

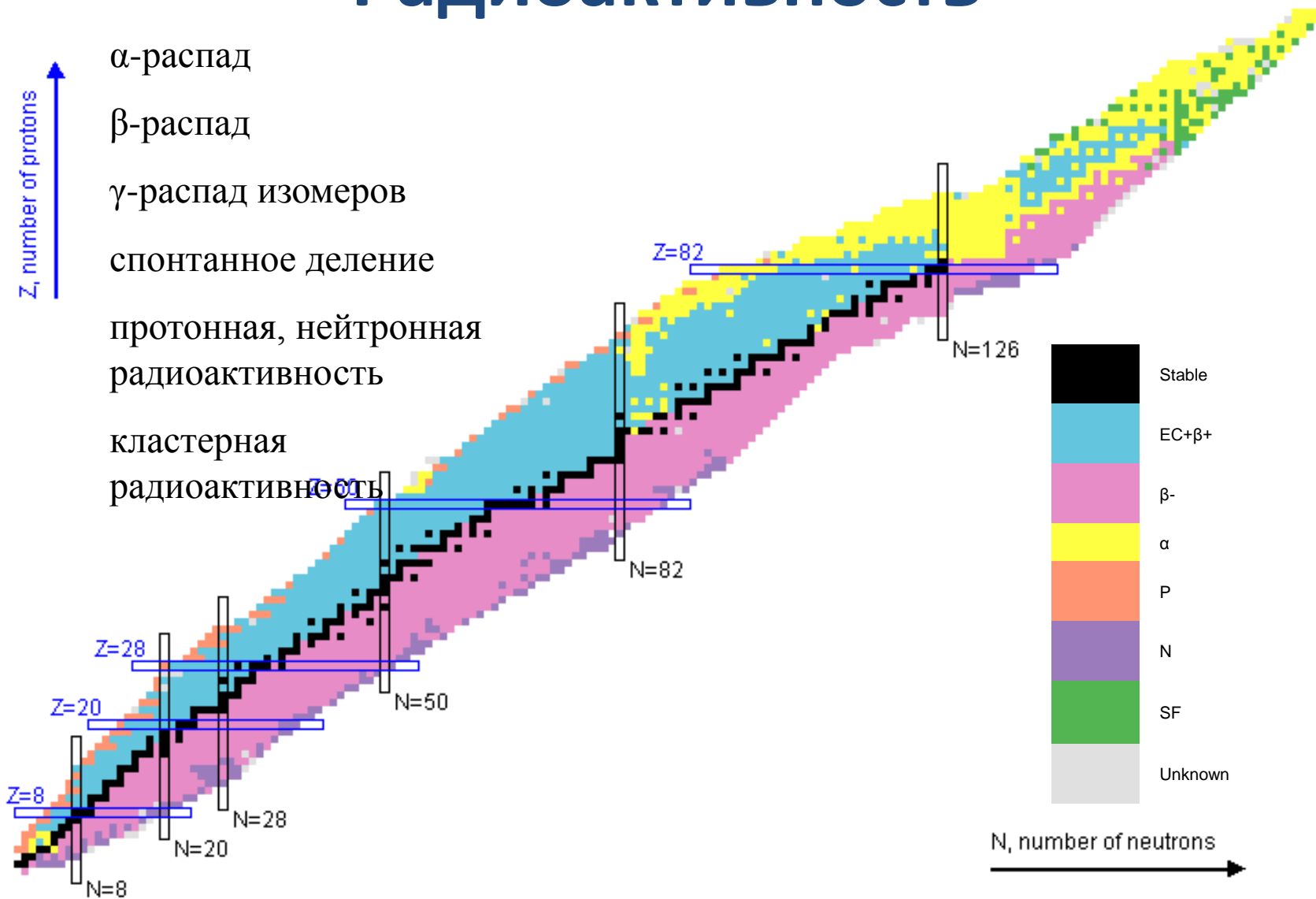
ИЗМЕРЕНИЕ РЕКОРДНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ^{124}Xe

