

# Использование малых энергий распада для задач фундаментальной физики

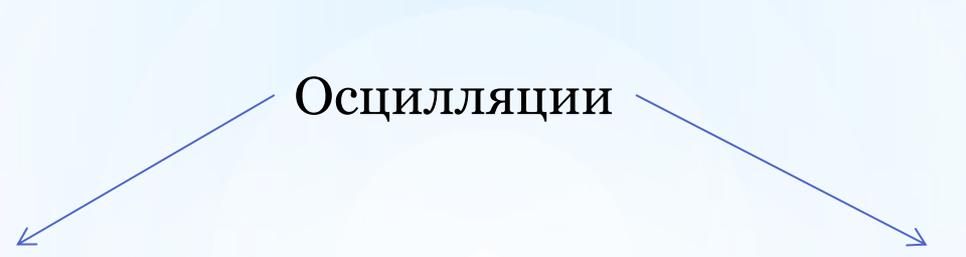
Докладчик: Филянин Павел Евгеньевич

ст. лаборант-исследователь ЛФЭЯ ПИЯФ  
аспирант СПбГУ кафедры Ядерно-Физических Методов Исследования

27 февраля 2018

# Малые энергии распада для нейтринной физики

Осцилляции



Атмосферных нейтрино

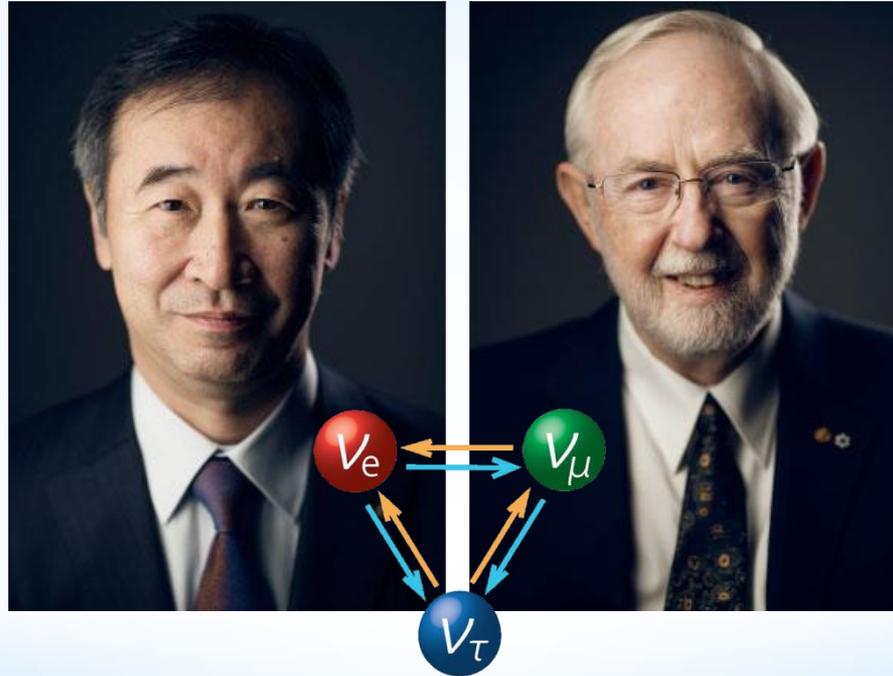
Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos /  
Y. Fukuda et al. //  
Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 81. P. 1562.

Солнечных нейтрино

Direct evidence for neutrino flavor  
transformation from neutral-current  
interactions in the Sudbury neutrino  
observatory / Q. Ahmad et al. //  
Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. 011301

# У нейтрино есть масса!

Нобелевская премия по физике - 2015



Takaaki Kajita

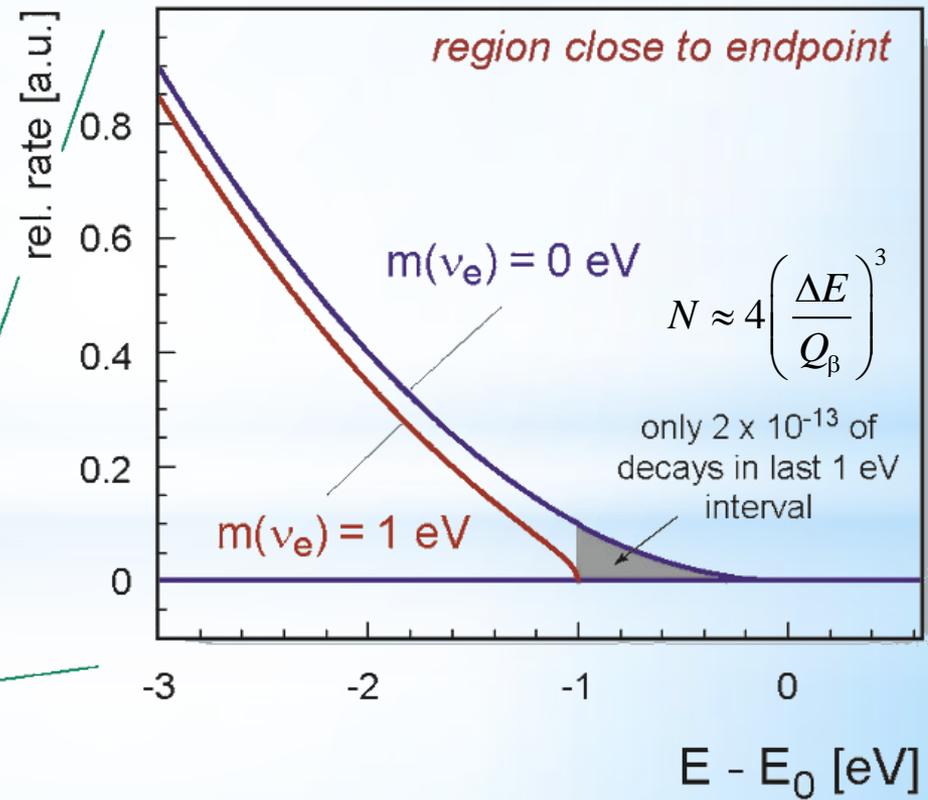
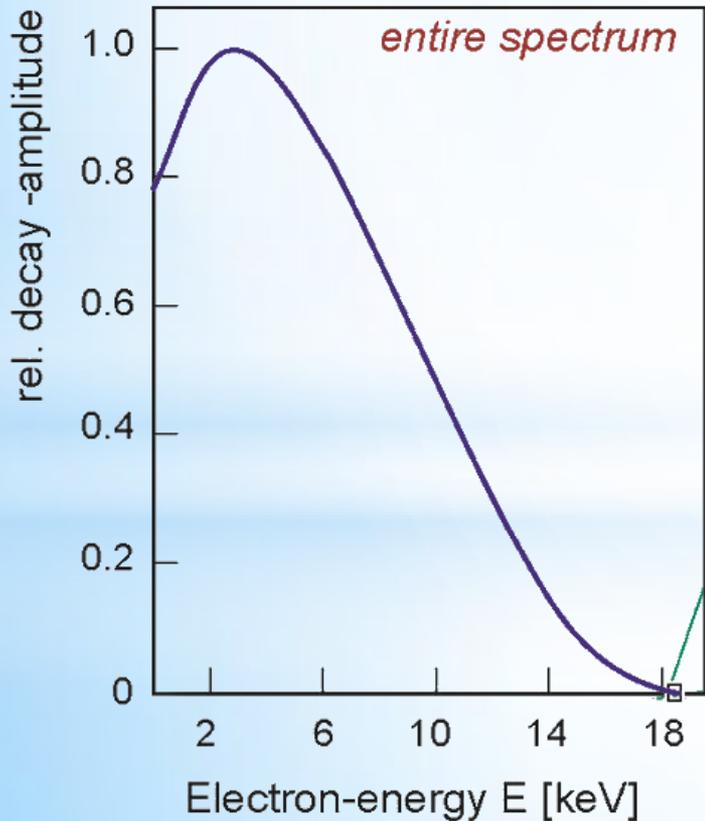
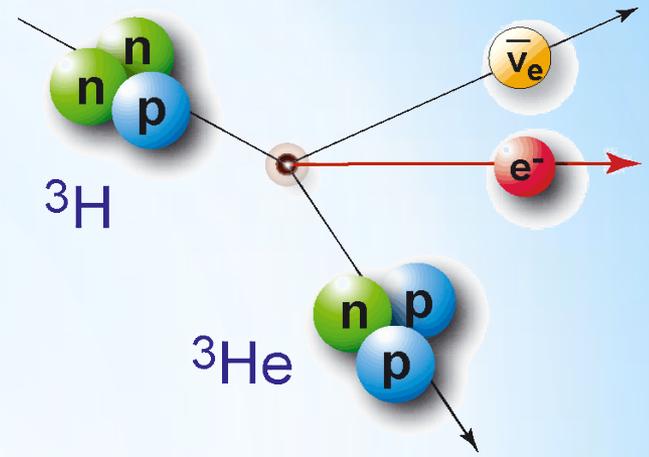
Arthur B. McDonald

