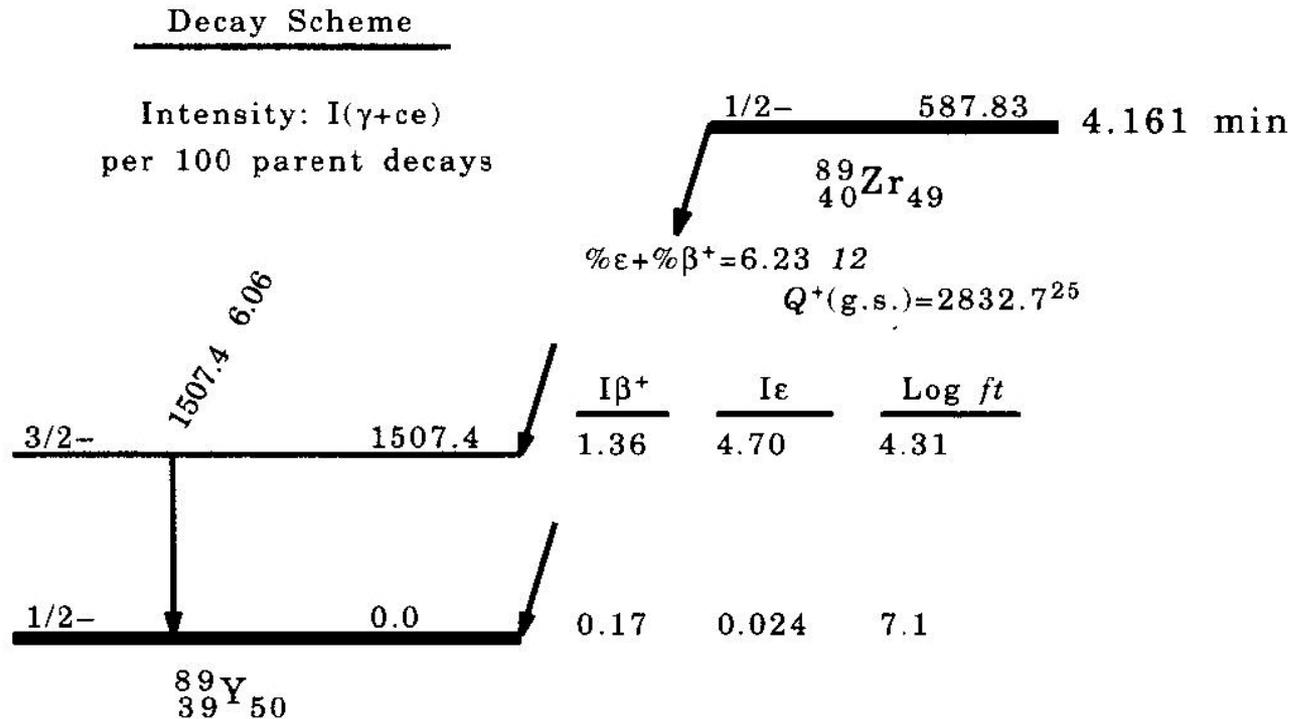
Без данных 5-го измерения (облучение 10 часов и выдержка 7 дней) сечение нейтронного захвата ^{88}Zr становится ещё больше:

