

25.12.63

7

3-17



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

О.А. Займидорога, М.М. Кулюкин, Р.М. Суляев, И.В. Фаломкин, А.И. Филиппов,
В.М. Цупко-Ситников, Ю.А. Шербаков

P-1454

К ОЦЕНКЕ МАССЫ МЮОННОГО НЕЙТРИНО
не ЭТФ, 1964, т46, в4, с 1240-1244.

О.А. Займидорога, М.М. Кулюкин, Р.М. Суляев, И.В. Фаломкин, А.И. Филиппов,
В.М. Цупко-Ситников, Ю.А. Щербаков

P-1454

21.90/3 чф

К ОЦЕНКЕ МАССЫ МЮОННОГО НЕЙТРИНО

Направлено в ЖЭТФ



Дубна 1963

А н н о т а ц и я

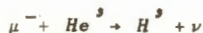
С целью аккуратной оценки массы нейтральной частицы, испускаемой в реакции $\mu^- + He^3 \rightarrow H^3 + \nu$ экспериментально установлено соотношение пробег-энергия для ядра трития в гелии в интервале энергий 0,2-3,0 Мэв. Для этого были измерены пробеги трития при различных энергиях в ряде реакций, изученных с помощью диффузионной камеры, а также использованы экспериментальные данные о потерях энергии при прохождении протонов в гелии.

Полное число наблюдавшихся случаев исследуемой реакции составляло ~ 200 событий. Это позволило получить пробег, а значит и энергию трития в данной реакции с хорошей точностью. Зная энергию трития и массы всех заряженных частиц, участвующих в реакции, можно найти массу нейтральной частицы. Она оказалась равной

$$m_{\nu} = 6_{-6}^{+2} \text{ Мэв}/c^2.$$

A b s t r a c t

To accurately evaluate the mass of the neutral particle emitted in the reaction



the range-energy relation for 0.2 + 3.0 MeV tritons moving through helium has been obtained experimentally.

For this purpose triton ranges corresponding to different energies for a series of reactions which had been studied in the diffusion cloud chamber, have been measured. Experimental data on the energy loss of protons, passing through helium, have been also used.

The total number of observed events of the reactions in question was about 200. This permitted us to obtain the range and thus the triton energy with good accuracy. The measured value of triton energy and the well-known masses of all charged particles in the above reaction permitted us to derive the neutral particle mass. It turned out to be

$$m_{\nu} = 6_{-6}^{+2} \text{ MeV}/c^2.$$

1. В нашем сообщении о наблюдении реакции



обсуждался вопрос о массе нейтральной частицы, испускаемой в процессе μ^- -захвата^{/1/}. Для оценки массы была использована измеренная величина пробега ядра отдачи - трития и экспериментальные данные о потерях энергии при прохождении протонов в гелии, известные в области энергий от 20 до 800 кэв^{/2/}. Вывод заключался в том, что нам не удалось наблюдать конечную массу, а масштаб неопределенности в величине массы составлял около 8 Мэв/с². Последняя оценка не учитывала трудно анализируемую неопределенность абсолютизации соотношения пробег-энергия. Трудности абсолютизации связаны, во-первых, с экстраполяцией в нуль потерь энергии при прохождении частицы через вещество и, во-вторых, с учетом различных систематических погрешностей, возникающих при измерении пробега.

Настоящая заметка посвящена уточнению соотношения пробег-энергия для трития в гелии. С этой целью были измерены пробеги трития при различных энергиях в следующих реакциях, изученных с помощью диффузионной камеры:



Реакции (2) и (3) представляют собой захват ядрами He^3 останавливающихся π^- -мезонов, а реакция (4) - захват тепловых нейтронов. В реакции (4) измерялся суммарный пробег трития и протона. Полученные результаты вместе с новым более точным экспериментальным значением пробега трития из реакции (1) применены для оценки массы нейтральной частицы, испускаемой при μ^- -захвате. Для определения среднего значения пробега трития в реакции (1) был использован весь имеющийся материал, что составляло около 200 событий^{/3/}.