И.А.Митропольский

по материалам публикаций

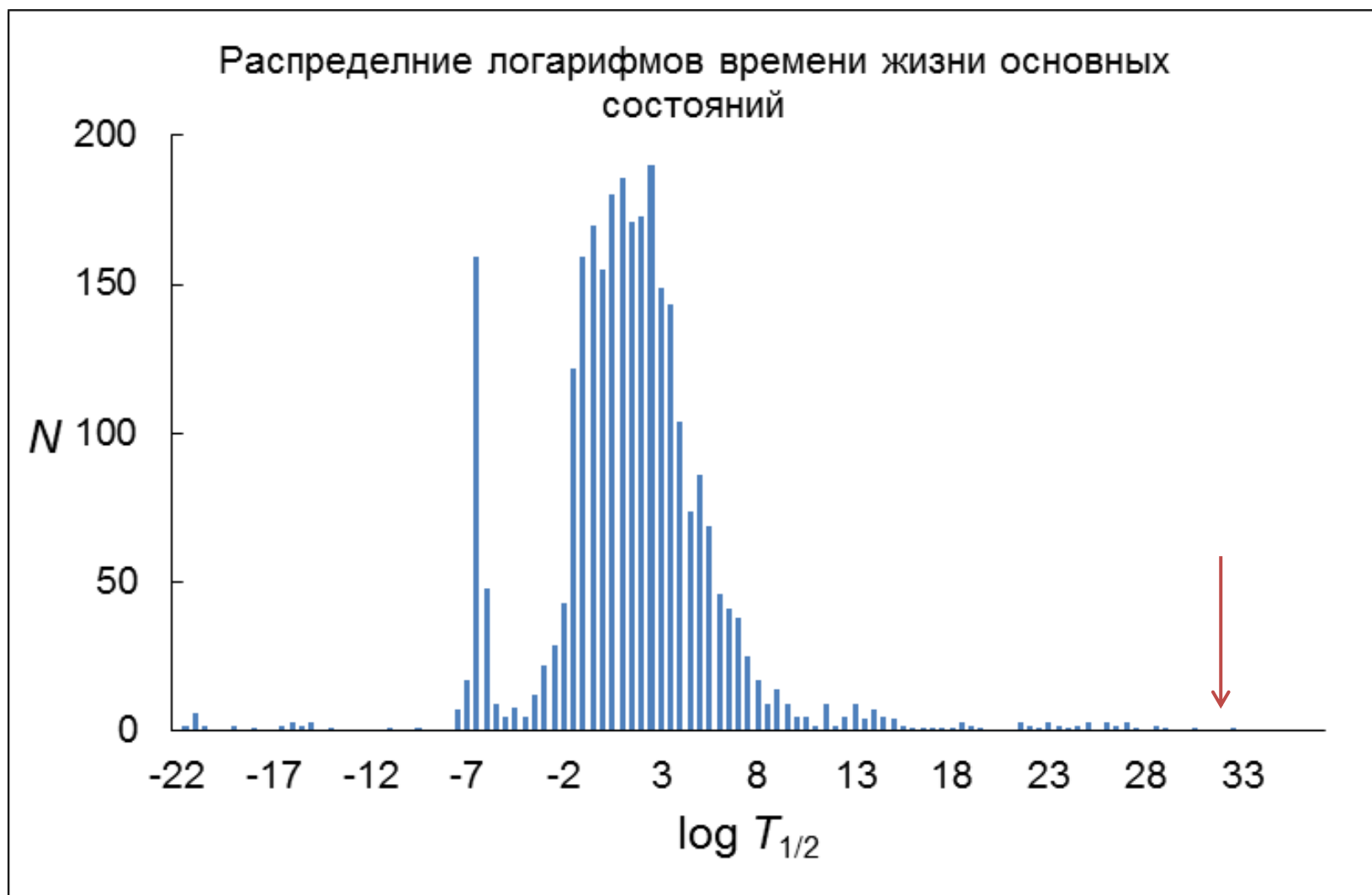
Nature, 2019, v.568, p.532-535

Радиоактивность



≈300 стабильных нуклидов и ≈3500 радиоактивных

Ядерные времена жизни



$$T_{1/2}(^{128}\text{Te}) = 2.4(4) \cdot 10^{24} \text{ y}$$

$$T_{1/2}(^{124}\text{Xe}) > 1.6 \cdot 10^{14} \text{ y}$$

Измерение времён жизни

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

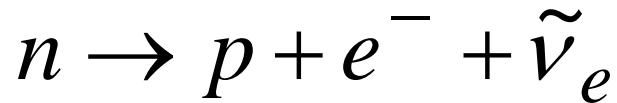
λ – вероятность распада,

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.693/\lambda$$

Прямые методы:

- измерение спада интенсивности излучения,
- **сравнение полного числа ядер с числом актов распада,**
- метод задержанных совпадений,
- метод ядер отдачи (по времени пролёта) и пр.

Бета-распад



Стабильные ядра. Почему нейтрон в ядре не распадается?

$$Q_{\beta^{-}} = M(A, Z) - M(A, Z + 1)$$

$$Q_{\beta^{+}} = M(A, Z) - M(A, Z - 1) - 2m_e$$

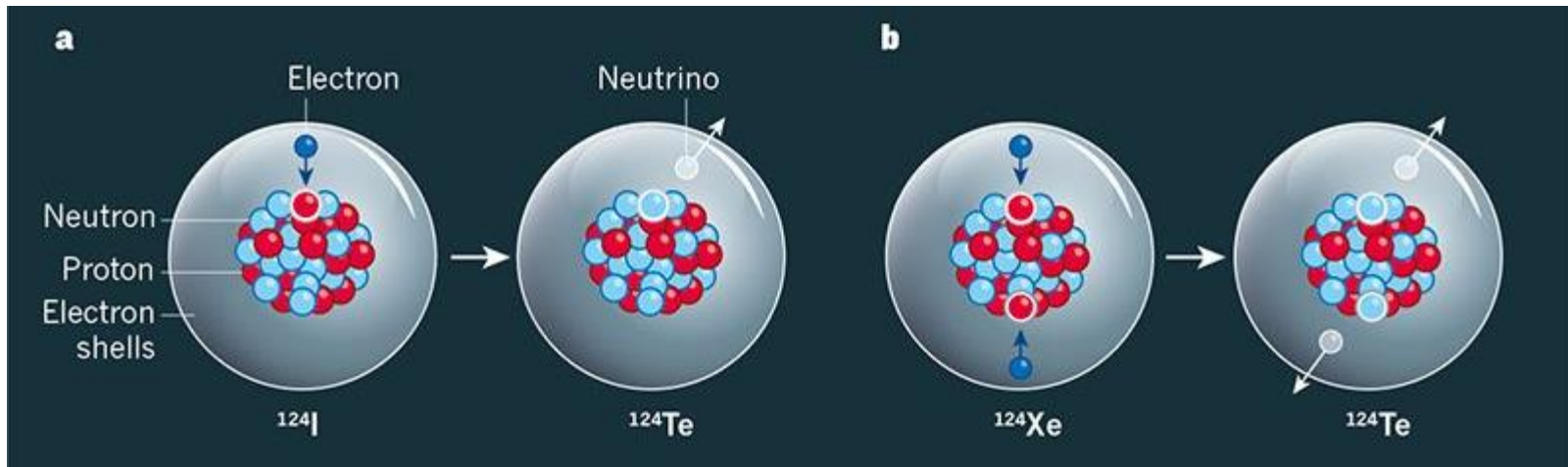
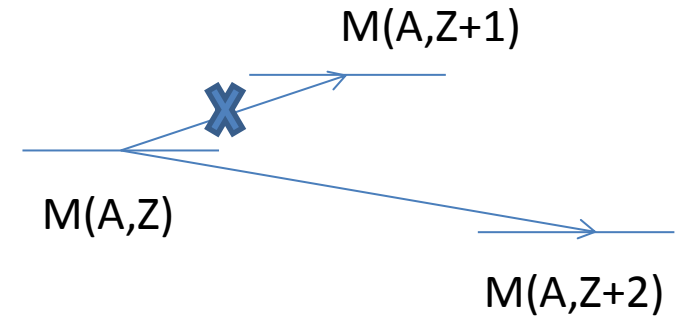
$$Q_{EC} = M(A, Z) - M(A, Z - 1)$$

