

УДК 539.126.33

НОВЫЙ ПРЕДЕЛ НА ВЕРОЯТНОСТЬ КОНВЕРСИИ МЮОНИЯ В АНТИМЮОНИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПИЯФ — ОИЯИ

*В.А.Гордеев**, *Д.В.Гордеев**, *С.А.Густов*, *Е.Г.Друкарев**, *Ю.В.Елкин**,
*А.Ю.Киселев**, *Е.Н.Комаров**, *Т.Н.Мамедов*, *О.В.Миклухо**,
И.В.Мирохин, *А.И.Михайлов**, *Ю.Г.Нарышкин**, *О.В.Савченко*

В совместном ПИЯФ — ОИЯИ эксперименте проведено экспериментальное исследование процесса конверсии мюония в антимюоний ($M \rightarrow \bar{M}$). Эксперимент осуществлен на интенсивном пучке «поверхностных» мюонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ с помощью аппаратуры, разработанной и изготовленной в ОФВЭ ПИЯФ. Получены новые оценки верхних экспериментальных пределов на вероятность процесса конверсии $W_{M\bar{M}}$ и на константу слабого взаимодействия $G_{M\bar{M}}$ в этом процессе: $W_{M\bar{M}} \leq 4,7 \times 10^{-7}$, $G_{M\bar{M}} \leq 0,14 \times G_F$ (90% CL). На основании данных эксперимента ПИЯФ — ОИЯИ с использованием наиболее реалистической теоретической модели перехода $M \rightarrow \bar{M}$ получено ограничение снизу на массу дважды заряженного хиггсовского бозона H^{++} , ответственного за процесс конверсии $M \rightarrow \bar{M}$: $M_{H^{++}} \geq 210$ ГэВ/c².

The New Limit of the Probability of Muonium-Antimuonium Conversion in SPINP — JINR Experiment

V.A.Gordeev et al.

An experimental research for the muonium-antimuonium conversion process ($M \rightarrow \bar{M}$) has been made in SPINP — JINR joint experiment. The experiment has been carried out on an intense beam of surface muons produced at the phasotron of LNP JINR. An equipment has been worked out and made in SPINP. New experimental estimates for the upper limits of the probability for the conversion process $W_{M\bar{M}}$ and of the weak-interaction constant $G_{M\bar{M}}$ in the process were found: $W_{M\bar{M}} \leq 4.7 \times 10^{-7}$, $G_{M\bar{M}} \leq 0.14 \times G_F$ (90% CL). On the basis of the experimental data and using the most realistic model of the $M \rightarrow \bar{M}$ conversion, down limit of the double-charged Higgs boson's mass was found: $M_{H^{++}} \geq 210$ GeV/c².

Стандартная модель электрослабого взаимодействия [1—3], описывая явления внутри одного поколения лептонов, ничего не говорит о возможности несохранения лептонного числа. Все полученные к сегодняшнему дню экспериментальные данные совместимы со строгим сохранением лептонных чисел. Однако возможное несохра-

*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН, Гатчина

нение последних интенсивно изучается. Установленное из экспериментов сильное ограничение на вероятность распада $\mu \rightarrow 3e$ позволяет сделать вывод о малости константы взаимодействия*, нарушающего лептонное число на единицу. Однако механизм изменения лептонного числа на две единицы, необходимого для $M \rightarrow \bar{M}$ конверсии, может быть совершенно иным. Такие модели обсуждались задолго до появления модели Вайнберга — Салама (см., например, [4]).

В рамках калибровочных моделей несохранение лептонного числа может происходить в результате спонтанного нарушения соответствующей симметрии. Взаимодействие, не сохраняющее лептонные числа, осуществляется путем обмена хиггсовскими бозонами. Измеренные сейчас верхние границы процессов дают ограничение на величины параметров этих бозонов, т.е. на значения их масс и юкавских констант.

Наибольший интерес вызывает модель, основанная на предположении о наличии у нейтрино конечной майорановской массы. В этой модели должны существовать хиггсовские бозоны, меняющие лептонные числа на $\Delta L = 2$. Среди них должны быть и обладающие зарядом $Q = 2|e|$. Они могут, в частности, вызвать интересующий нас переход $M \rightarrow \bar{M}$ (рис. 1), причем оценку параметров этих «хиггсов», вообще говоря, а priori сделать невозможно.

