

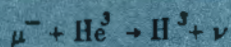


ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

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

Д - 768

НАБЛЮДЕНИЕ РЕАКЦИИ

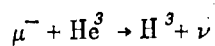


Дубна 1961

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

Д - 768

НАБЛЮДЕНИЕ РЕАКЦИИ



Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

Среди процессов слабых взаимодействий нестранных частиц одним из наименее изученных процессов является захват мюона нуклоном. Исследование еще не наблюдавшегося захвата μ^- -мезона свободным протоном представляет большой интерес, однако, интерпретация экспериментальных результатов будет усложняться различными молекулярными эффектами^{/1/}. В опытах по захвату мюонов в сложных ядрах, в основном, измерялась суммарная вероятность разных переходов^{/2/}. Единственным определенным переходом, изучавшимся подробно, является процесс поглощения мюона ядром C^{12} с образованием B^{12} ^{/3/,/4/}. Но и в этом случае интерпретация результатов опытов затрудняется недостаточно точным знанием ядерных волновых функций и рядом других причин. К тому же результаты измерений, выполненных разными группами, пока не согласуются.

Интерес к экспериментальному изучению реакции захвата медленных μ^- -мезонов в гелии-3 с образованием в конечном состоянии трития и нейтрино



обусловлен тем, что теоретические расчеты^{/5/,/6/} вероятности этого процесса, основанные на известной величине ft для β -распада трития, имеют высокую точность. Измерение вероятности процесса /1/ позволит определить эффективную мюон-нуклонную константу взаимодействия и проверить таким образом справедливость теории универсального слабого взаимодействия^{/7/}.

Определение энергии трития, образующегося в процессе /1/, дает, наряду с этим, возможность прямым способом оценить верхний предел массы нейтральной частицы, испускаемой при захвате мюона и доказать тем самым существование процесса^{/8/}



который, хотя и является общепринятым, но до сих пор не наблюдался достаточно уверенно ни на свободных протонах, ни на сложных ядрах^{x/}.

^{x/} Наиболее непосредственное измерение энергии, уносимой нейтральной частицей в процессе захвата мюона ядром, было сделано, по-видимому, Фраем^{/9/}, тем не менее его данные не позволяют сделать надежной оценки массы нейтральной частицы.

Ниже описываются первые результаты изучения реакции /1/.

В связи с тем, что He^3 является редким изотопом, для исследования захвата мюонов в He^3 первоначально мы предполагали использовать смесь водорода с гелием, надеясь на эффективный перехват мюонов из состояния мезоводорода, подобно известному перехвату мюонов дейтерием и другими ядрами. Однако, как показали эксперименты, проведенные нами при помощи диффузионной камеры, наполненной смесью водорода и гелия, а также теоретические оценки С.С. Герштейна, эффективный перехват мюонов на гелий даже при концентрации гелия, равной 15%, в этих условиях не происходит. Поэтому в последующих опытах пришлось использовать чистый гелий-3.

В опытах применялась диффузионная камера, наполненная гелием-3 до давления 20 атм. Чистота использовавшегося газа была лучше 99,999%. Примесь трития составляла около 10^{-15} . Упругость паров метилового спирта в чувствительном слое камеры составляла меньше 50 мм Нг. Камера находилась в магнитном поле напряженностью 8000 эрстед и располагалась в пучке мезонов с импульсом 217 Мэв/с, выведенном из синхроциклотрона ОИЯИ. Торможение мезонов и отделение мюонов от пионов осуществлялось медным фильтром, помещавшимся вблизи камеры. Были приняты специальные меры для защиты камеры от тепловых нейтронов, которые с большим сечением вызывают реакцию



создавая значительный фон и большую ионную загрузку в камере.

До сих пор в "мюонной экспозиции", т.е. экспозиции, в которой толщина фильтра соответствовала максимальному числу остановившихся в камере мюонов, было получено около 6000 фотографий остановок мезонов в гелии-3.