^{40}K : 0.012%, $T_{1/2} = 1,25 \cdot 10^9$ лет, β^{-} 89.3%, EC 10.7%

Двойной бета-распад

$$Q_{\beta}(A, Z) < 0, \quad Q_{2\beta}(A, Z) > 0$$

14 нуклидов, $T_{1/2} > 10^{18}$ лет

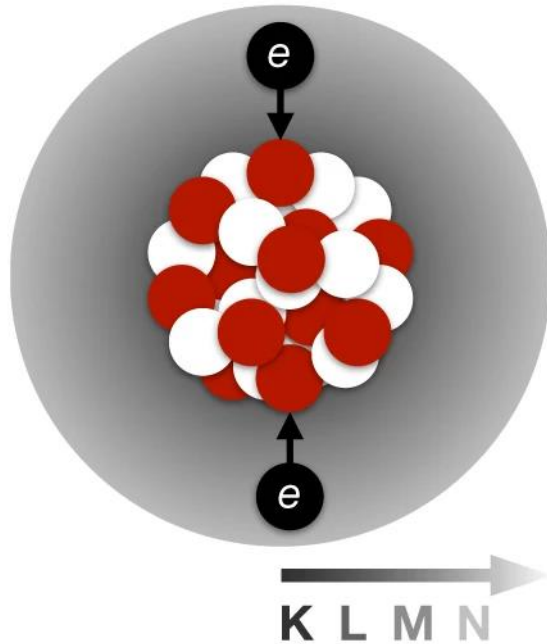


2EC: $^{78}\text{Kr} \rightarrow ^{78}\text{Br}$, прямое измерение $T_{1/2}$

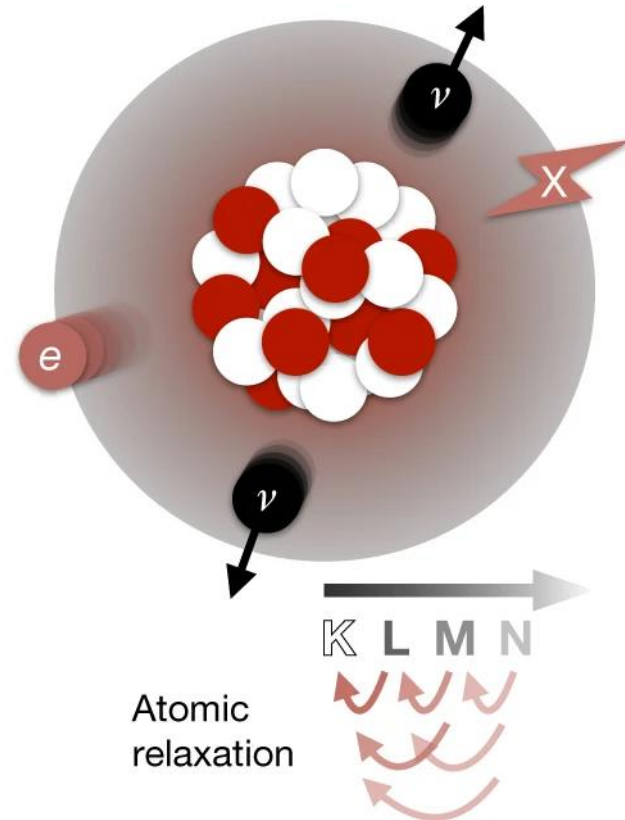
$^{130}\text{Ba} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$, $T_{1/2}$ по накоплению ксенона в древнем минерале