Амплитуда процесса в этой модели [5]:

$$\frac{G_{M\bar{M}}}{G_F} = \frac{f_{ee} f_{\mu\mu}^*}{g_w^2} \left(\frac{M_W}{M_{++}} \right)^2 \quad (1)$$

где $f_{ee}, f_{\mu\mu}^*$ — константы связи, $g_w^2 = 8G_F M_W^2 / \sqrt{2}$ — безразмерная константа слабого взаимодействия, M_W — масса W -бозона, M_{++} — масса дважды заряженного хиггсовского бозона.

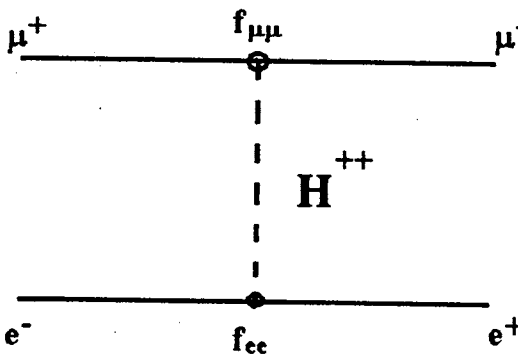


Рис.1. Переход $M \rightarrow \bar{M}$ в модели с майорановским нейтрино

Впервые на возможность существования перехода $M \rightarrow \bar{M}$ указал Б.М.Понтекорво [6]. Детальный анализ процесса проведен в работе [7].

Экспериментальная ситуация по состоянию исследования конверсии $M \rightarrow \bar{M}$ на 1995 г. представлена в табл.1.

Как видно из табл.1, лучшие на сегодня экспериментальные результаты по поиску перехода $M \rightarrow \bar{M}$ получены в эксперименте ПИЯФ — ОИЯИ [10,11,13].

Кратко изложим пути реализации этого проекта.

В ПИЯФ предложен и реализован новый прямой и независимый метод исследования конверсии мюония в антимюоний

*Здесь и далее мы опускаем прилагательное «гипотетическое».

Таблица 1. Результаты экспериментального исследования перехода $M \rightarrow \bar{M}$
(публикации 90-х годов)

Эксперимент		Метод исследования	$G_{M\bar{M}}$
TRIUMF [8]	1990	$\beta + \gamma$ от реакции $\mu^- + {}^{184}\text{W} \rightarrow {}^{184}\text{Ta} \rightarrow {}^{184}\text{W}$	$< 0,29 G_F$
LAMPF [9]	1991	e^- от распада μ^- и атомный e^+	$< 0,16 G_F$
ПИЯФ — ОИЯИ [10]	1992	e^- от распада μ^- $44 \leq E_e \leq 53$ МэВ	$< 0,38 G_F$
ПИЯФ — ОИЯИ [11]	1993)	e^- от распада μ^- $46,5 \leq E_e \leq 53$ МэВ	$< 0,13 G_F$
LAMPF [12]	1993	L_α и K_α — X-лучи мезоатома Bi	$< 6,9 G_F$
ПИЯФ — ОИЯИ [11]	1994 **)	e^- от распада μ^- $46,5 \leq E_e \leq 53$ МэВ	$\leq 0,14 G_F$

) — предварительные результаты; **) — наблюдено 1 событие.

($M \rightarrow \bar{M}$) и создана необходимая для эксперимента аппаратура [14,15]. В 1989—1990 гг. на мюонном канале синхроциклотрона ПИЯФ осуществлена настройка новой аппаратуры, проведены исследования фоновый условий в предполагаемой постановке эксперимента.

Постановка эксперимента по поиску конверсии $M \rightarrow \bar{M}$ и измерение вероятности этого процесса осуществлены объединенной группой ПИЯФ — ОИЯИ на пучке «поверхностных» мюонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ [16].

Первый цикл физических исследований на фазотроне ЛЯП ОИЯИ был проведен в мае — июне 1991 г. Сделано следующее: 1) исследованы параметры пучка «поверхностных» мюонов; 2) изучен вклад фоновый процессов в реальных условиях эксперимента; 3) исследована вероятность выхода мюония из порошка SiO_2 в вакуум; 4) проведена первая серия физических измерений процесса конверсии и получена первая оценка на величины $W_{M\bar{M}}$ и $G_{M\bar{M}}$ [10]: $W_{M\bar{M}} \leq 3,6 \times 10^{-6}$, $G_{M\bar{M}} \leq 0,38 \times G_F$ (90% CL).