По современным представлениям нейтральная частица, испускаемая при μ^- -захвате, является мюнным нейтрино, а её масса строго равна нулю. Лучшие экспериментальные оценки верхней границы массы мюнного нейтрино, полученные из анализа π - μ - и μ - e -распадов, составляют около 3 Мэв/с^{2/4/}. Процесс μ^- -захвата из-за большой выделяющейся энергии менее удобен для оценки массы нейтрино. Однако

благоприятные возможности абсолютного измерения энергии трития в реакции (1) дают основание надеяться на получение результата, по точности не намного уступающего имеющимся оценкам. Отметим также, что оценка массы нейтральной частицы, испускаемой при μ -захвате, сохраняет феноменологический интерес, поскольку прямые экспериментальные данные на этот счет отсутствуют.

2. Пробег заряженной частицы определялся как расстояние в $\text{мг}/\text{см}^2$ между точкой взаимодействия и точкой, где частица прекращает ионизировать атомы среды. Обе точки вуалируются самим треком, имеющим в среднем ширину 0,5 мм. Если начальная точка определяется сравнительно легко, то для нахождения метода определения конечной точки пробега потребовались дополнительные исследования. Прежде всего была выяснена связь между шириной трека s и распространением почернения x в колонке ионов по направлению движения частицы. Оказалось, что вдоль трека почернение распространяется меньше, чем по ширине следа, а именно $x = 0,4s$. Этот результат был получен путем измерений случаев упругого рассеяния релятивистских частиц на ядрах гелия с четко видимыми следами ядер отдачи. Затем необходимо было установить зависимость ширины трека от ионизации, производимой частицей, поскольку последний отрезок пробега трития, на котором ионизация уменьшается от величины, соответствующей максимальной ширине следа, до нуля, соизмерим с шириной трека. Для решения этой задачи были использованы треки останавливающихся в камере мезонов, у которых в интересующей нас области ионизационных потерь хорошо заметно изменение ширины, так как в случае мезонов эта область соответствует большому отрезку пробега от некоторой точки на треке мезона до остановки. Измерения пробегов и ширины следов производились на репроекторе и микроскопе УИМ-21. Итоговые результаты для величины поправки, которую следует вычесть из полной длины трека, чтобы получить правильное значение пробега, представлены на рис. 1. Поправка выражена в единицах ширины s_0 , отвечающей максимальной ионизации. Как видно из рисунка, поправка зависит от массы частицы и от рабочего давления в камере.

Температурная поправка вводилась на основе измеренного температурного распределения в чувствительном слое камеры. Температурное распределение измерялось термомпарами при заполнении камеры водородом, который близок по своим термодинамическим характеристикам к гелию-3. Последнее обстоятельство, равно как и ряд других причин, например, трудность очень точного измерения давления, сохраняют некоторую неопределенность в оценке абсолютной точности измерения пробегов. Для наших целей очень существенным было исключение систематических ошибок, возможных при использовании экспериментального материала, полученного в разных условиях. Сюда относится учет усадки пленки, идентичность измерительных приборов и т.д.

Пробег трития в реакции (2) и суммарный пробег протона и трития в реакции (4) измерялись при давлении в камере 6,5 атм. Пробег трития в реакции (1) измерялся

ся при давлении 17,4 атм, а в реакции (3) - при двух давлениях: 6,5 атм и 17,4 атм. Типичные фотографии рассматриваемых процессов приведены на рис. 2. На фотографии события от реакции (3) при низком давлении хорошо заметно рассеяние трития перед остановкой. При измерениях подобные искривления спрямлялись, чтобы результаты измерений при низком и высоком давлении были эквивалентны, поскольку при высоком давлении таких "крючков" не видно. Событий каждого вида было по несколько сотен. Это дало возможность получить в результате измерений средние значения пробегов с указанной в таблице 1 статистической точностью. В таблице приведены значения энергии и измеренного пробега трития в указанных реакциях, за исключением последней реакции, где приведен суммарный пробег трития и протона. Однако пробег протона из последней реакции мы можем найти, поскольку пробег трития в этой реакции очень близок к пробегу трития в реакции (2). В двух последних столбцах таблицы для наглядности приведены ориентировочные значения пробегов в мм.