**«За открытие нейтринных осцилляций, означающих наличие у нейтрино массы»**

# Определение массы нейтрино

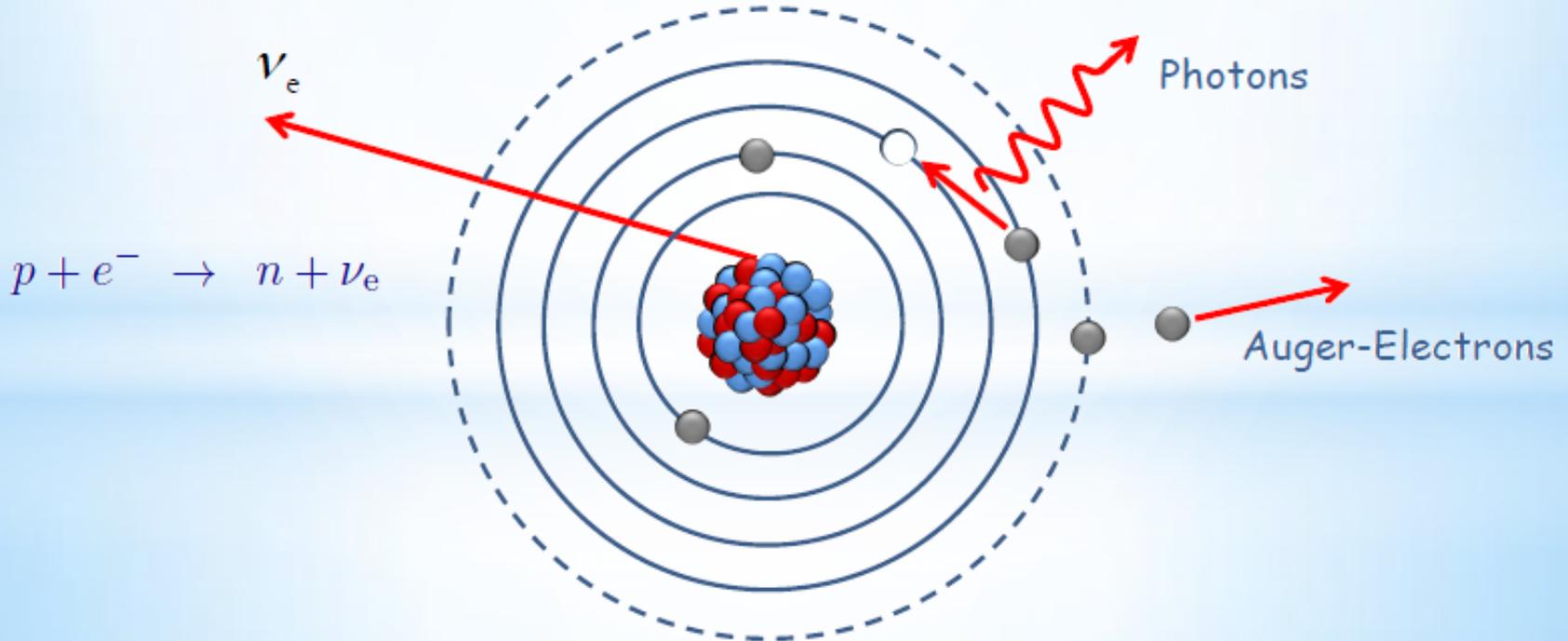
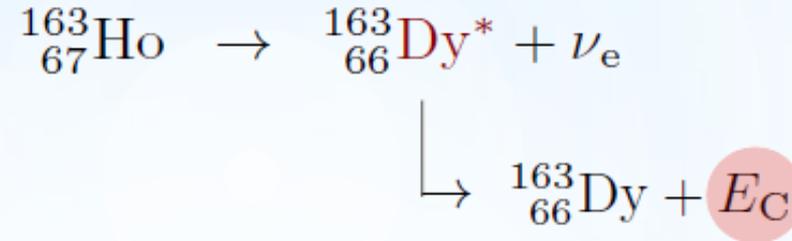
## 1) Масса антинейтрино в $\beta^-$ -распаде

$$\frac{dN}{dE} \sim E(Q_\beta - E) \sqrt{(Q_\beta - E)^2 - m_\nu^2}$$



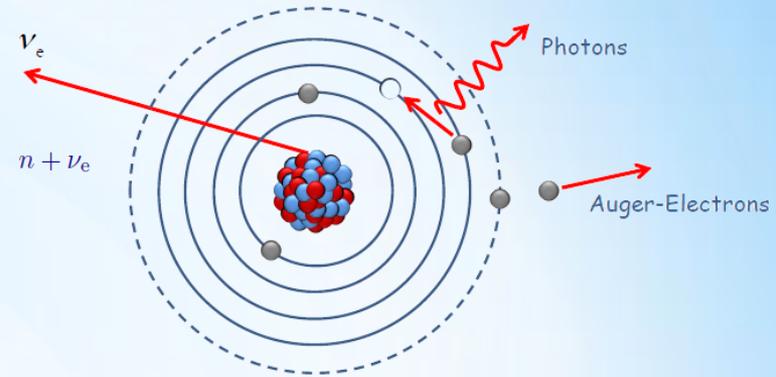
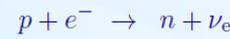
# Определение массы нейтрино

## 2) Масса нейтрино в $\epsilon$ -захвате

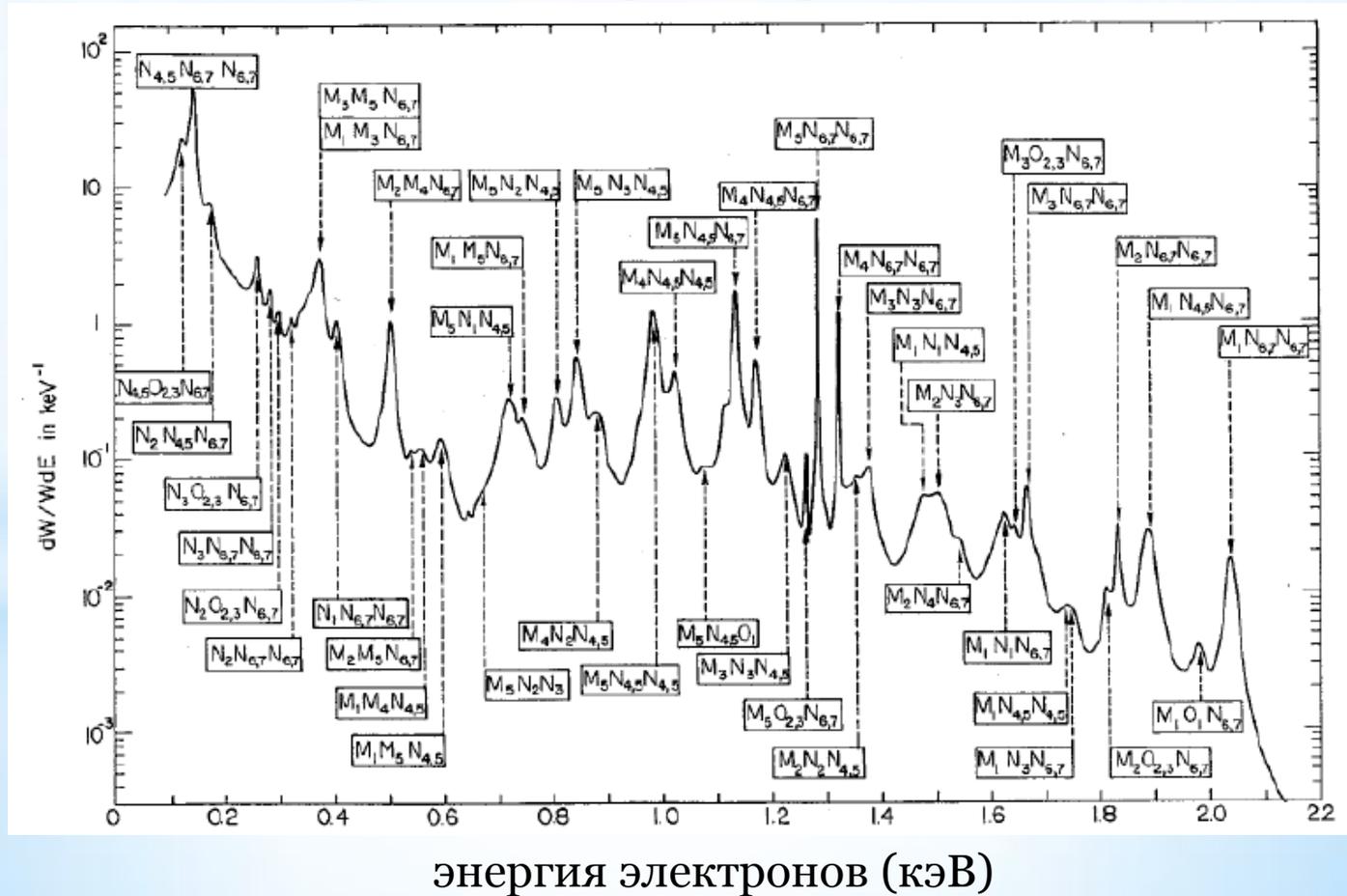


# Определение массы нейтрино

## 2) Масса нейтрино в $\epsilon$ -захвате

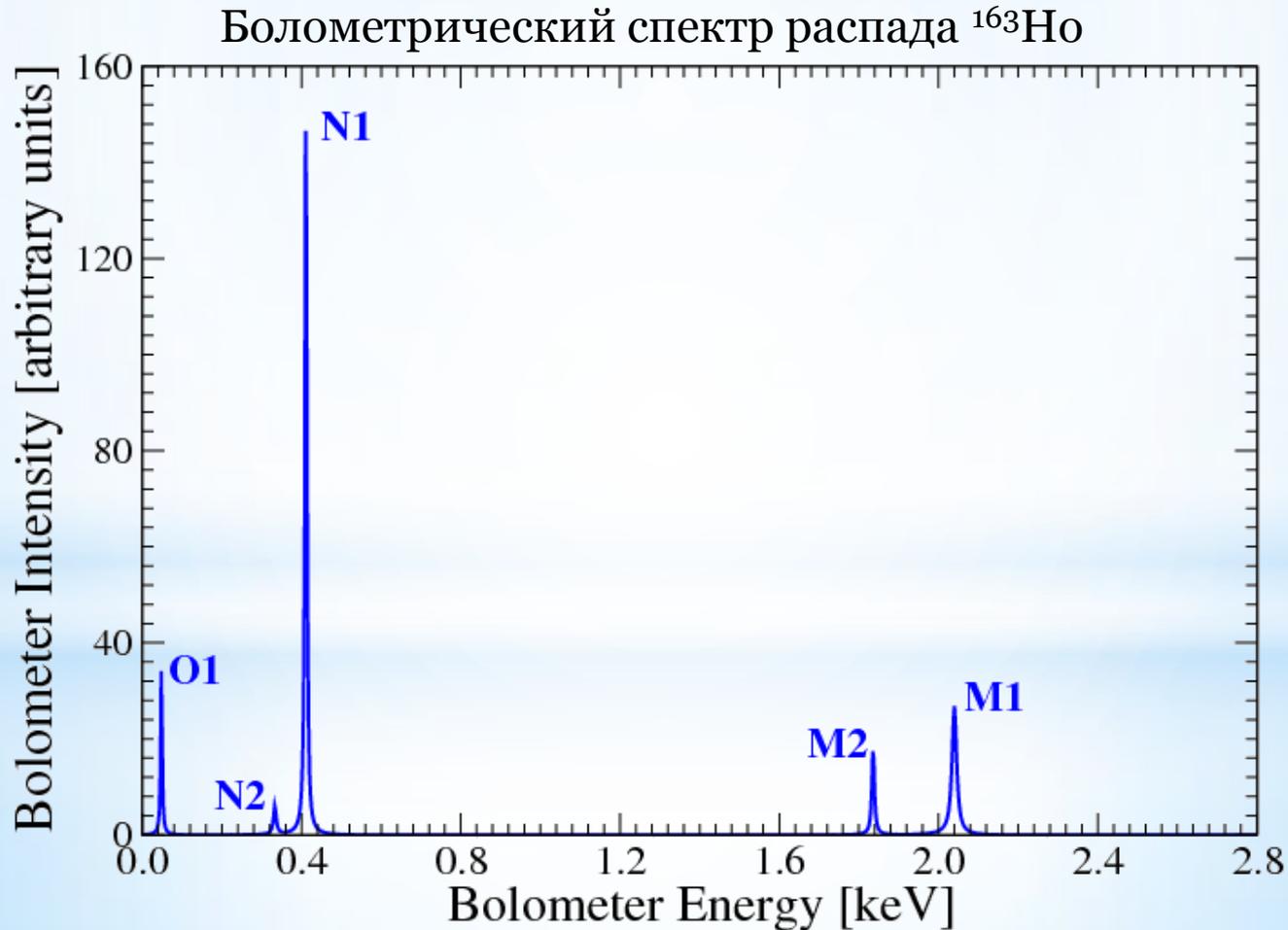
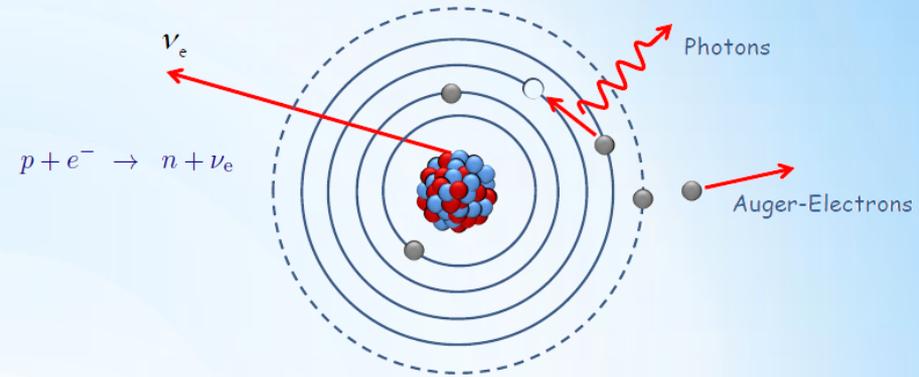