Результаты этих исследований показали, что, несмотря на то, что полученный физический результат для вероятности процесса конверсии сравним с результатами, полученными ранее на мезонных фабриках, существовавшая тогда интенсивность пучка «поверхностных» мюонов ($\sim 1,8 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$ при токе протонов 2 мкА), геометрические и временные параметры аппаратуры были явно недостаточны для получения экспериментальных данных, превышающих мировой уровень.

К концу 1991 года в ПИЯФ и ОИЯИ были завершены работы по модернизации существующей аппаратуры и тракта пучка «поверхностных» мюонов. Были увеличены угол захвата спектрометра и быстродействие системы считывания информации с пропорциональных камер. Почти в три раза увеличена интенсивность пучка «поверхностных» мюонов за счет замены квадрупольных линз на соленоидальные линзы, разработанные и изготовленные в ЛЯП ОИЯИ специально для настоящего эксперимента. Основные параметры пучка [17]: импульс — 21,5 МэВ/с, $\Delta P/P \approx 7,7\%$, интенсивность

(при токе протонов 2,0 мкА) $I_{\mu} = 4,8 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$, примесь позитронов в пучке $N_{e^+}/N_{\mu^+} \approx 2$, размер пучка (ширина на полувысоте) — $7 \times 8 \text{ см}^2$, скважность пучка — 75%.

В 1991 — 1992 гг. на фазотроне ЛЯП ОИЯИ были проведены две новые серии физических измерений конверсии $M \rightarrow \bar{M}$. Результаты этих исследований и их сравнение с данными, полученными ранее другими авторами, представлены в табл.1.

Схема экспериментальной установки, экспериментальные спектры и способ анализа экспериментальных данных приведены в работах [11,13]. Зарегистрировано одно событие, удовлетворяющее критериям отбора для случая процесса конверсии $M \rightarrow \bar{M}$.

В настоящее время полностью завершена обработка и анализ экспериментальных данных. В данной статье рассмотрены критерии отбора физических событий, приведен конечный результат исследования вероятности процесса конверсии $M \rightarrow \bar{M}$, дается оценка параметров, характеризующих исследуемый процесс в рамках существующих модельных представлений.

Напомним, что используемая в эксперименте ПИЯФ — ОИЯИ методика исследования процесса конверсии основана на регистрации высокоэнергетичных электронов от распада мюона антимюония с помощью широкоугольного магнитного спектрометра, а для разделения физических и фоновых событий используется сравнительный анализ всех доступных для измерения параметров (пространственных, амплитудных, временных) «полезных» событий при регистрации спектрометром позитронов от распада мюония и электронов от распада антимюония и параметров, получаемых при последующей обработке событий (см. табл.2).

Когда спектрометр настроен на регистрацию e^+ от распада μ^+ , подавляющее число регистрируемых событий физические, что дает возможность определить основные параметры упомянутых выше распределений (средние значения и дисперсии). Полученные значения этих параметров и коридор их изменений в дальнейшем используется для режекции «нефизических» событий при регистрации e^- от распада μ^- , когда основная часть регистрируемых событий фоновая.

На рис.2 показано для примера, как меняются экспериментальные распределения для отдельных измеряемых либо получаемых в процессе обработки параметров событий для регистрируемых спектрометром электронов при наложении на них ограничений, полученных из аналогичных распределений для позитронов.

Полный перечень параметров и коридоры их возможных значений представлены в табл.2. Там же даны значения параметров для зарегистрированного в эксперименте события, которое можно отнести к конверсии мюония в антимюоний.

В табл.3 суммируются результаты всех серий эксперимента ПИЯФ — ОИЯИ.

На основании экспериментальных данных настоящих исследований и выражения (1), следующего из теоретической модели перехода $M \rightarrow \bar{M}$ с майорановским нейтрино, полагая, что константы f_{ee} и $f_{\mu\mu}^*$ — того же порядка, что и g_w , можно получить оценку на массу дважды заряженного хиггсовского бозона H^{++} , ответственного за процесс конверсии $M \rightarrow \bar{M}$: $M_{++} \geq 210 \text{ ГэВ}/c^2$.