Т а б л и ц а 1

Реакция	E, Мэв	R мг/см ²	l, мм (p=6,5 атм.)	l ₀ , мм (p=17,4 атм.)
$\mu^- + He^3 \rightarrow H^3 + \nu$	1,8965 ^{x)}	2,34±0,01		9,0
$\pi^- + He^3 \rightarrow H^3 + \pi^0$	0,1887	0,247±0,003	2,5	
$\pi^- + He^3 \rightarrow H^3 + \gamma$	3,281	5,56±0,01		21,5
		5,57±0,01	56,0	
$n + He^3 \rightarrow H^3 + p$	0,1915	0,940±0,010	9,5	
	(E _p =0,5732)			

Хорошее совпадение значений пробегов трития в реакции (3) при двух различных давлениях подтверждает правильность процедуры измерения пробега и свидетельствует об отсутствии заметных систематических ошибок в температурных поправках при разных давлениях.

Калибровка кривой пробег-энергия, полученной на основе экспериментальных данных о потерях энергии протонов в гелии, была проведена по точке, соответствующей энергии трития 0,1887 Мэв. В качестве контрольной точки можно использовать пробег протона в реакции (4). После пересчета на тритий получается следующий результат: при E=1,716 Мэв R = 2,07±0,03 мг/см². Однако эта точка измерена с меньшей точностью, и, кроме того, здесь возможно небольшое завышение пробега, связанное с тем, что этот результат получен из пробега протона в реакции (4), для которого рас-

x) Энергия рассчитана для нулевой массы нейтрино.

сеяние перед остановкой играет меньшую роль, чем для трития. Откалиброванная кривая пробег-энергия в области энергий 0,1887-2 Мэв вместе с экспериментальными точками показана на рис. 3. Следует отметить, что значение пробега при $E=3,281$ Мэв соответствует в известном смысле граничной энергии. Ниже этой энергии теоретическое вычисление потерь энергии при прохождении трития через гелий не может дать необходимой точности, в результате чего для вычисления пробегов при больших энергиях нужно знать пробег трития при граничной энергии. Поэтому найденное значение пробега можно использовать для уточнения теоретических значений пробегов трития и протона в гелии.

3. Из полученной зависимости пробега от энергии была определена энергия трития в процессе μ -захвата. Она оказалась равной $E=1,8908 \pm 0,0057$ Мэв. Оценка массы нейтрино может быть сделана по формуле:

$$m_{\nu} = \sqrt{(\Delta E - E)^2 - 2Mc^2E}, \quad (5)$$

где ΔE - выделяющаяся в реакции (1) энергия, L - кинетическая энергия трития в реакции (1), m - масса ядра трития, причем $\Delta E = [M(\mu^-) + M(He^{3++}) - M(H^{3+})]c^2 - E_{св}$ где $E_{св}$ - энергия связи мюона на боровской орбите ядра He^3 . В расчете были приняты следующие значения масс частиц, участвующих в реакции: $M(\mu^-) = 105,654 \pm 0,002$ Мэв/с², $M(He^{3++}) = 2808,217 \pm 0,017$ Мэв/с², $M(H^{3+}) = 2808,746 \pm 0,017$ Мэв/с², кроме того, хорошо известна разность масс $M(H^{3+}) - M(He^{3++}) = 0,5293 \pm 0,0003$ Мэв/с², а $E_{св} = 0,0113$ Мэв. После подстановки численных значений в формулу (5) получаем $m_{\nu} = {}_{-6}^{+2}$ Мэв/с², т.е. нулевое значение массы мюонного нейтрино не исключается, а в качестве верхнего предела можно рассматривать величину 8 Мэв/с².