$$\sigma \approx 1.1 \cdot 10^6 \text{ барн} \quad \text{при } \chi^2 = 1.8$$

Распад изомера $^{89m}\text{Zr} \rightarrow ^{89}\text{Y}$

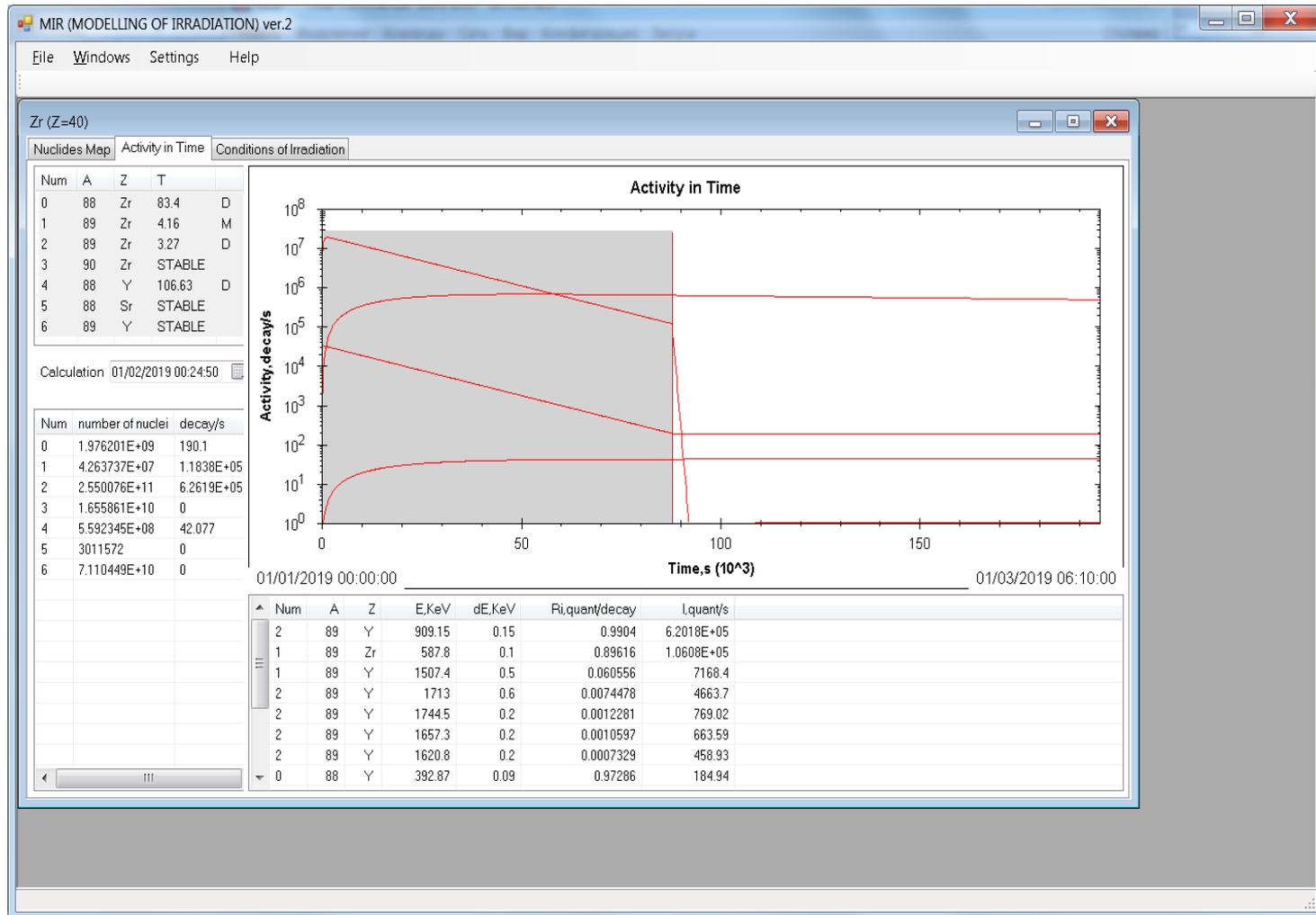
$T_{1/2} (^{89m}\text{Zr}) = 4.161(17) \text{ m}$, IT 93.77%, EC 6.23%

$E_\gamma = 1507.4(9) \text{ кэВ}$, 6.06% на распад



После облучения нейтронами образцы выдерживались не менее 2-х дней.

Роль изомера ^{89m}Zr в процессе активации



Спасибо за внимание!

Mitropolsky_IA@pnpi.nrcki.ru