Спектр Оже-электронов в распаде  $^{163}\text{Ho}$



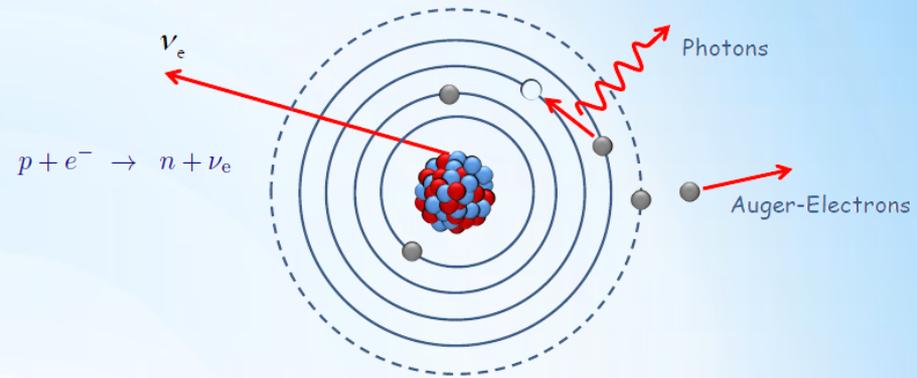
# Определение массы нейтрино

## 2) Масса нейтрино в $\epsilon$ -захвате

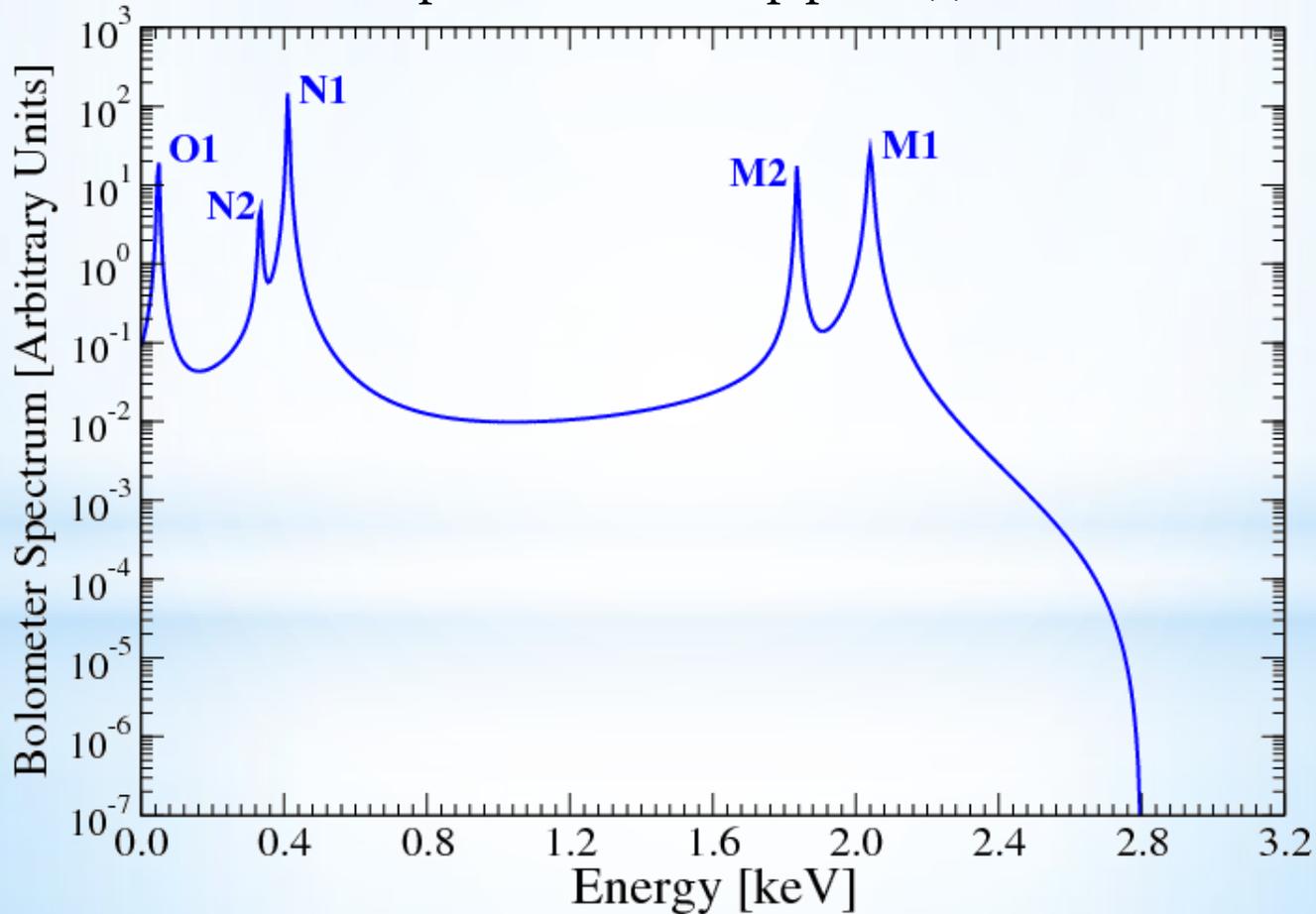


# Определение массы нейтрино

## 2) Масса нейтрино в $\epsilon$ -захвате

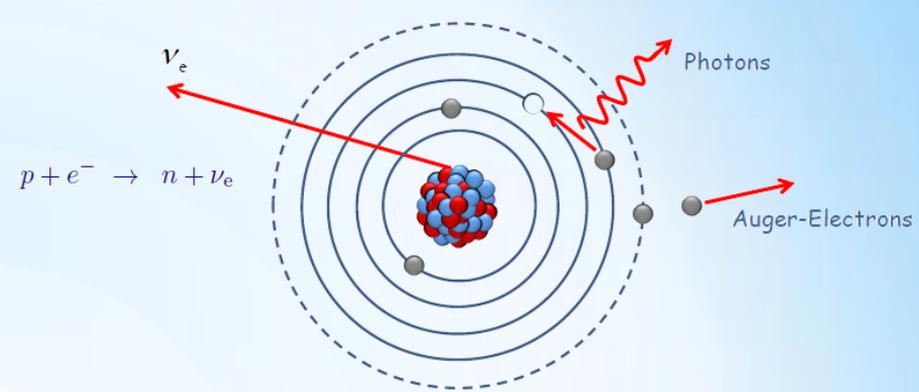


Болометрический спектр распада  $^{163}\text{Ho}$



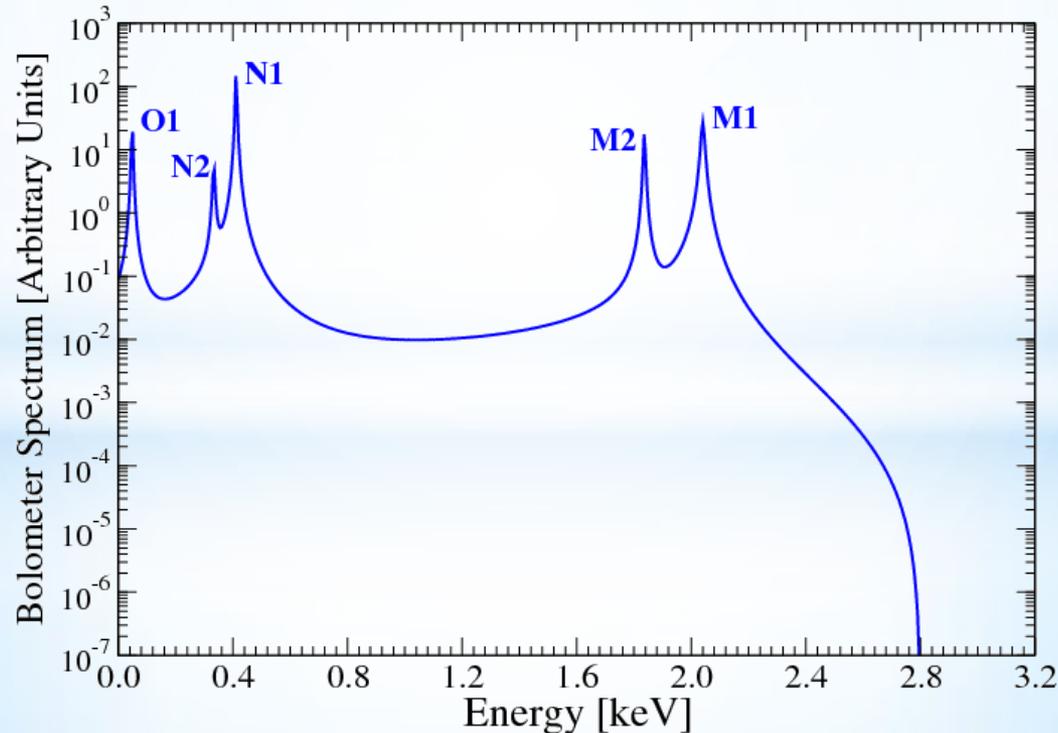
# Определение массы нейтрино

## 2) Масса нейтрино в $\epsilon$ -захвате



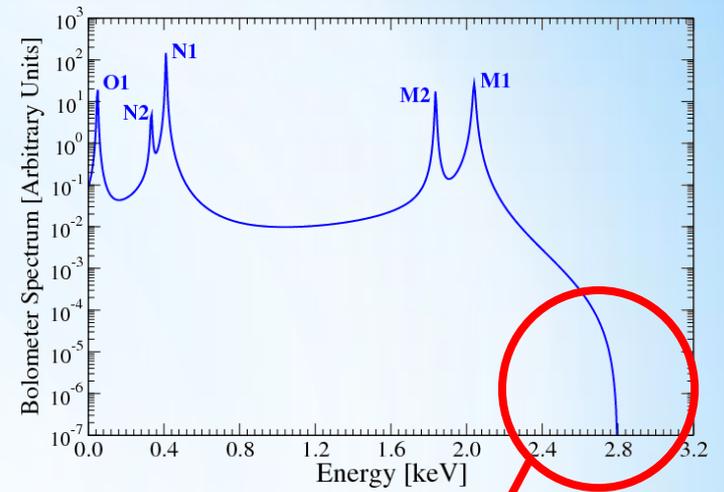
$$\frac{dN}{dE_c} \sim (Q_\epsilon - E_c) \sqrt{(Q_\epsilon - E_c)^2 - m_\nu^2} \sum_i |\psi_i|^2 \frac{\Gamma_i/2\pi}{(E_c - B_i)^2 + \Gamma_i^2/4}$$

