#### Семинар:

Измерение массы электронного антинейтрино в бетараспаде трития в эксперименте «Троицк ню-масс»

Пантуев В.С. Нозик А. А.

#### Представление к защите кандидатской диссертации аспиранта:

Нозик А. А.

Результаты обработки данных эксперимента «Троицк ню-масс» по прямому измерению массы электронного нейтрино

Научный руководитель В. М. Лобашев



Идея – измерять не массу, а форму спектра электронов вблизи максимальной энергии

2

### Существующие эксперименты

Согласно Particle Data Group (pdg.lbl.gov):

< 2.3 95 KRAUS 05 SPEC 3H  $\beta$  decay < 2.5 95 LOBASHEV 99 SPEC 3H  $\beta$  decay

Окончательная оценка эксперимента в Майнце:

$$m_v^2 = -0.6 \pm 2.1_{syst} \pm 2.2_{stat}$$
  
 $m_v^2 = -0.6 \pm 3.04 \ B^2$ 

KRAUS 05 is a continuation of the work reported in WEINHEIMER 99. This result represents the final analysis of data taken from 1997 to 2001. Various sources of systematic uncertainties have been identified and quantified. The background has been reduced compared to the initial running period. A spectral anomaly at the endpoint, reported in LOBASHEV 99, was not observed.

LOBASHEV 99 report a new measurement which continues the work reported in BELESEV 95. This limit depends on phenomenological fit parameters used to derive their best fit to m2v, making unambiguous interpretation difficult. See the footnote under "v Mass Squared."



3

### Описание спектра электронов



состояний.

Долгий путь от экспериментальных данных до физического результата: поправки, оценки, поправки...

- фон
- «Пачки» аномально короткие по времени «набросы» в спектр
- мертвое время электроники
- наложение импульсов
- эффективность при вырезании окна в амплитудном спектре
- учет сдвига положения пика с уменьшением энергии электрона
- в течение набора: поправка высокого напряжения в случае ухода от заданной точки, проводится постоянно

#### ...поправки, оценки...

- Отдача ядра
- Тепловые эффекты, эффект Доплера
- Спектр конечных состояний
- Спектр потерь, (кратное) рассеяние в источнике
- Измерение полной толщины/вещества газового источника
- Объемный заряд в источнике
- Трэппинг эффект электронов в источнике
- Профиль распределения трития в источнике
- «Накрутка» электронов на магнитную силовую линию
- Сложение файлов, полученных при разных плотностях трития
- Функция разрешения/пропускания спектрометра
- Нестабильность высокого напряжения
- Форма аналитического продолжения в нефизическую область отрицательного квадрата массы
- Проверка неадиабатичности для электронов с существенно меньшей энергией, чем предельная энергия спектра

6

- Обратное рассеяние электронов в спектрометре
- Погрешность определения изотопного состава газа в источнике
- Учет Пуассоновского распределения счета событий

# Описание реального спектра



7

### Спектр электронов

Спектр электронов в бета-распаде (без учета аппаратных функций):

$$N(E, E_0, m_v^2) dE = KF(Z, E)(E+m_e) p(E_0-E)^2 \sqrt{1 - \frac{m_v^2}{(E_0-E)^2}} dE$$

Учет спектра конечных состояний:

$$S(E, E_0, m_v^2) = \sum_i N(E, E_0 - E_i, m_v^2) P_i$$

Спектр конечных состояний

Малые поправки:

Тепловые эффекты < 2\*10<sup>-3</sup> эВ.
Отдача ядра около 2 эВ, но при

исследуемых энергиях варьируется в пределах 10<sup>-2</sup> эВ.



S. Jonsell and H. J. Monkhorst, «Effects from Changes in the Final State Spectrum on the Neutrino Mass Determination from T2 Beta Decay Experiments», Phys. Rev. Lett. 76, 4476, 1996.

# Продолжение спектра в нефизическую область

Способ продолжения функции в область отрицательных квадратов масс может влиять на оценку.



#### Потери энергии в газе

Дифференциальное сечение неупругого рассеяния:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma_{tot} f(\epsilon), \epsilon = E_i - E_f$$

Форма спектра потерь при однократном неупругом рассеянии исследована в [\*]. Полная функция прохождения через тритиевый источник выражается следующим образом:

 $Tr(\varepsilon) = P_0 \delta(\varepsilon) + P_1 f(\varepsilon) + P_2 f_2(\varepsilon) + P_3 f_3(\varepsilon) + trap(\varepsilon)$ К вероятностям мы еще вернемся

Спектры потерь при кратных неупругих рассеяниях

Спектр потерь запертых в источнике электронов





\* - V. N. Aseev *et al.*, «Energy loss of 18 keV electrons in gaseous T2 and quench condensed D2 films», Eur.Phys. J. D10, 39, 2000.