Идентификация реакции /1/ основывалась на том, что ядро трития отлетает со строго определенной энергией /1,897 Мэв/ и, следовательно, имеет определенный пробег. Анализировались однолучевые звезды, образованные остановившимися мезонами. На рис. 1 представлен спектр пробегов вторичных заряженных частиц, остановившихся в чувствительном слое камеры /"мюонная гистограмма"/. Пунктиром на этом рисунке нанесены 6 случаев,

идентифицированных с меньшей достоверностью из-за плохих условий видимости, или из-за того, что след остановившегося мезона был коротким. Для выяснения вопроса о фоне, который могут создать остановившиеся пионы, присутствующие в качестве примеси в "мюонной экспозиции", было проанализировано 1200 пионных звезд, полученных в отдельном опыте /"пионная экспозиция"/, в котором толщина фильтра выбиралась так, чтобы получить максимум пионных остановок в камере. Гистограмма пробегов продуктов пионных звезд, остановившихся в чувствительном слое камеры, показана на том же рисунке заштрихованными прямоугольниками /"пионная гистограмма"/. Последняя гистограмма "нормирована" на площадь "мюонной гистограммы" в области пробегов от 5,00 до 6,00 мг/см², где в основном должны находиться события радиационного захвата Π^- -мезонов в гелии-3:

$$\Pi^- + \text{He}^3 \rightarrow \text{H}^3 + \gamma$$

Из полученного числа звезд в указанной области пробегов следует, что примесь остановившихся в камере пионов в "мюонной экспозиции" составляла около 2%. Эта оценка согласуется с независимым определением примеси пионов, сделанным по полному числу звезд при заполнении камеры гелием-4.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что звезды, зарегистрированные в "мюонной экспозиции" во всем рассматриваемом интервале пробегов, в основном, образованы пионами за исключением области около 2,40 мг/см², где можно думать, наблюдается моноэнергетическая группа частиц, образованная остановившимися мюонами. Оценка абсолютного разброса значений пробегов производилась на основании измерения большого числа суммарных пробегов протона и трития, образованных в гелии-3 тепловыми нейтронами в реакции /3/. Число таких событий на каждом кадре было около 20. Средняя квадратичная ошибка пробега в этих измерениях получилась равной 0,06 мг/см². Кривая ошибок с этой полушириной и нанесена на рис. 1 для иллюстрации масштаба разброса измеренных пробегов моноэнергетических частиц. Видно, что группа частиц с пробегами около 2,40 мг/см² действительно может рассматриваться как моноэнергетическая. Энергия этих частиц согласуется с ожидаемым значением энергии H^3 в процессе /1/.

Это означает, что при захвате мюона в гелии-3 имеется переход, в котором должна испускаться только одна нейтральная частица. При этом ее масса очень мала и совместима с величиной, равной нулю /см. ниже/, а ее спин должен быть полувечным. Можно считать, что нами наблюдались 14 случаев захвата μ^- -мезонов в He^3 с образованием трития и нейтрино в конечном состоянии. Типичная фотография процесса /1/ приведена на рис.2. Среднее значение пробега трития, определенного по 14 случаям, составляет $2,37 \pm 0,02$ /мг/см².

Пользуясь этим значением пробега и экспериментальными данными об ионизационных потерях энергии протонов в гелии^{10/}, можно оценить верхнюю границу массы нейтральной частицы, испускаемой в процессе захвата мюонов нуклонами. При этом оказывается, что с вероятностью 99% ее масса меньше 6 Мэв. Массы участвующих в процессе /1/ заряженных частиц принимались следующими: $m_{\text{He}^3} = 2808,22$ Мэв, $m_{\text{H}^3} = 2808,75$ Мэв, $m_{\mu} = 105,65$ Мэв. Следует заметить что приведенная оценка включает в себя только статистические ошибки в определении пробега трития и не учитывает возможных систематических погрешностей, которые несомненно могут иметь место, в частности, при переходе от пробега к энергии. Поэтому более реальным выводом будет утверждение, что конечную величину массы мюонного нейтрино, испускаемого в реакции /1/, наблюдать нам не удалось, а масштаб неопределенности в массе нейтрино, как это показывает анализ разных погрешностей, составляет около 8 Мэв.

Вероятность реакции /1/ Λ может быть практически определена как отношение числа случаев этой реакции к полному числу остановок мюонов в гелии-3, умноженное на известную вероятность (μ e) -распада. Наблюдаемое число случаев /1/ и число остановок мюонов, удовлетворяющих принятым критериям отбора /5196/, были исправлены с учетом эффективности регистрации в камере ядер трития с соответствующими пробегом и эффективностью просмотра. Эффективность регистрации трития была определена из анализа спектра видимых длин следов заряженных частиц в пионных звездах и составляла $88 \pm 4\%$. Эффективность просмотра определялись по результатам независимого повторного просмотра части материала и оказалась равной 94%.