Болометрический спектр распада  $^{163}\text{Ho}$

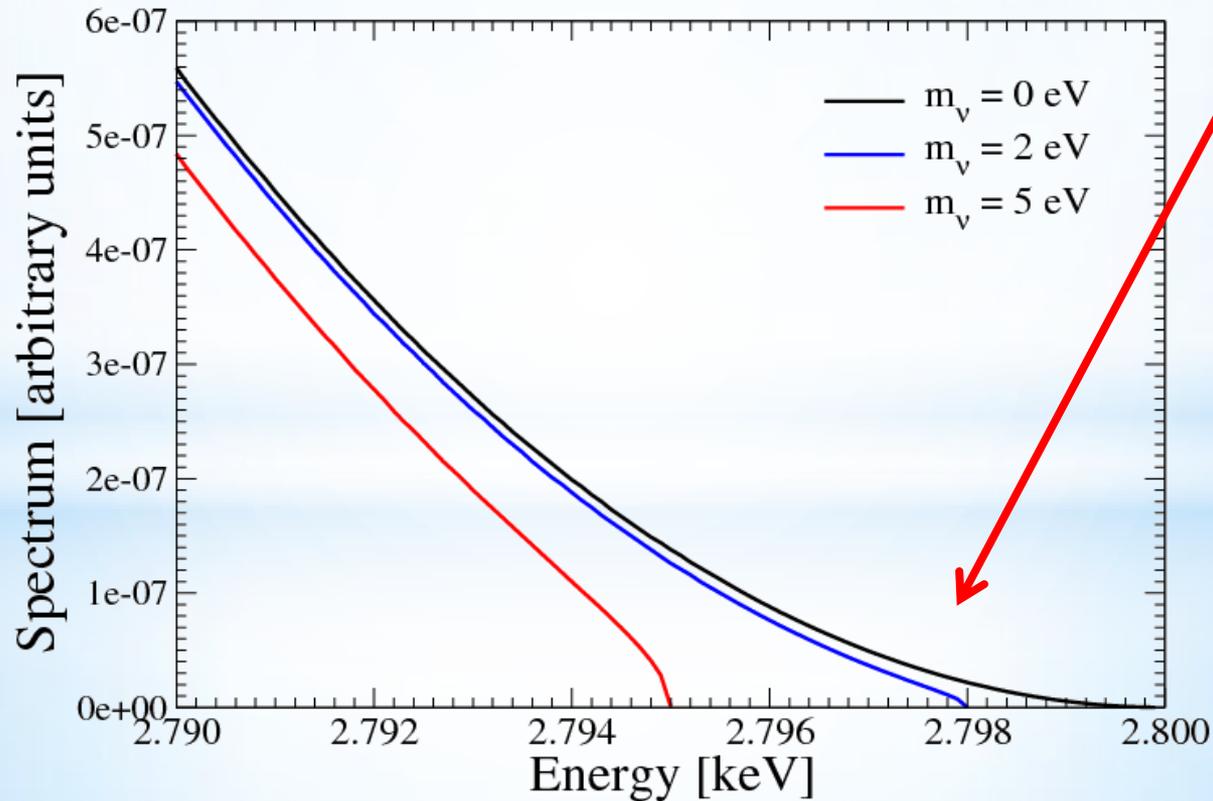


# Определение массы нейтрино

## 2) Масса нейтрино в $\epsilon$ -захвате

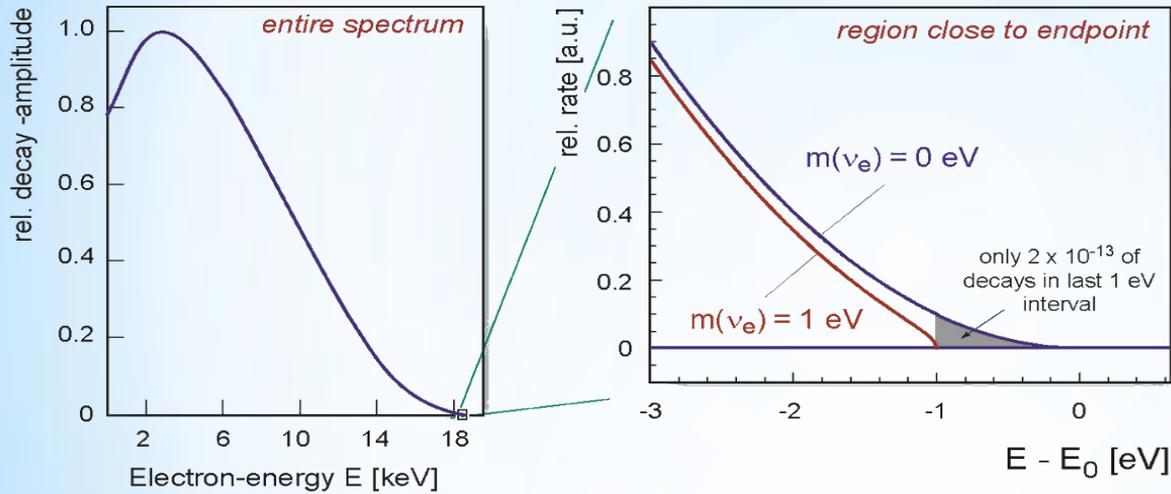


Спектр вблизи граничной энергии



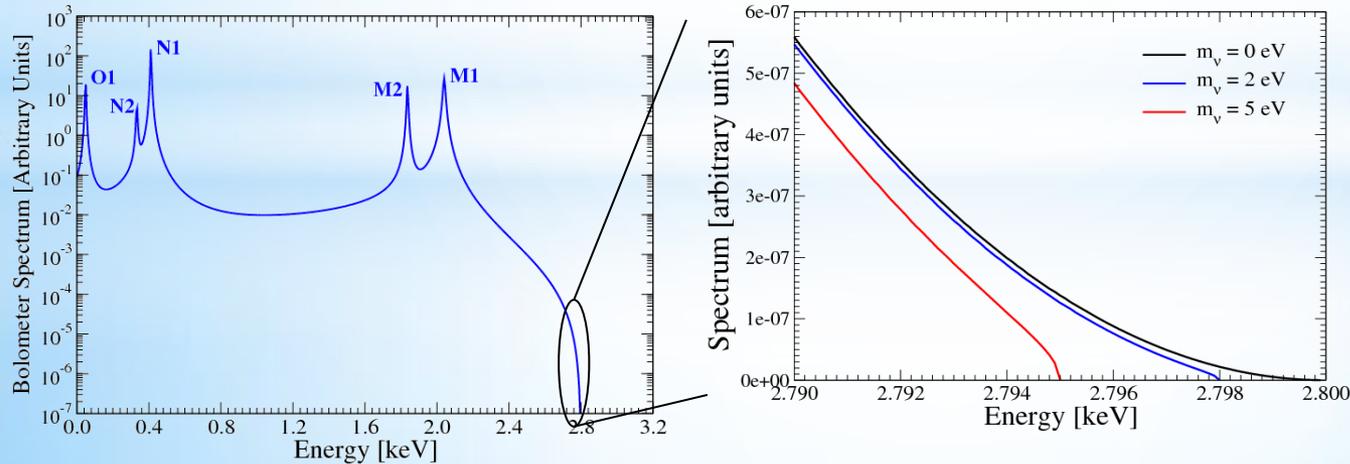
# Определение массы нейтрино

## 1) $\beta^-$ -распад



важна малость  
 $Q$ -значения

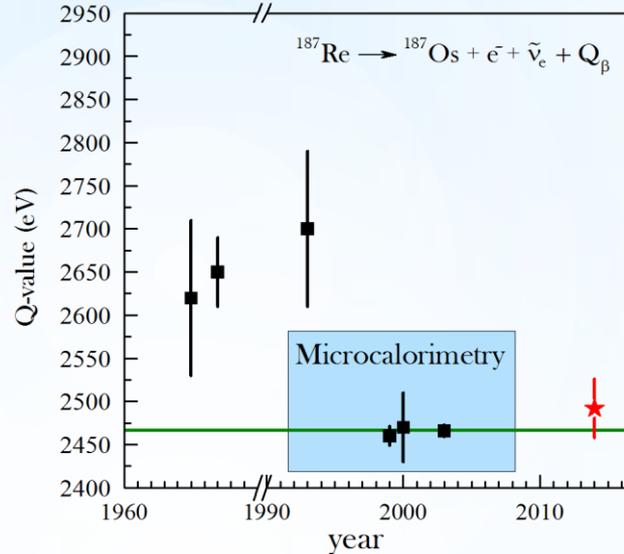
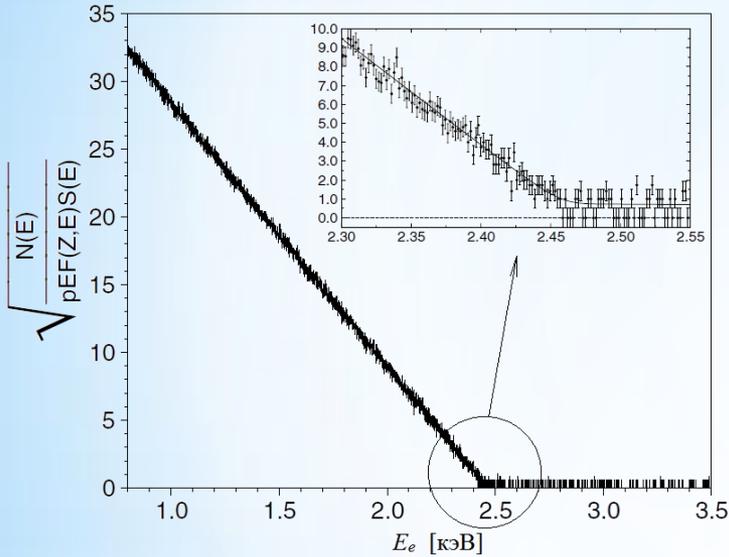
## 2) $\epsilon$ -захват



важна малость  
 $(Q - B_i)$ -значения

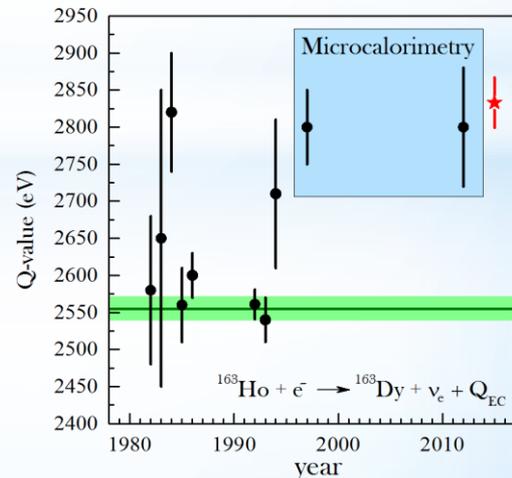
