

МАССА НЕЙТРИНО ПО β -СПЕКТРУ ТРИТИЯ В ВАЛИНЕ (ИТЭФ-84)

*С.Д.Борис, А.И.Голутвин, Л.П.Лаптин, В.А.Любимов,
В.В.Наговицын, Е.Г.Новиков, В.З.Нозик, В.А.Солощенко,
И.Н.Тихомиров, Е.Ф.Третьяков, Н.Ф.Мясоедов¹⁾*

Исследован спектр β -распада трития в молекуле валина на усовершенствованном спектрометре ИТЭФ. Существенное внимание уделено анализу аппаратурных функций. Получены оценки массы нейтрино и граничной энергии: масса нейтрино больше 20 эВ, разность масс ^3H и ^3He , следующая из граничной энергии спектра, хорошо согласуется с прецизионными данными по масс-спектрокопии на ионно-циклотронном резонансе.

¹⁾ Институт молекулярной генетики АН СССР.

В этой работе приводятся результаты измерений ρ -спектра трития в молекуле валина, выполненных на усовершенствованном магнито-электростатическом спектрометре ИТЭФ. Спектр сканировался изменением ускоряющего электростатического поля при постоянном фокусирующем магнитном поле. Модификация спектрометра привела к следующим важным преимуществам: 1) отсутствует влияние энергетической эффективности детектора на измеренную форму β -спектра; 2) фиксация энергии фокусируемых электронов на величине 22 кэВ при электростатическом ускорении позволила сильно подавить основную компоненту фона, связанную с загрязнением спектрометра тритием; 3) введением "точечноподобного" источника на слабопроводящей подложке и сокращением щелей детектора оптическое разрешение доведено до оптимальной по фону величины ≈ 25 эВ.

Калибровка спектрометра выполнена с помощью 29 конверсионных линий ^{169}Yb с использованием известных энергий γ -переходов. Мы оцениваем точность калибровки величиной 5 эВ.

Предварительные результаты анализа этой серии измерений ($\approx 1/3$ статистики, один источник) сообщались на конференции в Брайтоне ¹. Результат данной работы (доложен на конференции в Лейпциге ²) основан на полной статистике, полученной с тремя источниками различной толщины. Относительные толщины источников, характеризуемые вероятностью того что электрон не испытывает взаимодействия с веществом источника (см. величину ω в таблице 1), измерены экспериментально.

Т а б л и ц а 1

Источник	B1	B2	B3	Средние значения
ω	0,333	0,395	0,415	
	$\Delta E = 1680$ эВ			
$M_{\nu}^2, \text{эВ}^2$	1364 ± 63 [260]	$1174,0 \pm 81$ [180]	$1146,0 \pm 140$ [200]	1215 ± 130
$E_0, \text{эВ}$	$18585,2 \pm 0,3$ [3]	$18584,1 \pm 0,3$ [2,5]	$18583,5 \pm 0,5$ [2,7]	$18584,2 \pm 1,6$
χ^2 / N	317/303	523/509	471/508	
	$\Delta E = 330$ эВ			
$M_{\nu}^2, \text{эВ}^2$	$1384,0 \pm 175$ [170]	$1416,0 \pm 156$ [120]	$1261,0 \pm 283$ [130]	1375 ± 140
$E_0, \text{эВ}$	$18585,2 \pm 1,2$ [2,4]	$18585,5 \pm 0,9$ [2,0]	$18584,4 \pm 1,5$ [2,2]	$18585,1 \pm 1,4$
χ^2 / N	184/165	266/318	294/316	

Полная функция разрешения (ПФР) является суммой аппаратного спектра непроявляющихся электронов, т.е. оптической функции разрешения (ОФР), и вторичного аппаратного спектра электронов, изменивших свою энергию при взаимодействии в источнике. Вторичный спектр представим сверткой спектра ионизационных потерь (СИП) и спектра обратного рассеяния (СОР) с ОФР. Эти составляющие ПФР изучались на L_1 и M_1 конверсионных линиях в энергетическом диапазоне 10 – 60 кэВ. Вклад естественной ширины в форму линий был удален решением обратной задачи для уравнения свертки с $\Gamma(L_1) = 5,2$ эВ и $\Gamma(M_1) = 14,7$ эВ.

Основное отличие анализа в данной работе от ¹ заключается в том, что использованная ранее ОФР была симметричной. Симметризация выполнялась инверсией высокоэнергичного склона конверсионной линии. Очевидно, что процедура симметризации ОФР понижает диспер-

слю. ПФР и, следовательно, может только снизить оценку M_{ν} . Величина χ^2 оказалась высокой. В данной работе был выполнен детальный анализ формы ОФР, при котором был определен вклад "shake-off" — эффекта в форму конверсионной линии. Спектр "shake-off" извлечен с помощью L_1 и M_1 линий, измеренных для различных γ -переходов в диапазоне 10–60 кэВ. Анализ основан на предположении, что каждая измеренная линия представима в виде суммы двух компонент: 1) моноэнергетической линии, т.е. ОФР, которая для магнитного спектрометра имеет постоянную форму в шкале относительных импульсов ($\Delta P/P = \text{const}$); 2) постоянного в абсолютной энергетической шкале сопровождающего спектра, интерпретируемого как "shake-off" — эффект.