Авторы благодарны Б.Понтекорво и Л.И.Лapidусу за интерес к работе и обсуждению, а также Е.А.Шванеовой и А.И.Токарской за помощь при измерениях.

Л и т е р а т у р а

1. О.А.Займидорога, М.М.Кулюкин, Б.Понтекорво, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, В.М.Цупко-Ситников, Ю.А.Шербаков. ЖЭТФ, 41, 1804, 1961.
2. S.K.Allison, S.D.Warshaw. Rev. Mod. Phys., 25, 779, 1953.
3. О.А.Займидорога, М.М.Кулюкин, Б.Понтекорво, Р.М.Суляев, И.В.Фаломкин, А.И.Филиппов, В.М.Цупко-Ситников, Ю.А.Шербаков. ЖЭТФ, 44, 389, 1963; Physics Letters, 3, 229, 1963.
4. W.H.Barkas, W. Birnbaum G.M.Smith. Phys. Rev., 101, 778 (1956). W.F.Dudziak, R.Sagane, J.Vedder. Phys. Rev., 114, 336 (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел
26 октября 1963 г.

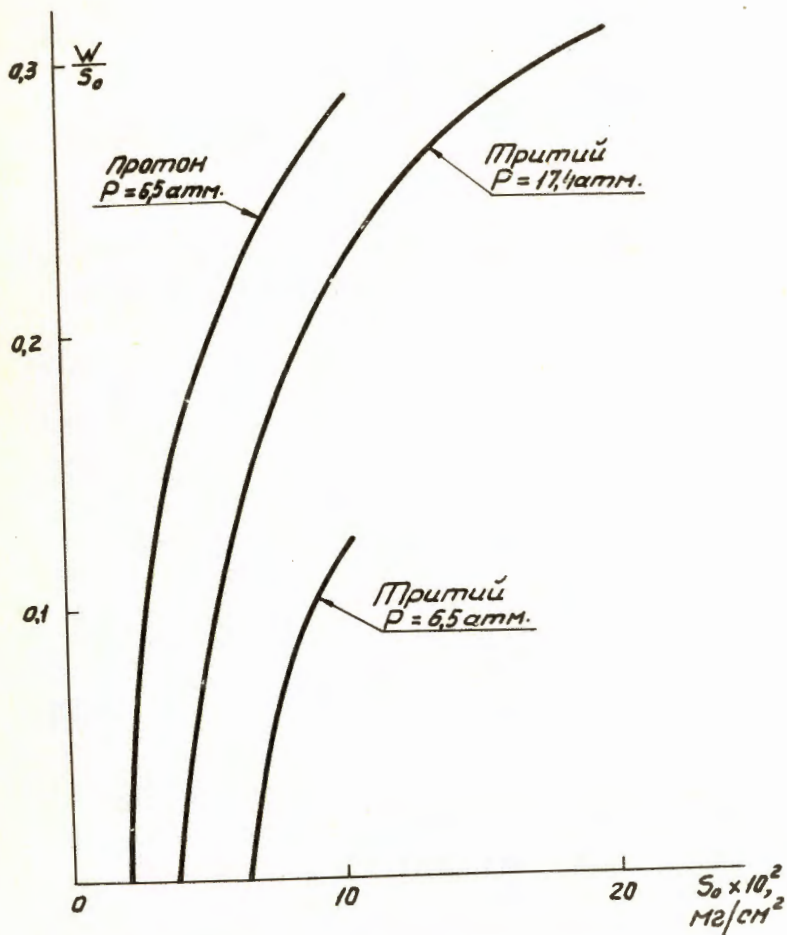


Рис. 1. Поправка, определенная как часть максимальной ширины следа, которую следует вычитать из измеренной величины пробега, чтобы получить правильное значение пробега. Поправка дана в зависимости от максимальной ширины следа.