Регистрация электронного захвата

Electron capture



Neutrino emission



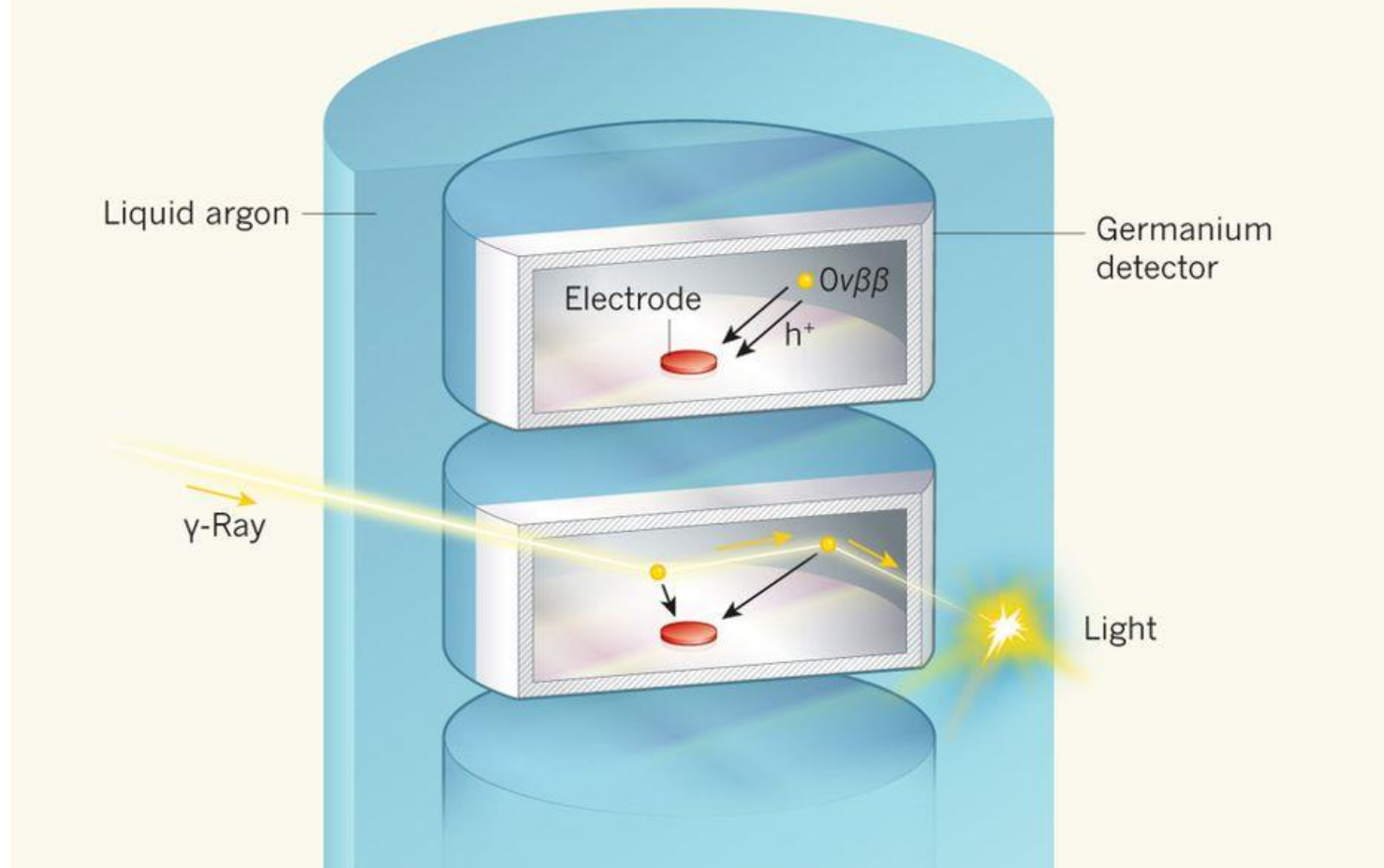
$$Q_{2EC}(^{124}\text{Xe}) = 2.857 \text{ МэВ.}$$

Прямой счёт рентгеновских квантов и Оже-электронов от релаксации электронной оболочки ^{124}Te с полной энергией $E=64.3 \text{ кэВ}$.

Безнейтринный двойной бета-распад

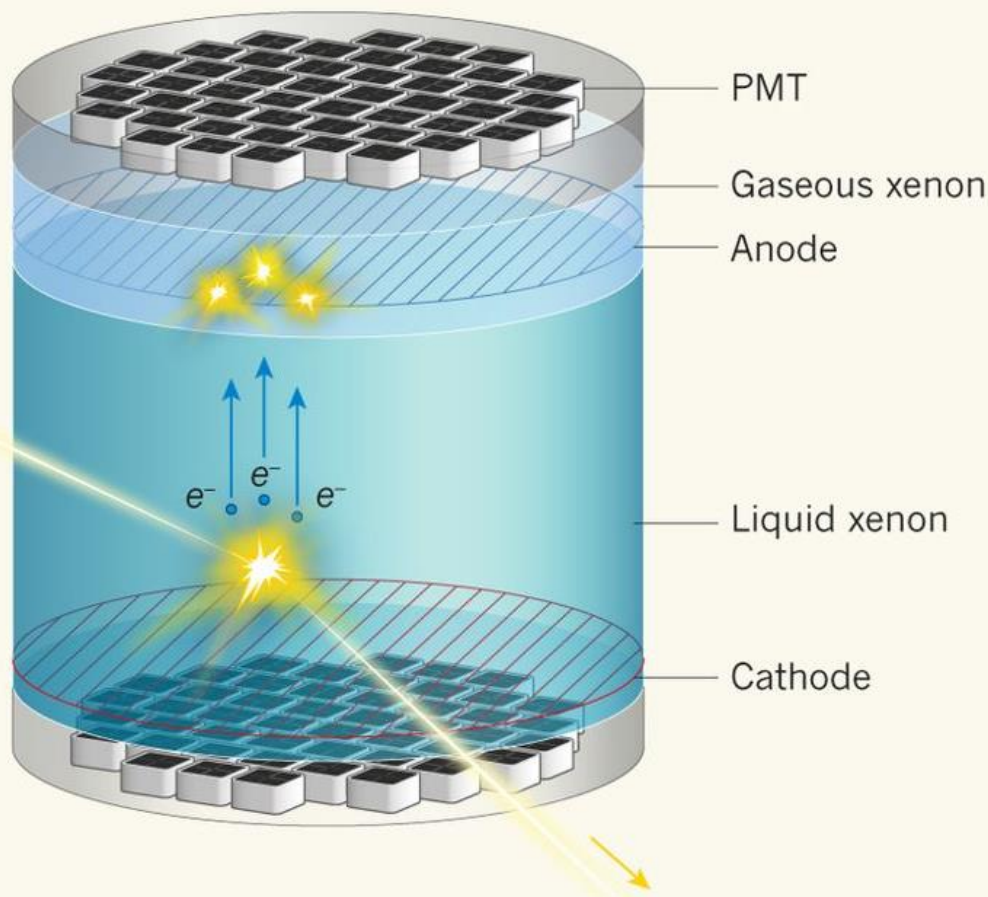
Расширение СМ: майорановское + массивное нейтрино. Из ненаблюдения безнейтринного 2β -распада, $T_{1/2}(0\nu 2\beta) > 10^{25}$ лет, следует ограничение на $m_\nu > 0.4$ эВ и другие параметры.