Принимая для времени жизни мюона значение $2,21 \cdot 10^{-6}$ сек, величину Λ получаем равной $1,30 \pm 0,40 / 10^3 \text{ сек}^{-1}$. Этот результат следует сравнивать с теоретической величиной $1,54 \pm 0,08 / 10^3 \text{ сек}^{-1}$, полученной Вольфенштейном^{/6/} на основе теории универсального слабого взаимодействия и являющейся, по-видимому, наиболее точной среди теоретических величин Λ .

Достоверность согласия полученного результата с теорией невелика из-за его большой статистической ошибки, и поэтому в настоящее время нами ведется работа по улучшению статистической точности результатов. Можно заметить, однако, что точность $\sim 30\%$, с которой уже проверена в описанном выше опыте теория универсального взаимодействия, сравнима с точностью проверки этой теории^{/6/} опытами по исследованию чистого гамов-теллеровского перехода в реакции $\mu^- + \text{C}^{12} \rightarrow \text{B}^{12} + \nu$. Полученный нами результат дает первые грубые сведения о величине векторной константы мю-нуклонного взаимодействия, знак которой, как известно^{/11/}, противоположен знаку аксиально-векторной константы.

Если предположить, что сверхтонкие состояния мезо- H^3 населены статистически /в пользу этого имеются сильные теоретические аргументы^{/12/}, то вероятность реакции /1/ определяет величину $3G_G^2 + G_F^2$, где G_G и G_F есть гамов-теллеровская и фермиевская эффективные константы связи. Для нашей цели приближенно их можно выразить через аксиально-векторную $g_A^{(\mu)}$ и векторную $g_V^{(\mu)}$ константы:

$$G_F = g_V^{(\mu)}$$

$$G_G \sim g_A^{(\mu)}$$

Комбинируя наиболее точную величину вероятности перехода $\mu^- + \text{C}^{12} \rightarrow \text{B}^{12} + \nu$ $6,31 \pm 0,24 / 10^3 \text{ сек}^{-1}$ ^{/4/} со значением вероятности процесса $\mu^- + \text{He}^3 \rightarrow \text{H}^3 + \nu$ получим, что $|g_V^{(\mu)}| < 2 |g_A^{(\mu)}|$ с вероятностью 90%.