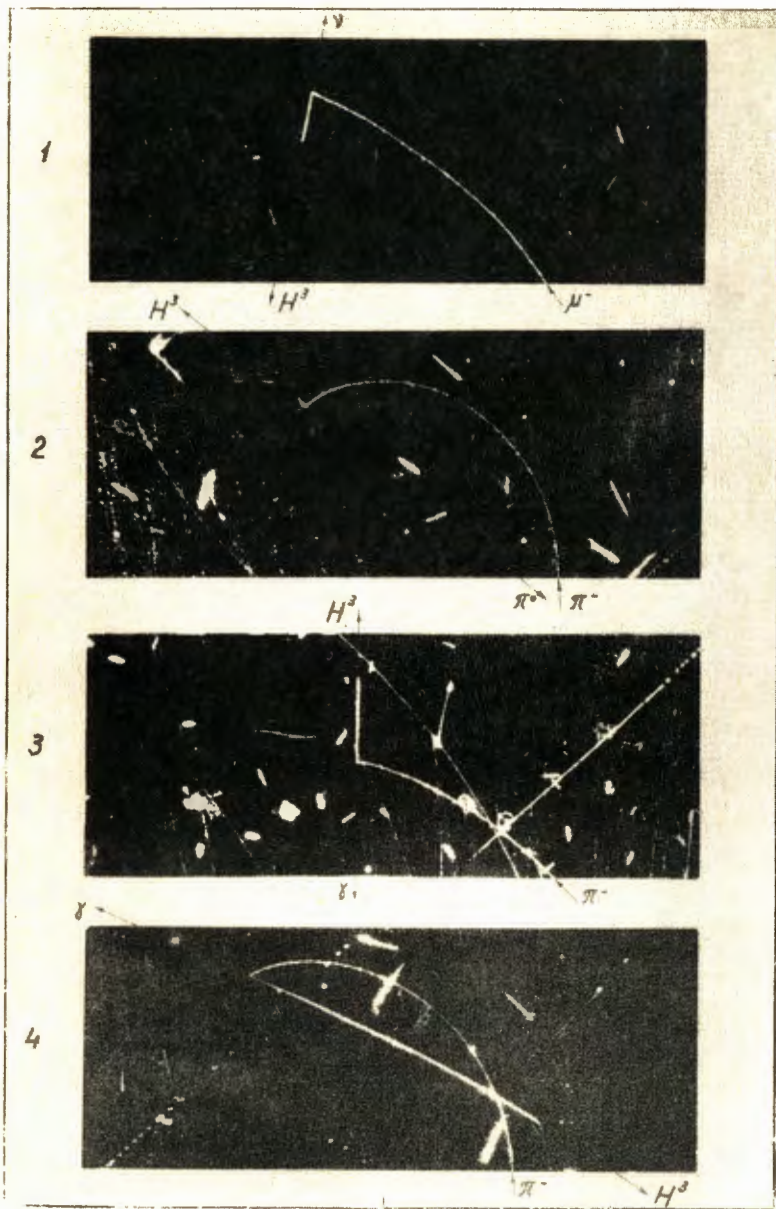


Рис. 2. На фотографиях 1 и 3 показаны события от реакций (1) и (3) при высоком давлении в камере, равном 17,4 атм, а на фотографиях 2 и 4 - события от реакций (2) и (3) при низком давлении, равном 6,5 атм. На каждой фотографии присутствуют случаи от реакции (4), при высоком давлении - это короткие черточки, а при низком - более длинные.