Коллаборация GERDA (Италия)



Детекторы обогащены изотопом ^{76}Ge (>7.8%,): $T_{1/2}(2\beta^-)=1.2\cdot 10^{25}$ лет. Анализ формы импульса, антисовпадений между соседними детекторами и сцинтилляциями позволили отобрать фоновые события (многократное комптоновское рассеяние).

Коллаборация XENON.



Природный Xe:

124 - 0.095%, $2\epsilon\text{C}$;

126 - 0.089%;

128 - 1.910%;

129 - 26.40%;

130 - 4.071%;

131 - 21.232%;

132 - 26.909%;

134 - 10.436%, $2\beta^-$;

136 - 8.857 %, $2\beta^-$

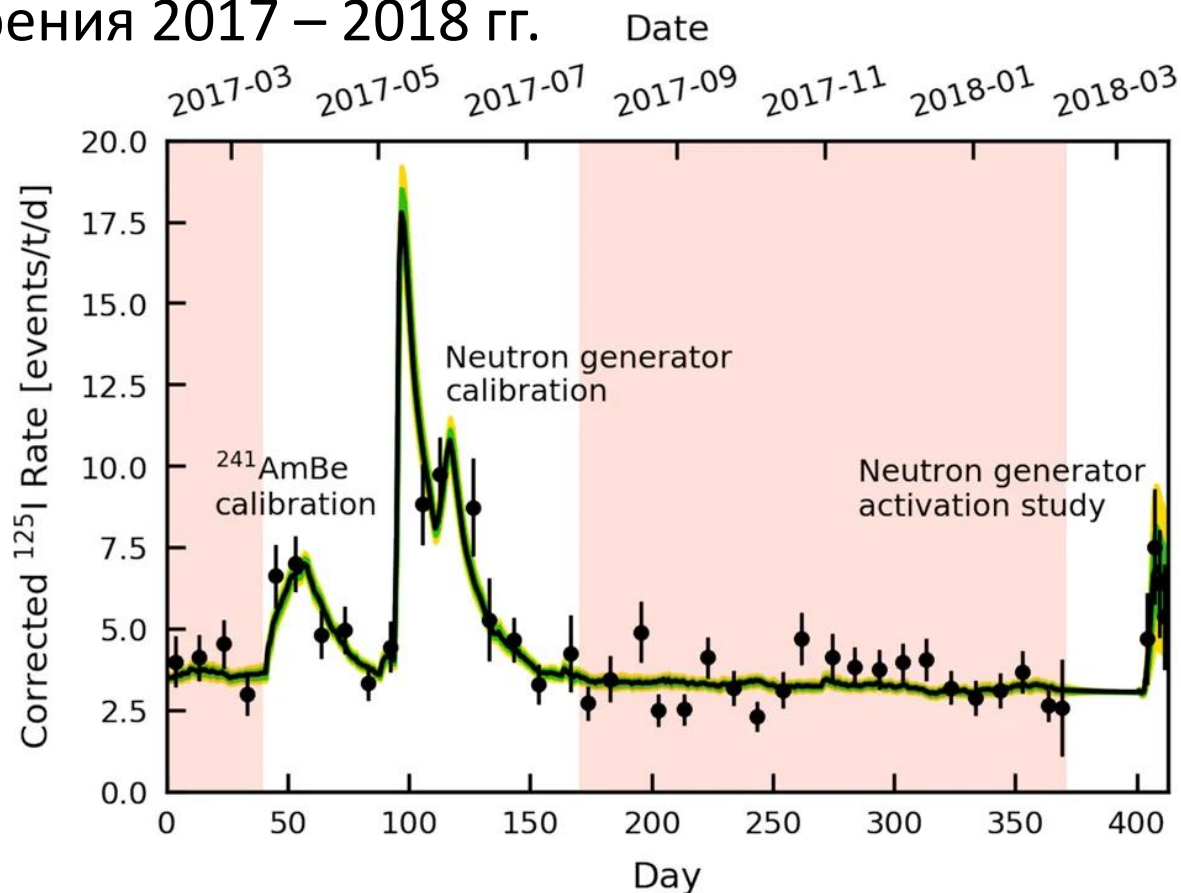
1 кг ^{124}Xe на 1 т Xe.

Регистрация WIMPs – поиск темной материи во Вселенной (27%).
Эксперименты (Дакота, США) с 5 кг Xe, 62 кг Xe, 250 кг Xe.

Коллаборация XENON1T (Италия)

3 т очищенного Хе до уровня 80 распадов/кэВ/т/год.

Измерения 2017 – 2018 гг.