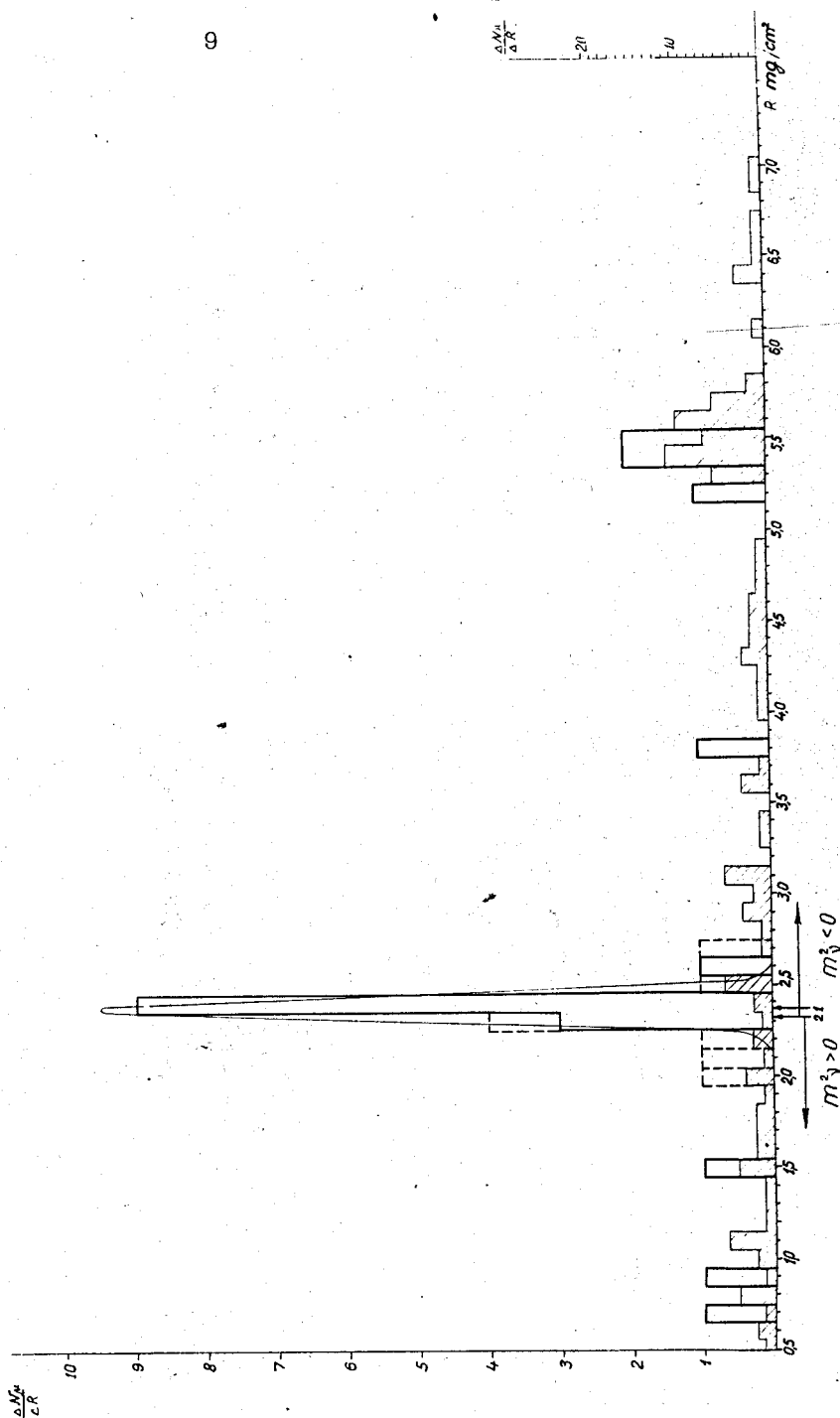
Авторы выражают глубокую благодарность П.Л. Капица, В.П. Пешкову, В.М. Кузнецову и А.И. Филимонову за неоценимую помощь в проведении очистки гелия-3 от трития в ИФП АН СССР и С.С. Герштейну за многочисленные полезные дискуссии. Мы благодарны В.П. Дзелепову

и Л.И. Лapidусу за интерес к работе, а также благодарны Г.М. Александрову, В.В. Кузнецову, Н.В. Лебедеву, В.И. Орехову, В.Ф. Поенко, А.Г. Потехину, Д.Б. Понтекорво и И.В. Фаломкину за помощь в подготовке аппаратуры и участие в измерениях.

Л и т е р а т у р а

1. С.С. Герштейн, Я.Б. Зельдович. Успехи физических наук, 71 581 /1960/.
- S Weinberg. Phys.Rev.Lett. 4, 575 (1960).
2. J.C.Sens. Phys.Rev., 113, 679 (1959).
3. J.O. Burgman, J. Fisher, B. Leontic, A. Lundby, R. Mennier, J.P. Stroot, J.D. Teja. Phys.Rev.Lett. 1, 469, 1958;
- J.B. Harrison, H.V. Argo, H.W. Kruse, A.D. McGuire. Phys.Rev., 114, 626 (1959); J.C. Fetkovich, T.H. Fields, R.L. McIlweir. Phys.Rev., 118, 319 (1960).
4. E.J. Maier, B.L. Bloch, R.M. Edelstein, R.T. Siegel. Phys.Rev. Lett. 6, 417 (1961).
5. A. Fujii, H. Primakoff. Nuovo Cimento 10, 327 (1958);
- Chu Chia-chen, Chou Kuang-chao, Peng Hong-an, Acta Physica Sinica 16, 61 (1960);
- Б.Л. Иоффе. ЖЭТФ, 37, 159 /1959/.
- C. Werntz, Nuclear Physics, 16, 59, 1960.
6. L. Wolfenstein. Proceedings of the 1960 Annual International Conference on High Energy Physics at Rochester, p. 529; Bull.Am.Phys.Soc., VI, 33 (1961).
7. E.C.G. Sudarshan, R.E. Marshak. Proceedings of the Padua-Venice conference on mesons and newly discovered particles, 1957; R.P. Feynman, M. Gell-Mann, Phys.Rev., 109, 903 (1958).
8. B. Pontecorvo, Phys.Rev., 72, 246, 1947.
9. W.F. Fry. Phys.Rev., 90, 999 (1952).
10. S.K. Allison, S.D. Warshaw. Rev.Mod.Phys., 25, 779 (1953).
11. V.L. Telegdi. Proceedings of the 1959 Kiev and of the 1960 Rochester Annual Conferences on High Energy Physics;
- Л.Б. Егоров, Г.В. Журавлев, А.Е. Игнатенко, А.В. Купцов, Ли Сюань-мин, М.Г. Петрашку. ЖЭТФ /в печати/.
12. А.П. Бухвостов и И.Н. Шмушкевич. ЖЭТФ /в печати/.