Рис. 1. Полная функция разрешения. Источник В2. Канал детектора — 2. Пунктиром показан вклад А — ОФР, В — СИП свернутый с ОФР, С — СОР

Рис. 2. График Кюри для экспериментальных данных, полного фита (сплошная кривая) и теоретической кривой (см. текст)

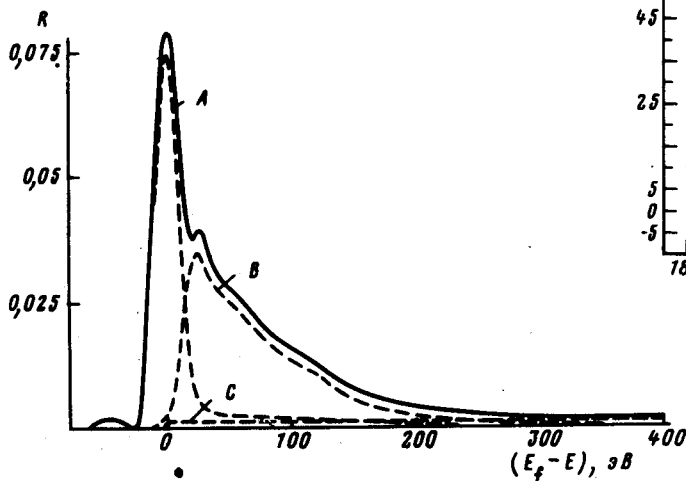


Рис. 1

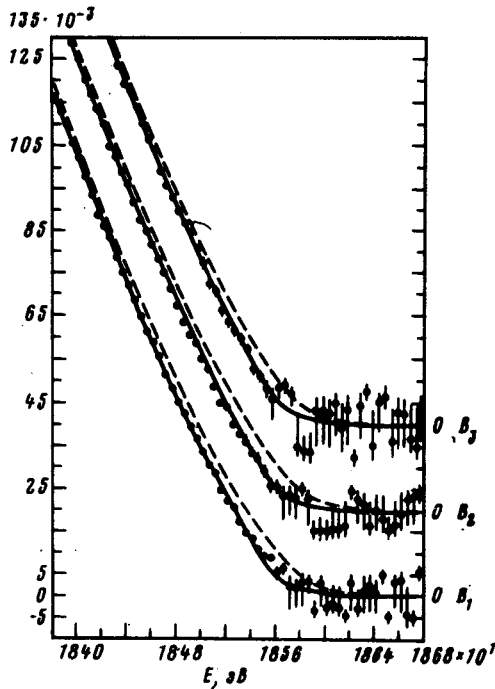


Рис. 2

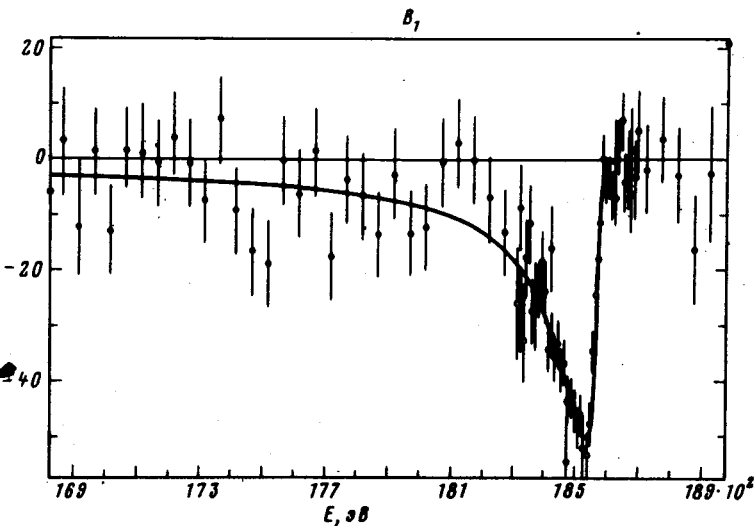


Рис. 3. Разница между экспериментальными данными или полным фитом (сплошная кривая) и теоретической кривой $M_{\nu} = 0$. Источник — В1

В результате анализа четырех линий было получено, что "shake-off" спектр составляет $\cong 30\%$ от полной интенсивности конверсионной линии и имеет особенности в области 15 и 50 эВ. Оконтальная форма ПФР для первичной энергии электронов 18,4 КэВ и энергии фокусировки $E_f = 22$ КэВ показана на рис. 1. Процедура фитирования экспериментальных данных принципиально не отличалась от использованной в ¹. Полный фит содержал три параметра: M_ν^2 , E_0 и α -коэффициент при поправке $\alpha \cdot (E_0 - E)^2$ к форме β -спектра. Спектр конечных состояний (СКС) молекулы валина при β -распаде взят из ³, где авторы, развивая метод расчета возбуждений, учли электронные корреляции. Анализ экспериментальных данных выполнен также для атомарного СКС и одноуровневой модели источника ("ядро").