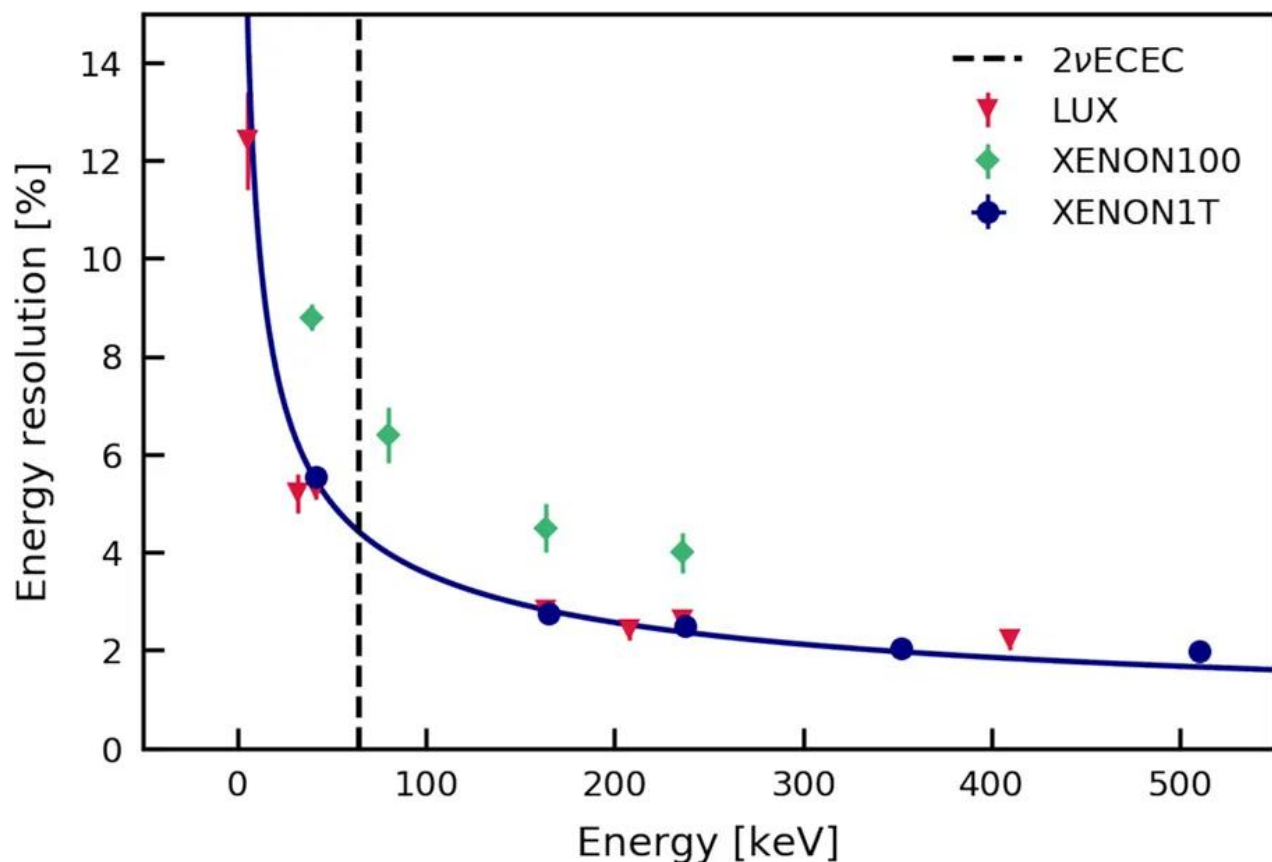


^{124}Xe может захватывать нейтроны: $^{124}\text{Xe} + n \rightarrow ^{125}\text{Xe} + \gamma$

^{125}Xe распадается ЕС в $^{125}\text{I}^*$ с $T_{1/2} = 16.9$ часов, ^{125}I распадается ЕС в $^{125}\text{Te}^*$ с $T_{1/2} = 59.4$ дней.