В ПИЯФ и ОИЯИ завершается подготовка к новой серии измерений процесса конверсии $M \rightarrow \bar{M}$. Эксперимент будет проводиться в отсутствие в области мишени внешних магнитных и электрических полей. Будут существенно улучшены геометрические и временные параметры установки. Планируется получить более низкие ограничения

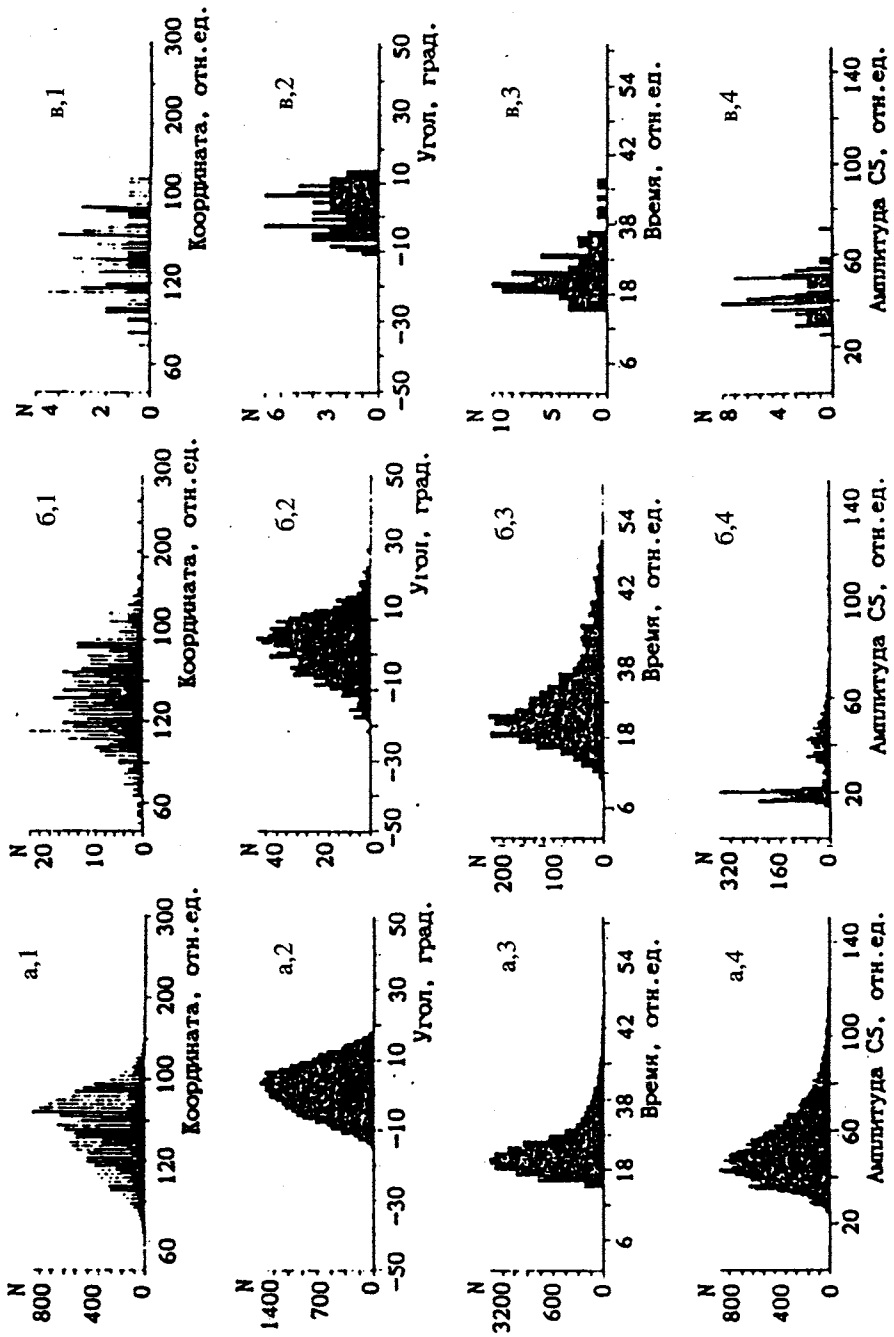
Таблица 2. Параметры, используемые для отбора физических событий*