#### Разрешение/пропускание спектрометра



### Вероятности рассеяния

Вероятности неупругого рассеяния:

$$P_{k} = \frac{X^{k} e^{-X}}{k!}, \quad X = \int_{0}^{L} \frac{dl}{\lambda(l)} = \int_{0}^{L} \sigma_{tot} n(l) dl$$

После усреднения по длине тритиевого источника (Х<sub>0</sub> — полная толщина):

$$\langle P_0 \rangle = \frac{1}{X_0} (1 - e^{-X_0})$$
  
$$\langle P_1 \rangle = \frac{1}{X_0} (2 - e^{-X_0}) - e^{-X_0}$$
  
$$\langle P_2 \rangle = \frac{1}{2X_0} (2 - e^{-X_0} (X_0^2 + 2X_0 + 2))$$
  
$$P_3 \rangle = \frac{1}{6X_0} (6 - e^{-X_0} (X_0^3 + 3X_0^2 + 6X_0 + 6))$$

После усреднения по углу вылета в результате «наматывания» (формулы получены методом линейной экстраполяции математической модели):

 $P_{0} = \langle P_{0} \rangle (0.9996 - 0.0398X_{0})$   $P_{1} = \langle P_{1} \rangle (1.0854 - 0.0460X_{0})$   $P_{2} = \langle P_{2} \rangle (1.1595 - 0.0567X_{0})$  $P_{3} = \langle P_{3} \rangle (1.2398 - 0.0682X_{0})$ 

#### Определение толщины источника

Прямое определение толщины источника с нужной точностью во время измерений с тритием невозможно. Для косвенного определения толщины используются следующие факты:

• Полная толщина источника прямо пропорциональна концентрации газа.

• Концентрация газа прямо пропорциональна суммарному количеству атомов водорода и трития.

• Скорость счета бета-электронов прямо пропорциональна количеству атомов трития в источнике (при фиксированных полях и положении детектора).

 Соотношение между количеством атомов трития и полным количеством атомов определяется показаниями масс-спектрометра.

Таким образом получается следующее соотношение:

$$X_0 = A \frac{N_{mon}}{Tr}$$

N<sub>mon</sub> – скорость счета в мониторной точке (18000 В)

Tr – относительная атомарная концентрация трития

А – коэффициент пропорциональности (требует экспериментальной калибровки)

# Калибровка с использование электронной пушки

Позволяет исследовать параметры установки моноэнергетическими электронами. В частности можно исследовать форму функции пропускания спектрометра, форму функции потерь в газе и вероятности неупругих потерь.



# Экспериментальное определение толщины источника



N<sub>mon</sub> – счет в мониторной точке (18000),

Tr — атомарная доля трития в газе, А — коэффициент пересчета. Вариация коэффициента А составляет от 4.0 до 5.25\*10<sup>-4</sup>.

15

# Методика обработки

# Применение метода квазиоптимальных весов

При обработке в качестве основного использовался метод квазиоптимальных весов, разработанный Ф. В. Ткачевым.

Достоинства метода:

- Оценка удовлетворяет всем требованиям (состоятельность, несмещенность).
- Эффективность на уровне теоретического предела (граница Рао-Краммера).
- Не требует обращения матрицы вторых производных правдоподобия (позволяет работать с сильно кореллированными величинами).
- Имеет дополнительный внутренний критерий оптимальности фита.



mnu2

Сравнение метода максимума правдоподобия и метода КОВ :



mnu2

## Определение систематических ошибок

Для определения систематической ошибки проводилась следующая процедура:

- 1. Проводится фит бета-спектра со средним значением толщины. Получается оценка квадрата массы нейтрино.
- 2. Проводится фит со значением толщины, отличающимся от среднего на одну ошибку (3%). Получается сдвинутая оценка квадрата массы.
- Разница принимается за систематическую ошибку, связанную с определением эффективной толщины.
- 4. Аналогичным образом учитывается влияние трэппинг-эффекта.