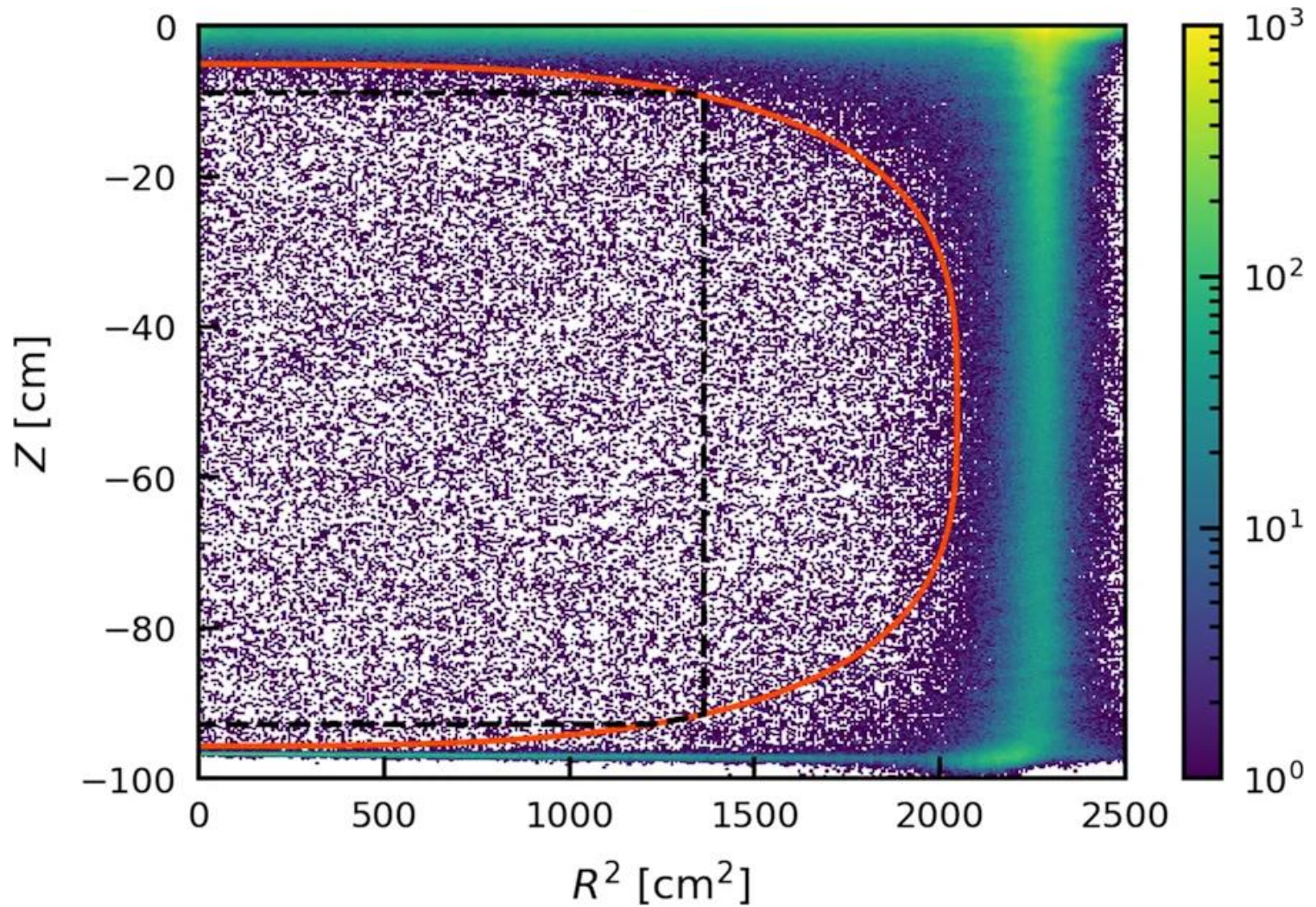
Регистрируются ядерные γ -кванты и рентгеновские лучи К-оболочки Те.

Энергетическое разрешение детекторов

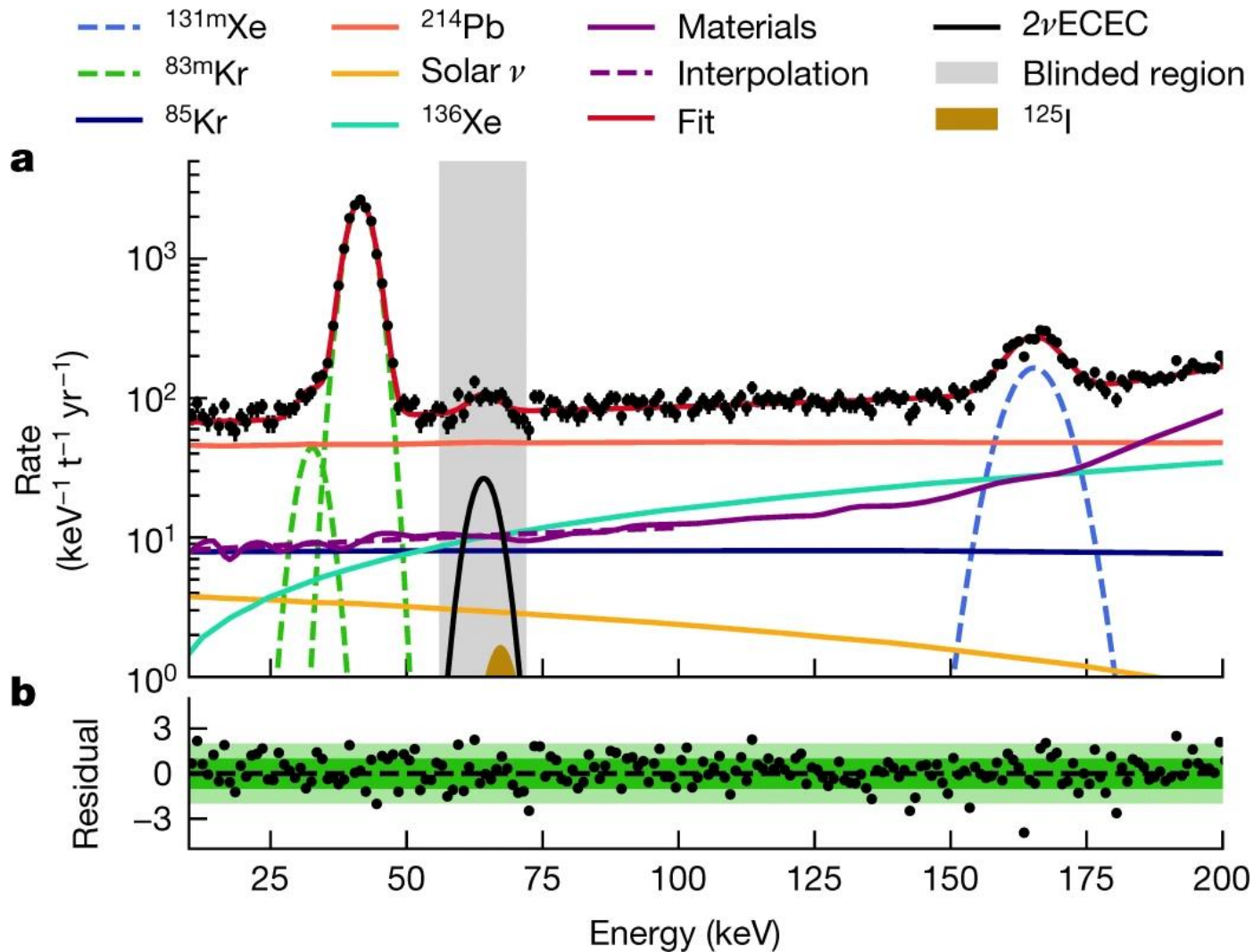


XENON1T: $^{81\text{m}}\text{Kr}$ – 41.5 кэВ, $^{131\text{m}}\text{Xe}$ – 163.9 кэВ,
 $^{129\text{m}}\text{Xe}$ – 236.2 кэВ, ^{214}Pb – 351.9 кэВ, ^{208}Tl – 510.8 кэВ.