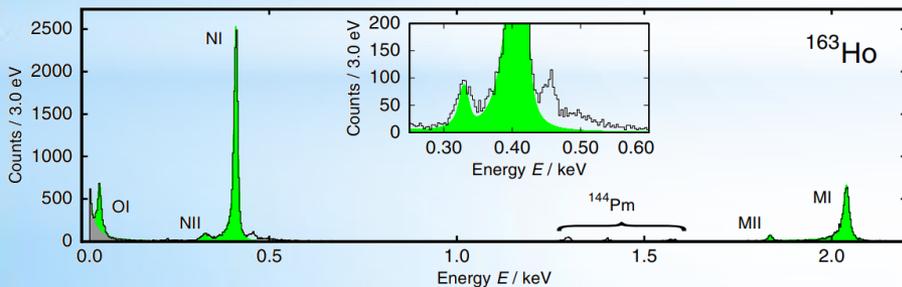
# Определение массы нейтрино

1)  $\beta^-$ -распад: рекордсмен  $^{187}\text{Re}$   $Q_\beta = 2466(1)$  эВ



важна малость  
Q-значения

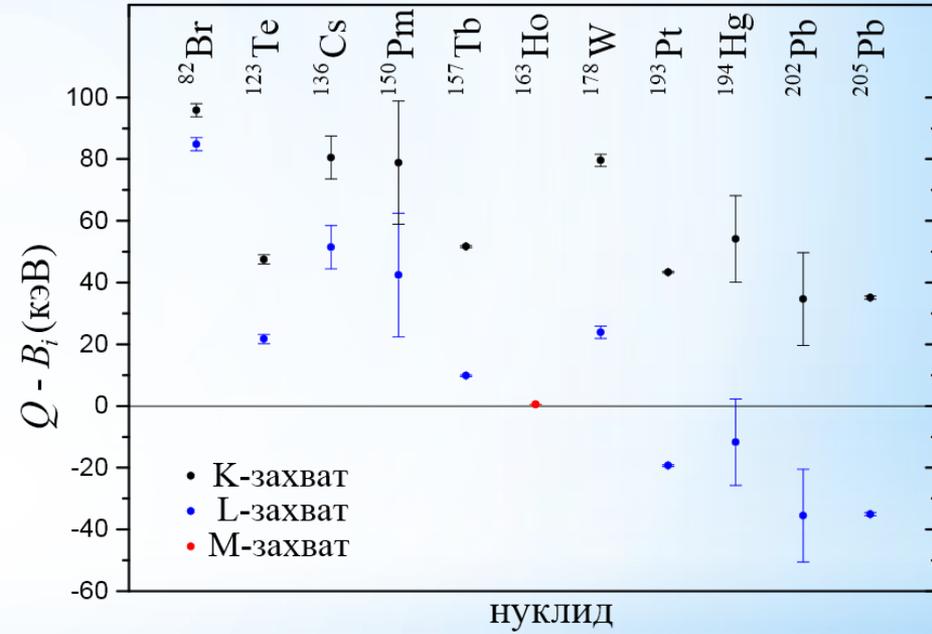
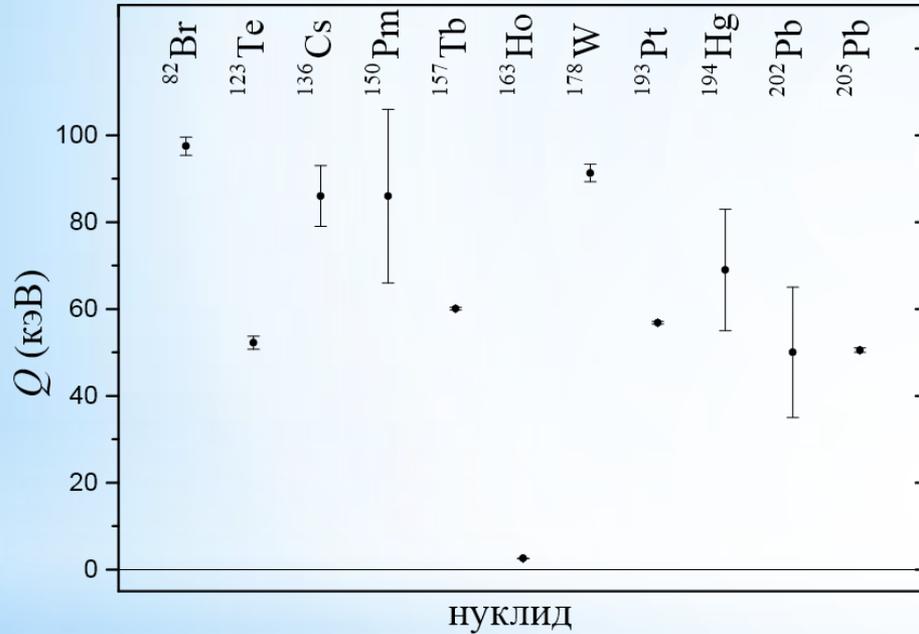
2)  $\epsilon$ -захват: рекордсмен  $^{163}\text{Ho}$   $Q_\epsilon = 2834(20)$  эВ,  $(Q - B_{MI}) = 790$  эВ



важна малость  
(Q - Bi)-значения

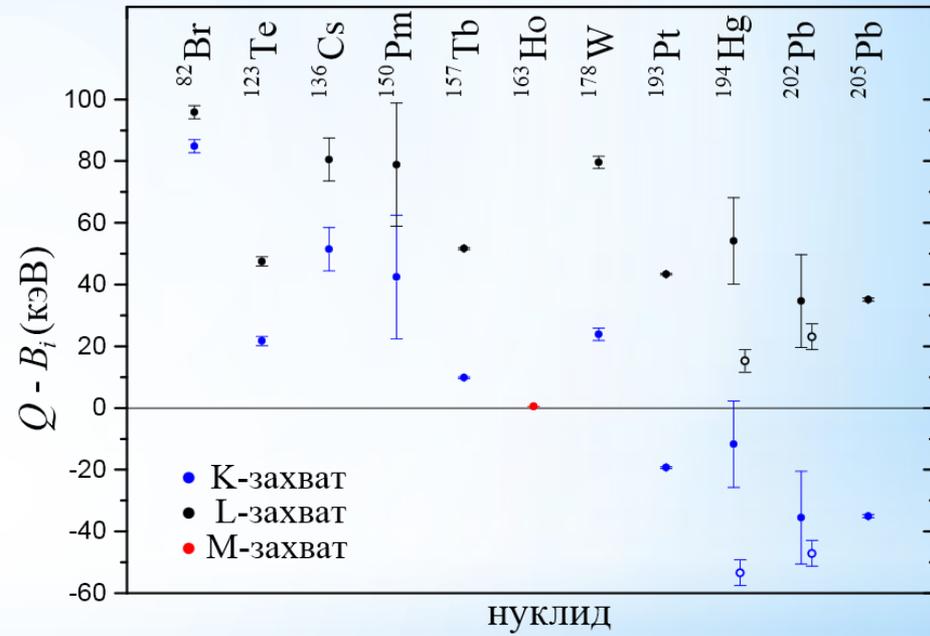
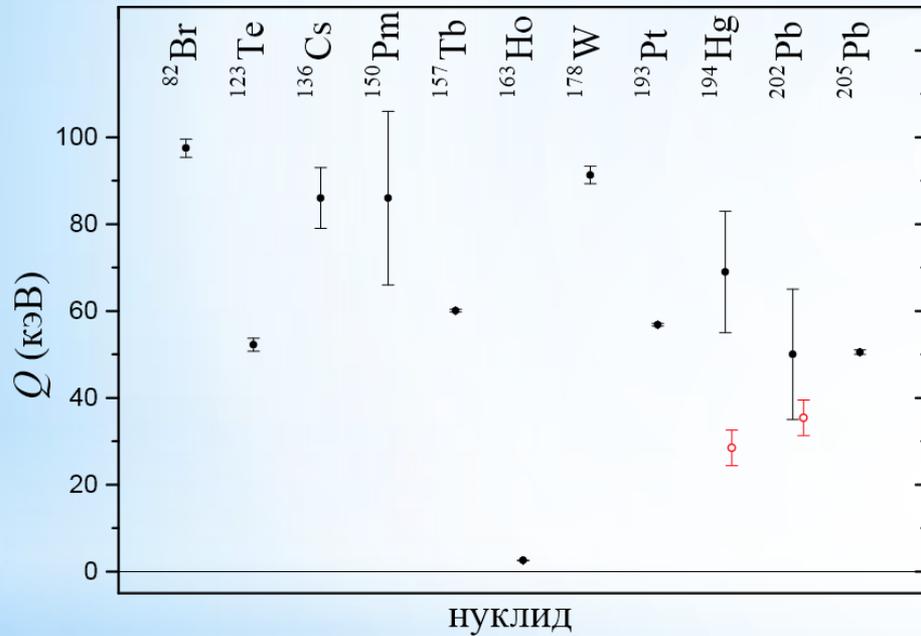
# Поиск новых кандидатов для определения $m_\nu$