Тип	Параметр	мин.	макс.	Событие	Параметр	мин.	макс.	Событие
I	X1	210	1130	516	Z1	240	850	796
	X2	40	1520	476	Z2	20	1100	884
	X3	60	1130	700	Z3	180	1320	988
	X4	30	1340	972	Z4	40	1380	996
	$\Delta T1$	110	500	190	$\Delta T2$	140	500	220
	$\Delta T3$	180	400	260				
	A1	25	120	41	A2	25	150	69
	A3	50	550	551	A4	50	550	349
II	Угол X-12	-13	18	3	угол Z-12	-5	8	3
	Угол T-12	-16	20	3	угол N-12	-13	10	-1
	Угол X-34	131	177	161	угол Z-34	-13	11	-1
	Угол R	80	150	104				
	Мишень X	-85	65	5	мишень Z	-35	32	31
	Мишень T	-90	80	-7	мишень N	-20	42	31
	Радиус F	0	80	36	радиус S	0	68	47
III	Качество	1	2	1	энергия	46.5	53	48.6
	ΔXY	-34	45	11	ΔZ	-60	45	9
	Нормаль	85	95	90	$\Delta \beta_z$	-8	9	2
	Расчет X	-80	66	9	расчет Z	-35	32	31
	Расчет T	-85	79	-3	расчет N	-60	60	33
	Расчет F	0	80	36	расчет S	0	68	47
	Центр	-30	22	-7	сектор	114	130	125
	Длина	103	154	115	полюс Z	0	125	67

I — параметры, измеряемые в процессе эксперимента: X1 — X4, Z1 — Z4 — координаты в 8 плоскостях ПК (коды ПВК), $\Delta T1$ — $\Delta T3$ — разности времен прихода строб-сигналов сцинтилляционного счетчика и катодов трех ПК (коды ПВК), A1 — A2 — амплитуды сигналов сцинтилляционных счетчиков спектрометра (коды ПЗК), A3 — A4 — амплитуды сигналов с катодных предусилителей ПК (коды ПЗК), ПК — пропорциональные камеры, ПВК — преобразователь время — код, ПЗК — преобразователь заряд — код.

II — параметры, измеряемые в процессе эксперимента (режим on-line): угол X-12 — угол Z-34 — угловые характеристики события (градусы); Угол R — угол отклонения частицы в спектрометре (градусы); мишень X — мишень N — характеристика точки, где произошел распад мюона (мм); радиус F — радиус S — расположение траектории электрона относительно центра внешних коллиматоров установки (мм).

III — параметры, измеряемые в процессе последующей обработки событий (режим of-line): качество — характеристика событий (1 — траектория электрона в спектрометре находится вдали от его полюсов, 2 — вблизи полюсов). Энергия — энергия электрона (МэВ); ΔXY , ΔZ , нормаль, $\Delta \beta_z$ — параметры обработки (подробнее см. [11]); расчет X — расчет S — параметры начальной траектории события при инверсной обработке (расчетная траектория в обратном направлении); центр — полюс Z — характер расположения траектории электрона относительно геометрии спектрометра.



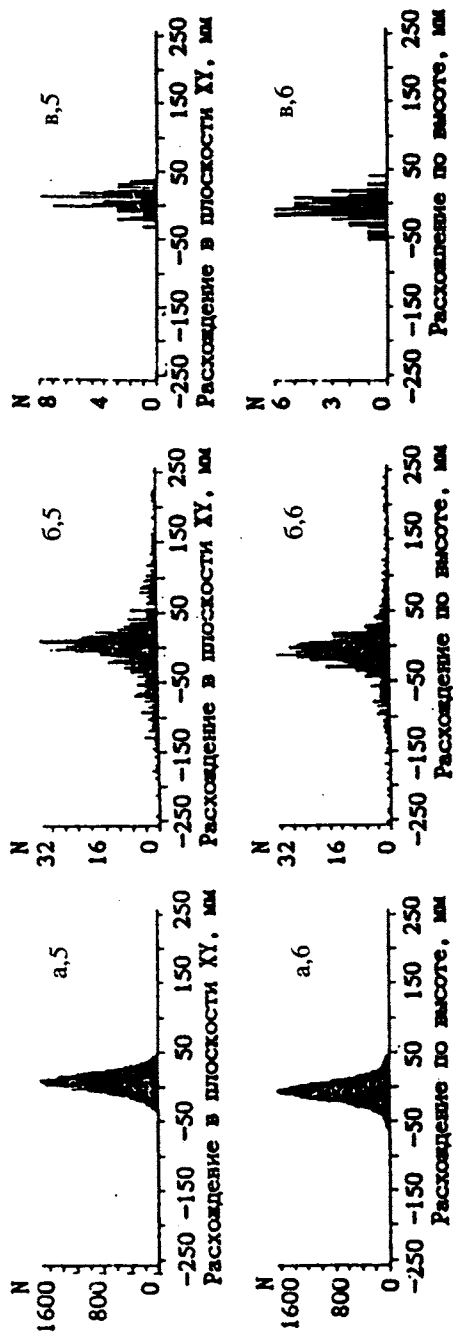


Рис.2. Распределение регистрируемых спектрометром позитронов (а) и электронов (б) — исходный спектр, в — спектр после введения ограничений на допустимую область изменения параметра: 1 — по координате Z в пропорциональной камере ПК1, 2 — по углу вылета относительно плоскости SiO₂-мишени, 3 — по времени прохождения частиц от пропорциональной камеры ПК2 до сцинтилляционного счетчика C₅, 4 — по амплитуде сигнала со сцинтилляционного счетчика C₆, 5 — по параметру ΔXY — расхождения траекторий в плоскости XY, 6 — по параметру ΔZ — расхождения траекторий по высоте