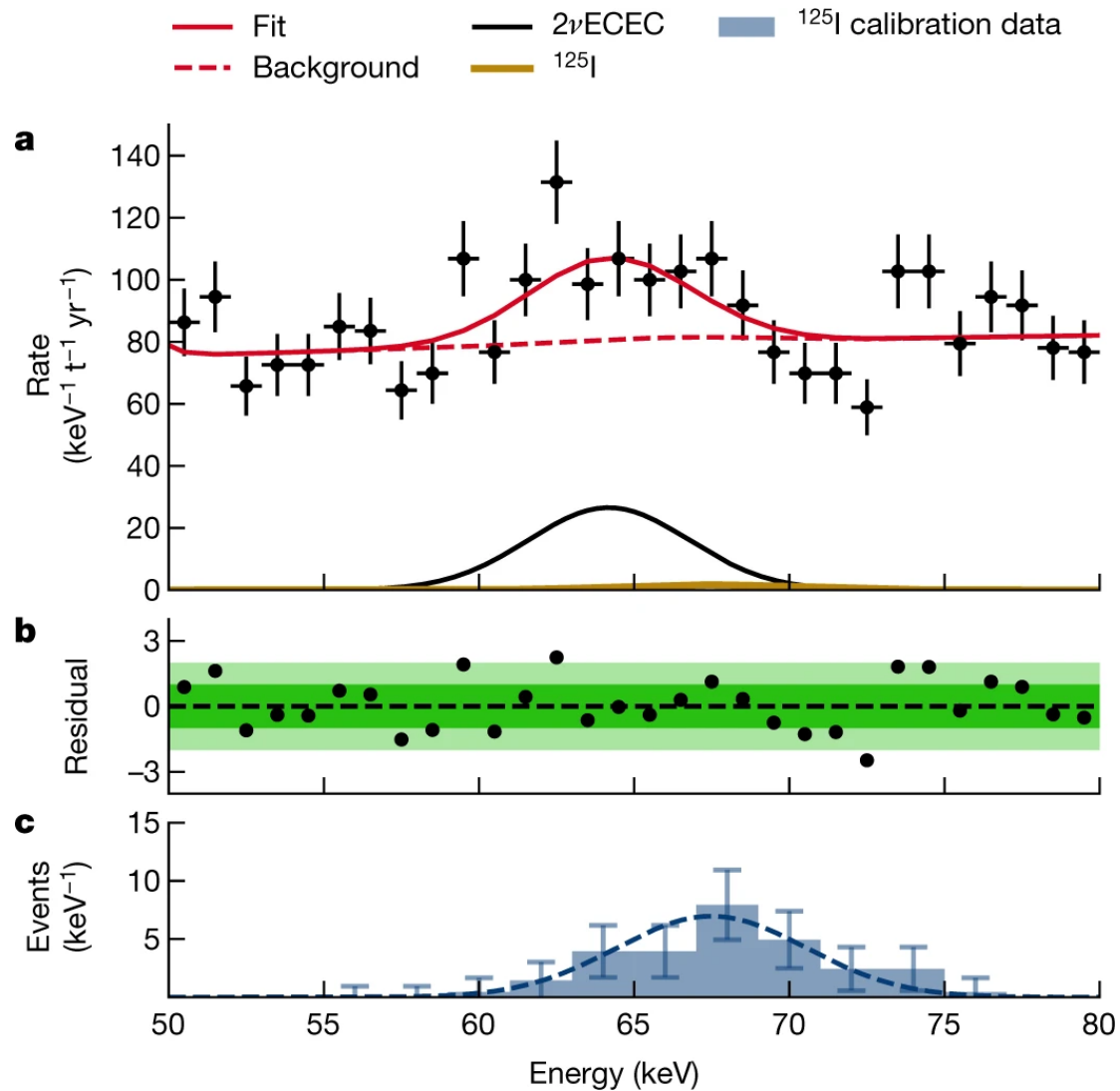
Пространственное разрешение



Модель фона для измеренных спектров



Пик двойного электронного захвата



Определение времени жизни

$$T_{1/2} = \ln 2 \frac{\varepsilon \eta N_A m t}{M_{\text{Xe}} N_{2EC}}$$

Эффективность регистрации $\varepsilon = 0.967 \pm 0.007 \pm 0.033$

Кларк ^{124}Xe $\eta = (9.94 \pm 0.14 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$

«рабочая» масса детектора $m = 1.502$ т, время измерения t

$$T_{1/2}(^{124}\text{Xe}) = (1.8 \pm 0.5 \pm 0.1) \cdot 10^{22} \text{ лет}$$

a) Variable in $T_{1/2}^{\text{ECEC}}$ calculation	Uncertainty [%]
Fiducial mass m	0.6
ROI cut acceptance ε	3.4
^{124}Xe abundance η	1.5

Спасибо за внимание

Mitropolsky_IA@pnpi.nrcki.ru