## 1) сектор $\varepsilon$ -распада из основного в основное состояние



# Поиск новых кандидатов для определения $m_\nu$

## 1) сектор $\varepsilon$ -распада из основного в основное состояние



# Поиск новых кандидатов для определения $m_\nu$

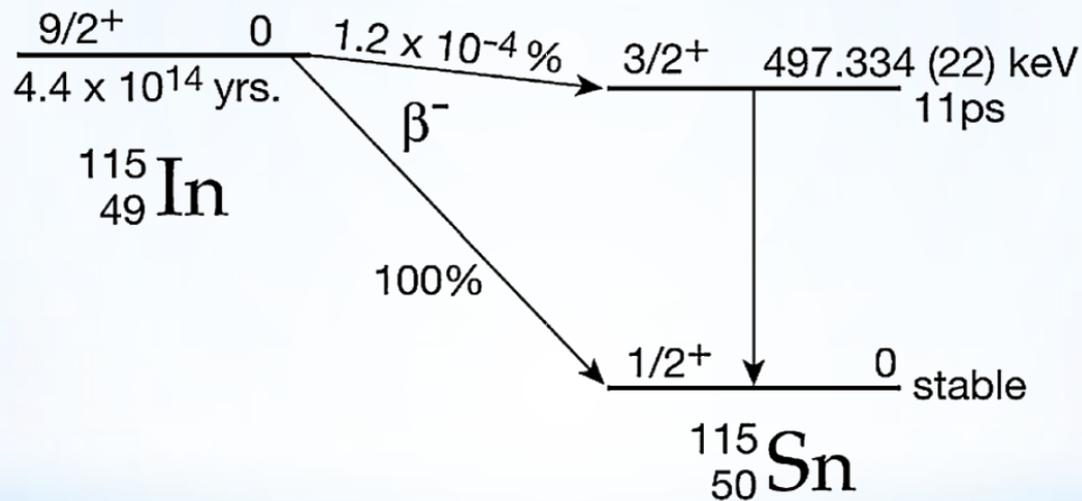
## 2) сектор $\beta$ -распада из основного на возбужденное состояние

Реакция	$\Delta J^P$	$T_{1/2}$	$Q_{gg} \pm \Delta Q_{gg}$ (кэВ)	$E^* \pm \Delta E^*$ (кэВ)	$Q_{ge} \pm \Delta Q_{ge}$ (кэВ)	тип $\beta$ -распада
$^{130}\text{Cs} \rightarrow ^{130}\text{Ba}^*$	$1^+$	29 мин	$362 \pm 9$	$357.38 \pm 0.08$	$4.6 \pm 9$	$\beta^-$
$^{131}\text{Cs} \rightarrow ^{131}\text{Xe}^*$	$0^+$	9.7 д	$355 \pm 5$	$364.49 \pm 0.004$	$-15 \pm 5$	L
					$-9 \pm 5$	M
$^{134}\text{Ce} \rightarrow ^{134}\text{La}^*$	$1^+$	3.2 д	$386 \pm 29$	$355.479 \pm 0.012$	$-8.4 \pm 29$	K
$^{140}\text{Nd} \rightarrow ^{140}\text{Pr}^*$	(2,3)	3.4 д	$437 \pm 27$	$419.9 \pm 0.3$	$10.3 \pm 27$	L
					$15.6 \pm 27$	M
$^{155}\text{Eu} \rightarrow ^{155}\text{Gd}^*$	$2^-$	4.7 г	$252.1 \pm 0.9$	$251.706 \pm 0.001$	$0.39 \pm 0.9$	$\beta^-$
$^{159}\text{Dy} \rightarrow ^{159}\text{Tb}^*$	$1^+$	144 д	$365.4 \pm 1.2$	$363.545 \pm 0.002$	$-0.12 \pm 1.2$	M
$^{161}\text{Ho} \rightarrow ^{161}\text{Dy}^*$	$1^+$	2.5 ч	$858 \pm 2.2$	$804.388 \pm 0.003$	$0.2 \pm 2.2$	K
				$858.792 \pm 0.002$	$-2.8 \pm 2.2$	M
$^{171}\text{Tm} \rightarrow ^{171}\text{Yb}^*$	$2^+$	1.2 г	$96.6 \pm 1.0$	$95.282 \pm 0.002$	$1.32 \pm 1$	$\beta^-$
$^{175}\text{Hf} \rightarrow ^{175}\text{Lu}^*$	$2^-$	70 д	$683.7 \pm 2.0$	$626.53 \pm 0.15$	$-6.1 \pm 2$	K
	$1^+$			$67.83 \pm 0.15$	$0 \pm 2$	L
$^{201}\text{Tl} \rightarrow ^{201}\text{Hg}^*$	(2)	72.9 ч	$484 \pm 14$	$384.602 \pm 0.018$	$16.3 \pm 14$	K
				$464.41 \pm 0.03$	$4.8 \pm 14$	L

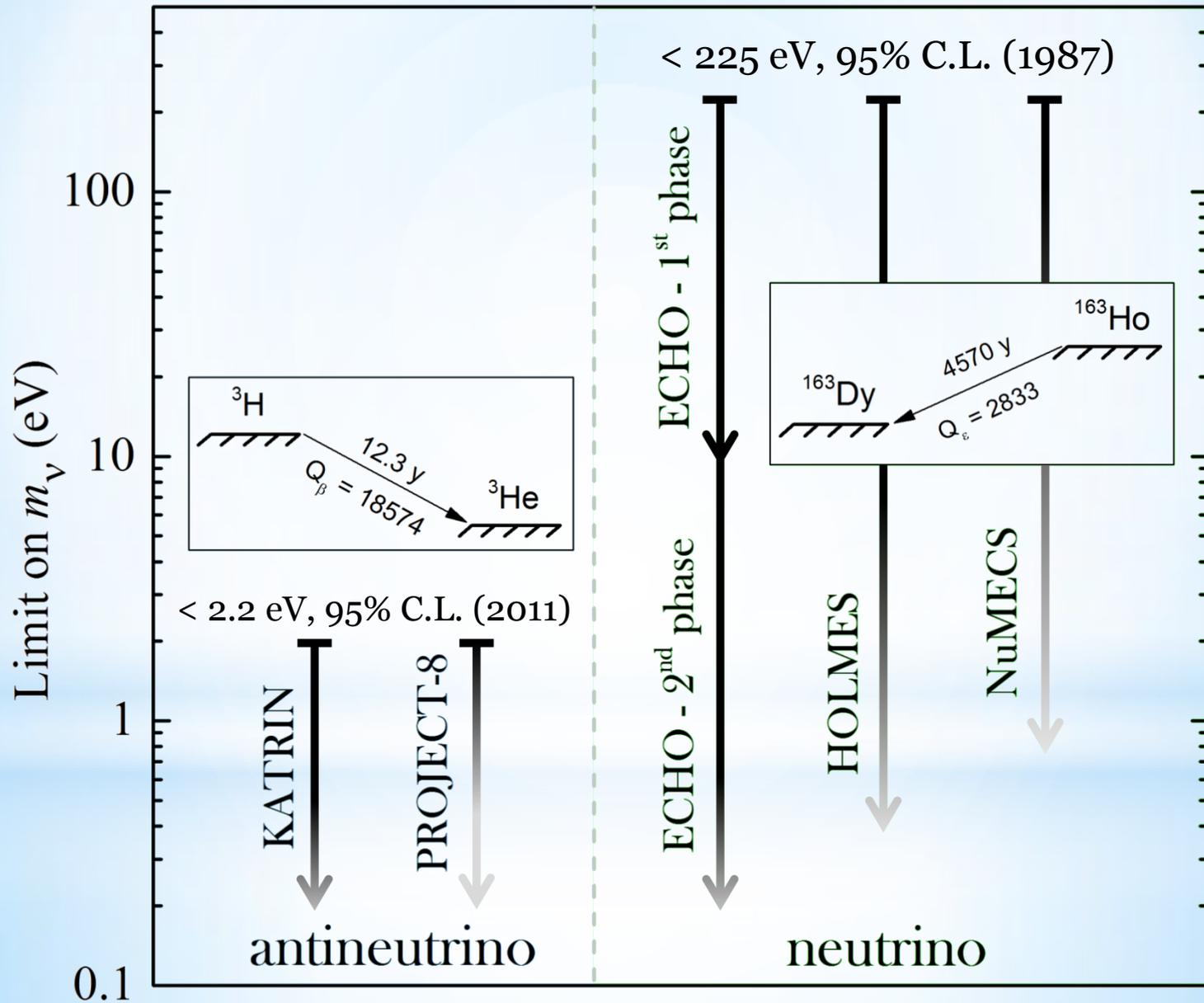
# Поиск новых кандидатов для определения $m_\nu$

## 2) сектор $\beta$ -распада из основного на возбужденное состояние

Рекордсмен:  $^{115}\text{In} \rightarrow ^{115}\text{Sn}^*$ ,  $Q_{\text{ge}} = 155(10)$  эВ,  $10^{-4}$  % – доля распада