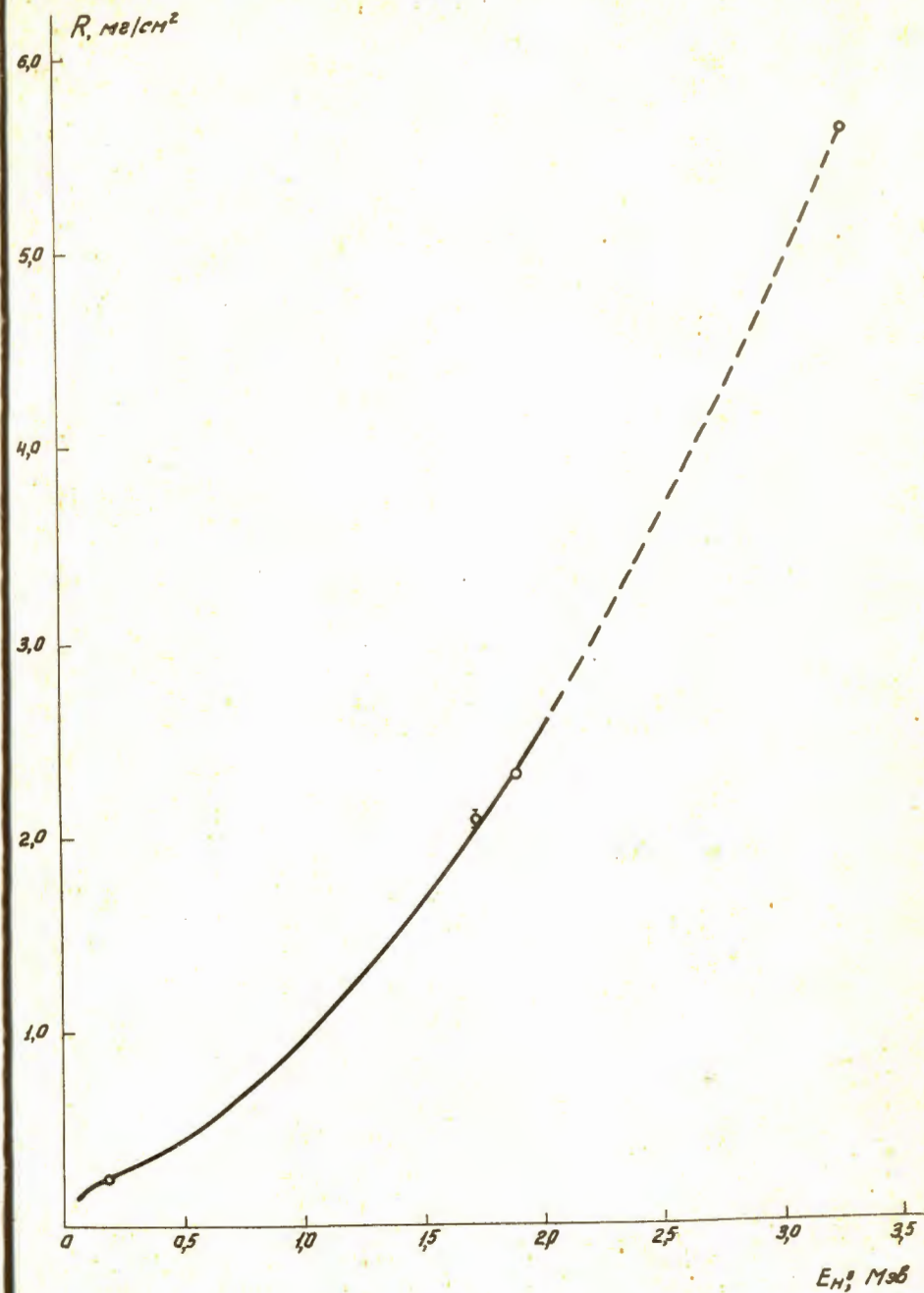


Рис. 3. Соотношение пробег-энергия для трития в He^3 . Сплошная часть кривой проведена через крайнюю левую экспериментальную точку согласно данным о потерях энергии при прохождении протонов в гелии^[2], пунктирная часть кривой, соединяя экспериментальные точки, служит продолжением сплошной кривой.