#### Эффекты, дающие вклад в систематическую ошибку:

- Погрешность в определении эффективной толщины (вероятностей неупругого рассеяния).
   Погрешность в определении X в 3% дает погрешность квадрата массы нейтрино в 1.1 2 эВ<sup>2</sup>.
   Для определения ошибок проводился полный фит при разных значениях X в каждом сеансе.
- 2. Неопределенность спектра конечных состояний 0.7 эВ<sup>2</sup>.
- Неопределенность в параметрах "трэппинг эффекта" 20% от величины эффекта. Ошибка квадрата массы 0.3-0.5 эВ<sup>2</sup>. Ошибка оценивалась отдельно для каждого сеанса.
- 4. Нестабильность напряжения на электроде (0.2 B) 0.08 эВ<sup>2</sup>.

# Отбор данных

При обработке данных не использовались слишком короткие сеансы, а также сеансы с неточными данными по толщине источника или те, в которых отсутствует калибровка с помощью электронной пушки.

С 18 по 21 сеанса – Не использовались. Отсутствует калибровка толщины.

- 22 (июнь 1997) использовался.
- 23 использовался.
- 24 исполись два набора данных с разными полями.
- 25 использовался.
- 26 не использовался. Короткий сеанс.
- 27 не использовался. Короткий сеанс
- 28 частично использовался. Часть сеанса проведена с паладиевым детектором.
- 29 использовался.
- 30 использовался.
- 31 использовался.
- 32 нет данных
- 33 использовал
- 34 не использовался. Плохие данных калибровки электронной пушкой.
- 35 нет данных
- 36 использовался.

# Результаты по сеансам

Сеанс	Дата	${m_v}^2$	σ <sub>stat</sub>	σχ	σ <sub>trap</sub>	σ <sub>syst</sub>
22	06.1997	-7.55	9.89	1.1	0.34	1.34
23	12.1997	2.53	4.57	1.31	0.352	1.52
24, первая часть	01.1998	-1.31	4.32	1.35	0.318	1.55
24, вторая часть	02.1998	-5.44	4.98	1.48	0.342	1.67
25	06.1998	-0.11	7.35	1.57	0.378	1.76
28	05.1999	2.60	6.99	1.82	0.4	1.99
29	10.1999	-0.51	7.50	1.94	0.416	2.10
30	12.1999	3.14	8.31	2.04	0.434	2.19
31	12.2000	-8.06	6.99	1.45	0.38	1.65
33	06.2001	7.21	8.82	1.47	0.504	1.70
36	04.2002	1.91	6.72	1.37	0.322	1.57

## Результаты по сеансам



Оценки квадрата массы по сеансам с полными ошибками (статистика+систематика)

# Суммарный результат

Использование средневзвешенной (с весами обратно пропорциональными квадрату статистической ошибки) оценки дает:

$$m_{\nu}^{2} = -0.67 \pm 1.89_{stat} \pm 1.68_{syst} \Im B^{2}$$
  
 $m_{\nu}^{2} = -0.67 \pm 2.53 \Im B^{2}$ 

*m*<sub>v</sub><2.2 эВ 95% С.L. Пределчувствительности *m*<sub>v</sub><2.12 эВ 95% С.L. Метод Байеса *m*<sub>v</sub><2.05 эВ 95% С.L. Метод Фельдмана и Коузинса

Для сравнения, результаты за вычетом «ступеньки» (\*):

 $m_{\rm v}^2 = -2.3 \pm 2.5_{stat} \pm 2.0_{syst} \, \Im B^2$ 

*m*<sub>v</sub><2.5 эВ 95% С.L. Пределчувствительности *m*<sub>v</sub><2.21 эВ 95% С.L. Метод Байеса *m*<sub>v</sub><2.05 эВ 95% С.L. Метод Фельдмана и Коузинса

(\*) - V.M.Lobashev. «The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN», Nucl. Phys. A719, 153c-160c, 2003.

### Проверка результатов

Проверка адекватности результатов обработки проводилась сразу несколькими способами:

- 1. Внутренний критерий качества фита (невязка при решении системы уравнений) дает удовлетворительный результат.
- 2. Критерий Пирсона (χ<sup>2</sup>) дает удовлетворительный результат. χ<sup>2</sup> на степень свободы от 0.7 до 1.5.
- Специально для полной проверки была независимо создана программа, использующая в качестве фитирующего алгоритма пакет JMINUIT (реализация MINUIT 2 для языка программирования JAVA). Выборочная проверка показала согласие результатов в пределах погрешностей, обусловленных особенностями вычисления спектра (не более 0.5 эВ<sup>2</sup>).