# Эксперименты по определению массы (анти)нейтрино

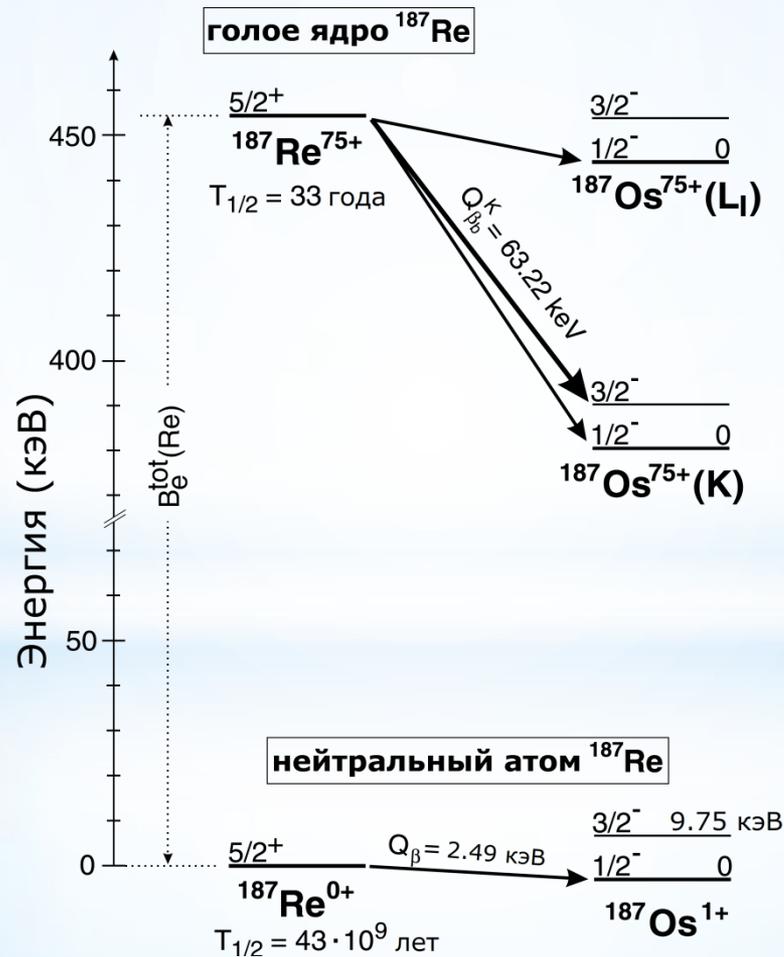




# $T_{\beta}$ ИЗМЕНЯЕТСЯ В ЗВЕЗДАХ

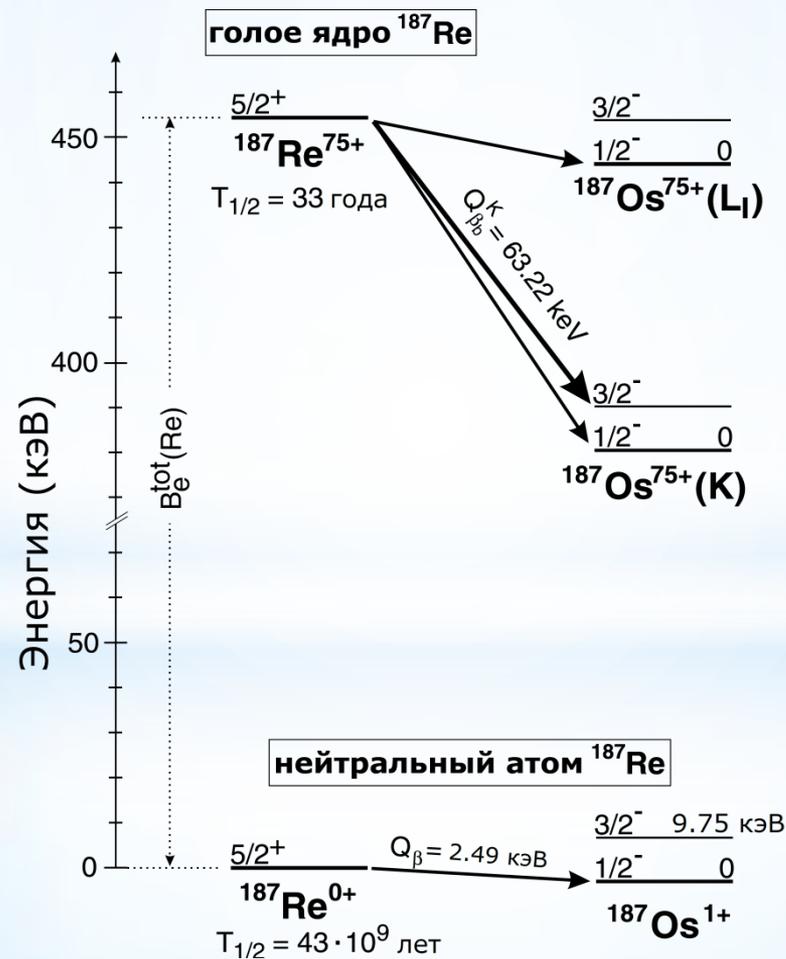
## 1) ввиду изменения энергии распада $Q$

Энергия  $\beta^-$ - и  $\varepsilon$ -распада  $Q = M_{init}^{at} - M_{final}^{at}$



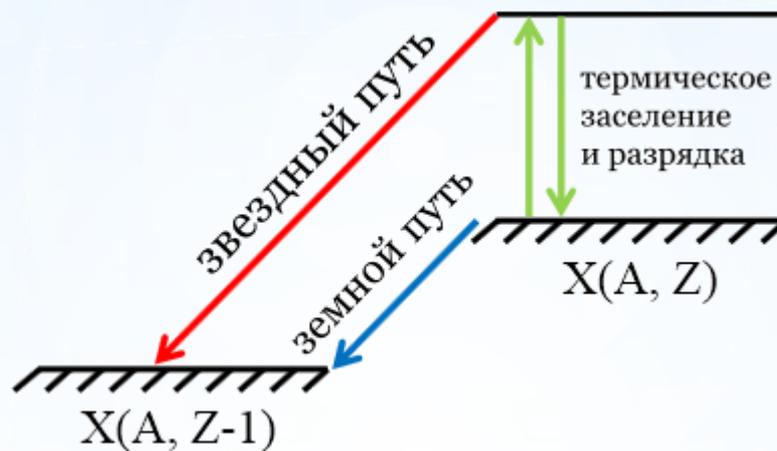
# $T_{\beta}$ ИЗМЕНЯЕТСЯ В ЗВЕЗДАХ

- 1) ввиду изменения энергии распада  $Q$
- 2) ввиду открытия новых каналов распада



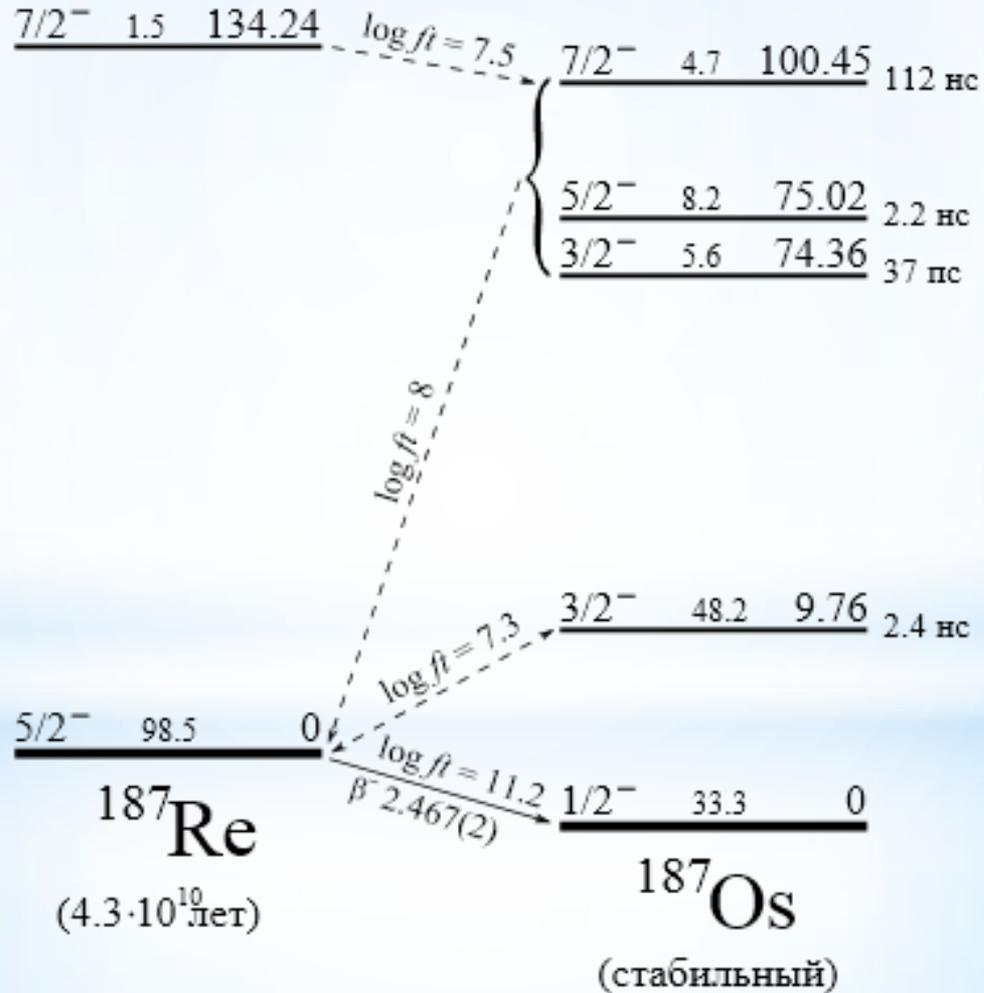
## $\tau_\beta$ ИЗМЕНЯЕТСЯ В ЗВЕЗДАХ

- 1) ввиду изменения энергии распада  $Q$
- 2) ввиду открытия новых каналов распада