Таблица 3. Результаты экспериментального исследования процесса конверсии $M \rightarrow \bar{M}$ в эксперименте ПИЯФ — ОИЯИ

Серия	N_μ	$W(\Delta E)$	W_M	$N_{M\bar{M}}$	$W_{M\bar{M}}$	$G_{M\bar{M}}$
I [10]	$4,5 \cdot 10^{10}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	0,027	0	$< 3,6 \cdot 10^{-6}$	$< 0,38 G_F$
II + III [13]	$3,44 \cdot 10^{11}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	0,029	1	$\leq 5,1 \cdot 10^{-7}$	$\leq 0,14 G_F$
I + II + III	$3,89 \cdot 10^{11}$			1	$\leq 4,7 \cdot 10^{-7}$	$\leq 0,14 G_F$

N_μ — полное число мюонов, прошедших через мишень; $W(\Delta E)$ — вероятность регистрации электрона с энергией в интервале ΔE спектрометром [15]; W_M — используемое значение для вероятности выхода мюония из порошка SiO_2 в вакуум [15]; $N_{M\bar{M}}$ — число зарегистрированных событий; $W_{M\bar{M}}$ — измеренное значение вероятности процесса конверсии $M \rightarrow \bar{M}$; $G_{M\bar{M}}$ — измеренная верхняя граница константы связи в этом

(примерно на порядок) на вероятность конверсии $M \rightarrow \bar{M}$ либо обнаружить около 10 таких событий, если такой процесс в природе действительно существует. Исследования проводятся в рамках Государственной научно-технической программы России «Фундаментальная ядерная физика» (проект 1.3.5-12) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 95-02-03780-а, 95-02-07498-б).

Литература

- Glashow S.L. — Nucl. Phys., 1961, 22, p.579;
Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., 1967, 19, p.1264; 1968, 27, p.1688.
- Higgs P.W. — Phys. Lett., 1964, 12, p.132;
Higgs P.W. — Phys. Lett., 1964, 13, p.508.
- Schwinger J. — Ann. Phys. (N.Y.), 1957, 2, p.407;
Nishijima K. — Phys. Rev., 1957, 108, p.907.
- Feinberg G., Weinberg S. — Phys. Rev. Lett., 1961, 6, p.381.
- Halprin A. — Phys. Rev. Lett., 1982, 49, p.1373.
- Понтекорво Б. — ЖЭТФ, 1957, 33, с.549.
- Feinberg G., Weinberg S. — Phys. Rev., 1961, 123, p.1439.
- Huber T.M., Kunselman A.R., Janissen et al. — Phys. Rev., 1990, 41D, p.2709.
- Matthias В.Е., Ahn Н.Е., Badertscher A. et al. — Phys. Rev. Lett., 1991, 66, p.2716.
- Алешин Н.П., Абазов В.М., Баранов В.А. и др. — В сб.: Основные результаты научных исследований 1990—1991 гг. ЛИЯФ. С.-Петербург, ЛИЯФ, 1992, с.43.
- Гордеев В.А., Савченко О.В., Абазов В.М. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1993, 57, с.262.
- Ni В., Arnold K.P., Chemely F. et al. — Phys. Rev., 1993, 48D, p.1976.
- Гордеев В.А., Киселев А.Ю., Абазов В.М. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1994, 59, с.565.
- Drukarev E.G., Gordeev V.A., Mikhailov A.I. — Preprint LHPI-1317, Гатчина, 1987.
- Гордеев В.А., Друкарев Е.Г., Киселев А.Ю. и др. — Препринт ПИЯФ-1970, Гатчина, 1994.
- Абазов В.М., Брагин А.Н., Густов С.А. и др. — Сообщения ОИЯИ 9-90-289, Дубна, 1990.
- Абазов В.М., Брагин А.Н., Густов С.А. и др. — Сообщения ОИЯИ 9-93-81, Дубна, 1993.

Работа поступила 25 июня 1996 года.