Рукопись поступила в издательский
отдел 24 июля 1961 года.

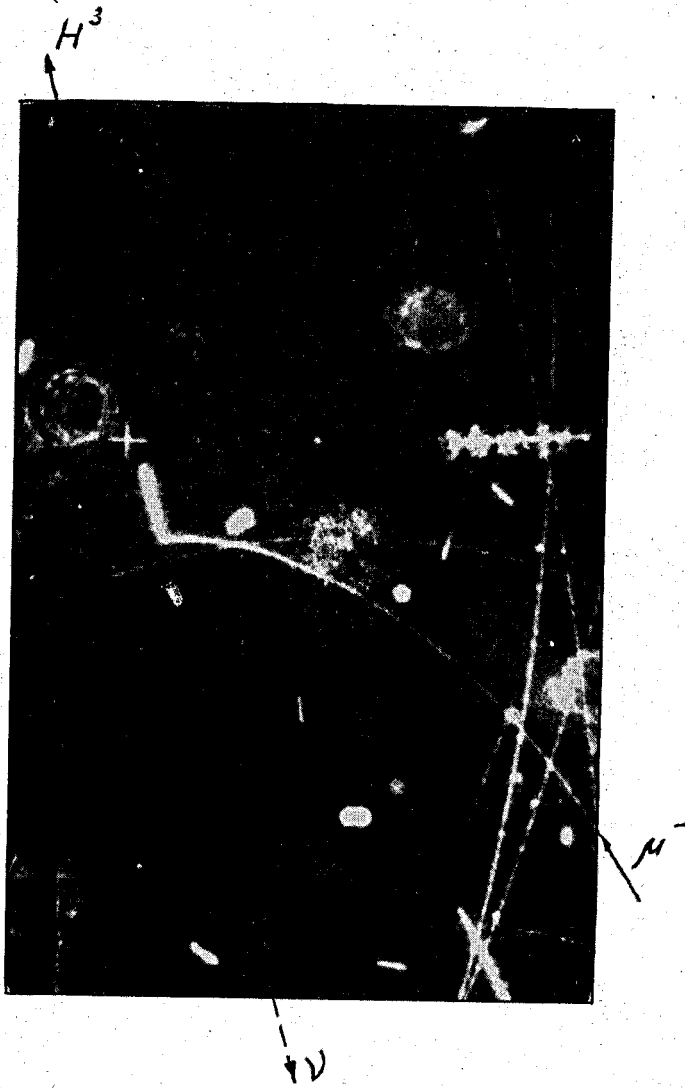


Р и с. 1.

Спектр пробегов, остановившихся в чувствительном слое камеры частиц, связанных с остановками мезонов,

$\frac{\Delta N_{\mu}}{\Delta R}$ — число случаев на интервал пробегов, полученное в "мюонной экспозиции".

$\frac{\Delta N_{\pi}}{\Delta R}$ — то же, полученное в "пионной экспозиции".
 Стрелкой 1 указан экспериментальный пробег трития в реакции /1/. Стрелкой 2 — ожидаемый пробег трития в реакции /1/, вычисленный по соотношению пробег-энергия /10/ в предположении, что масса нейтрино равна нулю.



Р и с. 2.

Типичная фотография реакции $\mu^- + \text{He}^3 \rightarrow \text{H}^3 + \nu$
 Короткие следы, видимые на фотографии, образованы
 тепловыми нейтронами в реакции $n + \text{He}^3 \rightarrow \text{H}^3 + p$
 ($R_{\text{H}^3} + R_p = 0.86 \text{ Mg/cm}^2$)