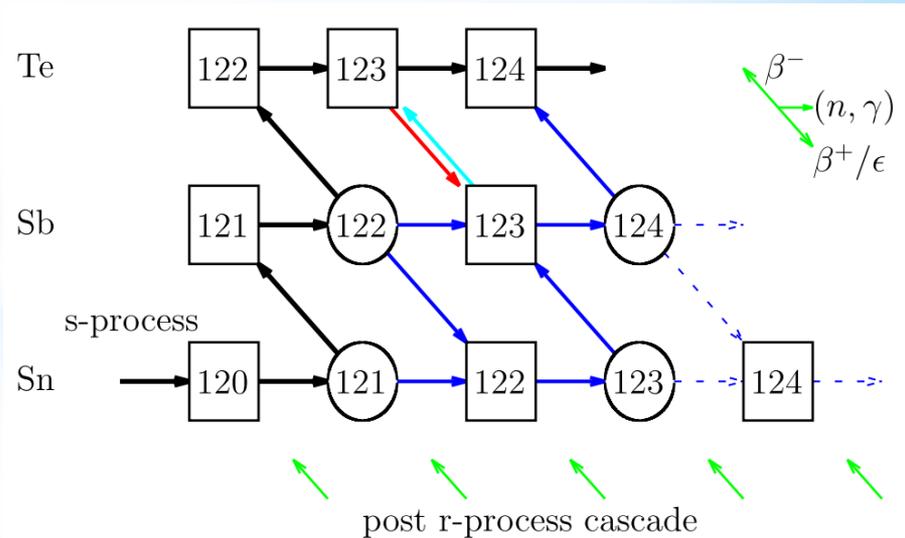
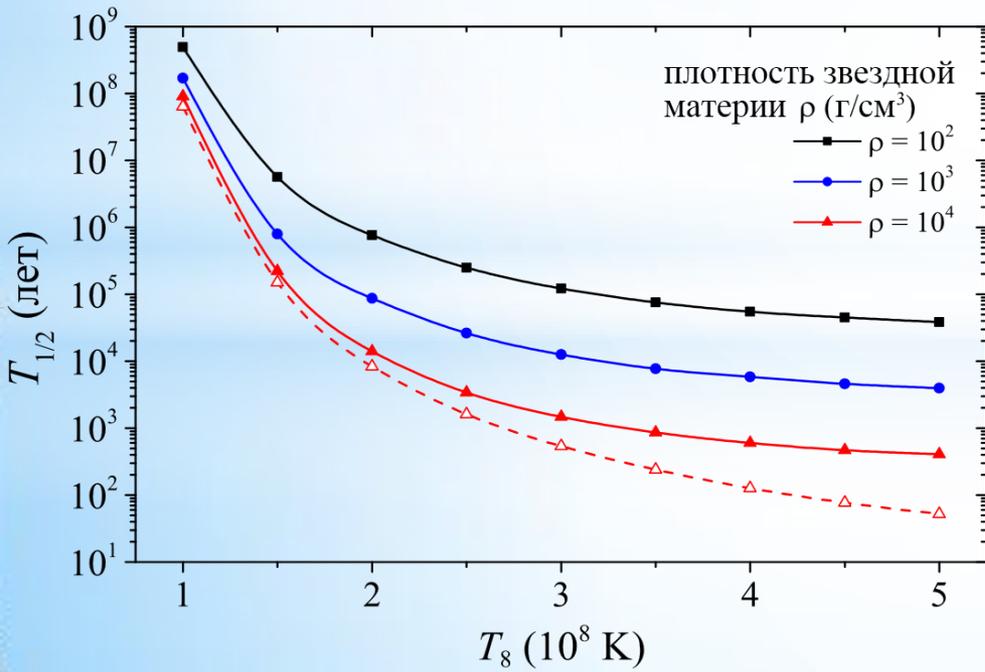
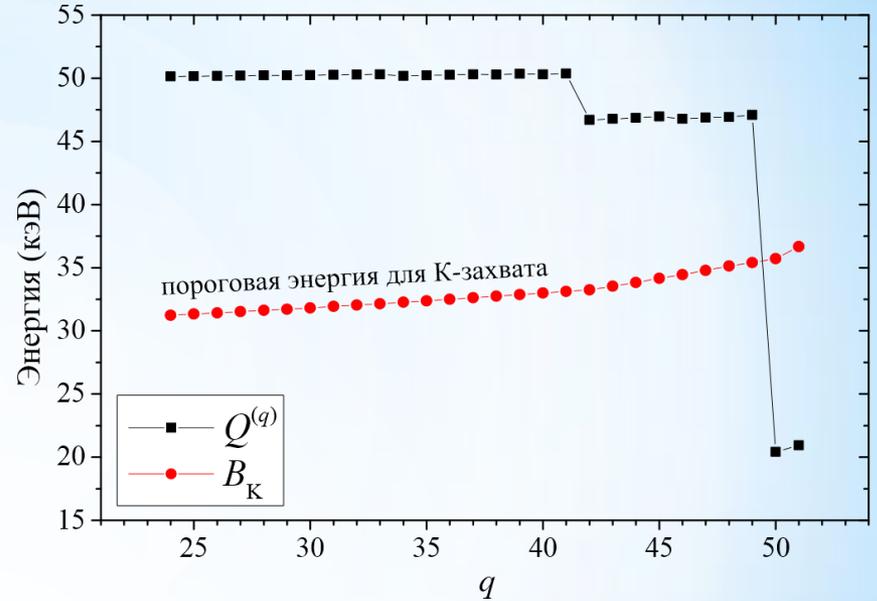
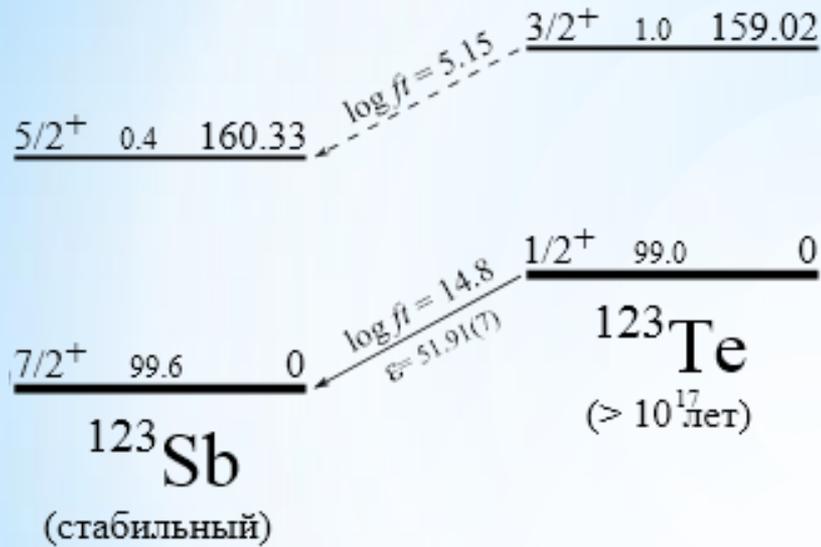


# $\tau_\beta$ ИЗМЕНЯЕТСЯ В ЗВЕЗДАХ

- 1) ввиду изменения энергии распада  $Q$
- 2) ввиду открытия новых каналов распада

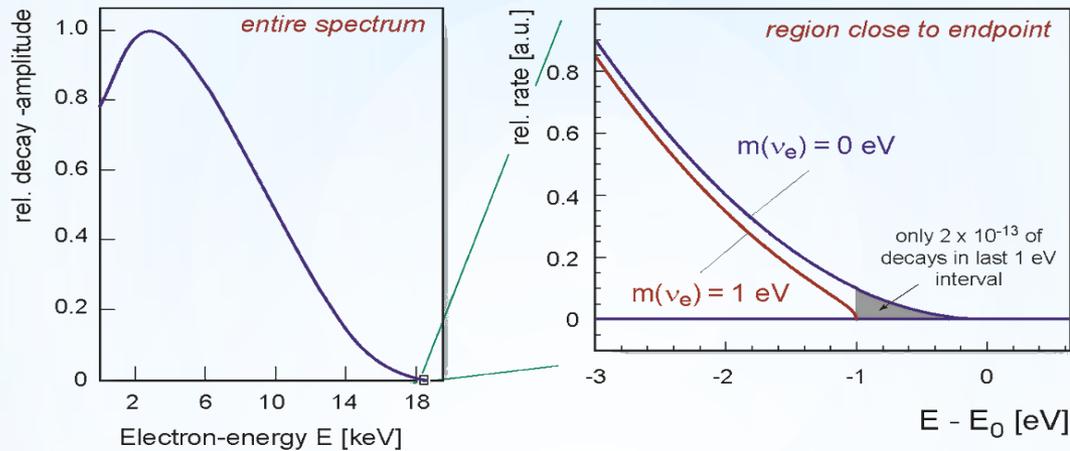


# $\tau_\beta$ ИЗМЕНЯЕТСЯ В ЗВЕЗДАХ

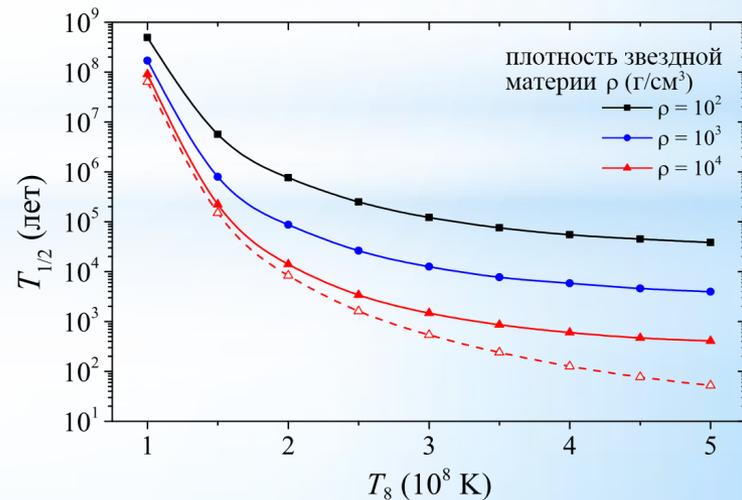
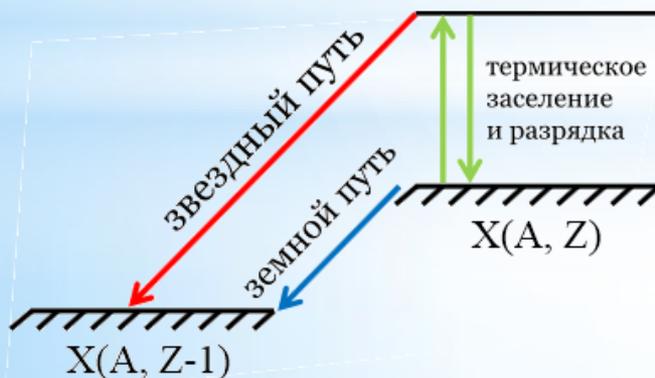


# Нуклиды с малой до $\sim 100$ кэВ энергией $\beta$ -распада:

- для задач нейтринной физики:



- особое внимание этим нуклидам  
нужно уделять в ядерной астрофизике



**Спасибо за внимание!**