На рис. 2 в виде графика Кюри показаны экспериментальные данные для трех источников в области близкой к E_0 . Здесь же показаны результаты полного фита и теоретический спектр для $M_\nu = 0$, но E_0 и α из полного фита. Рис. 3 демонстрирует данные и кривую полного фита во всем анализируемом диапазоне. В этом представлении теоретический спектр с $M_\nu = 0$ (E_0 и α из полного фита) принят за ось абсцисс.

В табл. 1 представлены фитированные параметры для СКС валина ³. Здесь показаны величины χ^2 и число степеней свободы. Отметим, что использование ОФР с остаточной асимметрией (рис. 1) значительно уменьшало χ^2 по сравнению с ¹. Для проверки гипотезы нулевой массы нейтрино выполнен фит данных с $M_\nu = 0$ и свободных параметрах E_0 и α . Для трех источников получены величины 680/304, 751/510 и 550/509 соответственно. Ошибки параметров, помещенные в квадратные скобки, включают флуктуации параметров при вариациях (в допустимых пределах) всех функций, входящих в модель β -спектра: параметров ПФР, вариации α -члена и т.п. Для средних величин приведены полные ошибки.

Из приведенных в таблице параметров независимых фитов для двух энергетических интервалов видно, что систематический дрейф параметров отсутствует. Мы подчеркиваем это важное обстоятельство, так как в коротком интервале эффект α -члена мал и вместе с тем сокращается влияние неопределенности в длинных хвостах ПФР, что могло бы сильно влиять на ее дисперсию.

Т а б л и ц а 2

СКС	Валин ³	Атом	"Ядро"
$M_\nu^2, \text{эВ}^2$	$1215,0 \pm 130$	$954,0 \pm 95$	$190,0 \pm 80$
$M_\nu, \text{эВ}$	$34,8 \pm 1,9$	$30, 9_{-1,6}^{+1,5}$	$13, 8_{-3,5}^{+2,5}$
$E_0, \text{эВ}$	$18584,2 \pm 1,6$	$18580 \pm 1,3$	$18567,4 \pm 1,0$
$\Delta M(^3\text{H} - ^3\text{He})$	$18603,6 \pm 6,0$	$18608,1 \pm 6,0$	$18586,8 \pm 6,0$

В табл. 2 представлены усредненные по всей статистике результаты для разных СКС. Разность масс нейтральных атомов ³H и ³He рассчитана по значениям E_0 и энергетическим параметрам электронных оболочек ³. Полученное здесь значение $\Delta M(^3\text{H} - ^3\text{He})$ существенно отличается от значения этой величины 18573 ± 7 эВ из анализа масс-спектроскопических данных ⁴. Недавно группой Липмаа ⁵ выполнены прецизионные измерения разности масс данного дублета на спектрометре использующем ионно-циклотронный резонанс с разрешением в 150 раз превышающем разрешение ⁴. Результат ⁵ $\Delta M = 18599 \pm 2$ эВ прекрасно согласуется с нашим значением.

Консервативная оценка массы нейтрино $M_\nu > 9$ эВ (90%-ный уровень достоверности) может быть получена для "ядерной" модели. Однако мы не считаем эту модель удовлетворительной с физической точки зрения. Реалистической оценкой массы нейтрино, следующей из данного анализа является

$$20 < M_\nu < 45 \text{ эВ.}$$

Мы благодарны М.Б.Волошину за полезные обсуждения "shake-off" эффекта.

Литература

1. *Boris S. et al.* Proc. of Int. Conf. on HEP, Brighton 1983, p. 386.
2. *Boris S. et al.* Proc. of Int. Conf. on HEP, Leipzig 1984, v. 1, p. 259.
3. *Каплан И. и др.* ДАН СССР, 1984, 279, 1110.
4. *Smith L.G. et al.* Phys. Lett., 1981, 102B, 114.
5. *Липмаа Э.Т., Пиквер Р.Й., Суурмаа Э.Р. и др.* Письма ЖЭТФ, 1984, 39, 529; *Lipmaa E. et al.* Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 285.

Институт теоретической
и экспериментальной физики

Поступила в редакцию
23 мая 1985 г.