## Будущее тритиевых экспериментов

Приведенный результат показывает эффективность разработанных методик для обработки данных, полученных при использовании безоконного газообразного тритиевого источника. Это в свою очередь открывает большие перспективы для будущих проектов, в частности эксперимента КАTRIN (Карлсруэ, Германия).



# «Ступенька»

### «Троицкая аномалия»



Разброс экспериментальных точек относительно фитирующей кривой. На взгляд – структуры нет.

Ещё тесты:

#### Допускаем наличие «ступеньки» в спектрах, делаем обработку с 2-мя дополнительными параметрами на ее положение и амплитуду

Точки по сеансам разные, в новой обработке часть была отброшена



Положение «ступеньки» в старом и новом анализах. Ошибки точек порядка 1.5 эВ и не показаны. Кривая – фит по старым точкам с периодом 0.5 года



Амплитуда «ступеньки»

«Прогон» спектров в новой обработке со старой величиной толщины источника – воспроизведется ли «ступенька»?

#### P.S. Большая величина для отрицательного квадрата массы безусловно может быть описана дополнительной структурой на конце спектра, которая «загибает» конец спектра вправо.

Взято 2 произвольных сеанса, толщина источника «руками» установлена на старое значение

Полож.	ступеньки от кон	ца сп-ра, эВ Амплитуда, мГц	
сеанс 23			
старое	17.39	5.24 +/- 1.64	
новое	17.31	6.0 +/- 1.3	
сеанс 25			
старое	15.0	4.01 +/- 1.12	
новое	15.05	3.2 +/- 0.9	

«Ступенька» восстановилась

#### На защиту выносятся следующие положения:

- 1. Выполнено описание физического спектра электронов, получаемых на установке с безоконным газовым тритиевым источником и электростатическим спектрометром
- Разработаны методы учета эффектов потерь энергии электронами в газообразном тритии, запирания электронов в магнитной ловушке тритиевого источника и увеличения длины пробега электронов в магнитном поле.
- 3. Получена оценка квадрата массы электронного антинейтрино:  $m_v^2 = -0.67 \pm 1.89_{stat} \pm 1.68_{syst}$ .
- 4. Произведена оценка влияния систематических погрешностей на оценку массы нейтрино.
- 5. Выполнен критический анализ использования безоконного газового тритиевого источника для дальнейших экспериментов по прямому измерению массы нейтрино.

#### Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1. Получено лучшее ограничение на массу электронного антинейтрино.
- 2. Впервые в обработке данных физического эксперимента использован метод квазиоптимальных весов (разработанный Ф. В. Ткачевым), проведен его сравнительный анализ с широко используемыми методами.

#### Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в пяти работах:

- 1. А. А. Нозик, А. К. Скасырская, Моделирование спектра и обработка результатов эксперимента «Троицк ню-масс», препринт ИЯИ РАН 1224/2009
- 2. А. А. Нозик, Ф. В. Ткачев, Применение метода квазиоптимальных весов для обработки данных эксперимента, препринт ИЯИ РАН 1241/2009
- 3. А. И. Белесев и др. "Исследование эффектов объёмного заряда в газообразном тритии как источника искажения бета-спектра в эксперименте по поиску массы нейтрино «Троицк ню-масс»", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2008, том 71, №3, с. 449–459.
- А.А. Нозик, «Измерение массы нейтрино: текущая ситуация и перспективы», ТРУДЫ 51-й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VIII. Проблемы современной физики. М.:МФТИ, 2008.
- А.А. Нозик, «Применение метода квазиоптимальных весов к физическим задачам», ТРУДЫ 52-й НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VIII. Проблемы современной физики. М.:МФТИ, 2009.
- 6. В. Н. Асеев и др. «Измерение массы электронного антинейтрино в бетараспаде трития в эксперименте «Троицк ню-масс»», препринт ИЯИ РАН, в печати.

#### Дополнительный материал





# Метод КОВ

Пусть  $\phi(X) - \phi$ ункция измеряемой величины X. Тогда мы можем посчитать матожидание (среднее по распределению) этой величины.

$$\mathbf{E}^{\theta} [\varphi] = \int dX f(X | \theta) \varphi(X) = h(\theta), \quad \mathbf{D}^{\theta} [\varphi] = \int dX f(X | \theta) [\varphi(X) - h(\theta)]^2$$
$$\langle \varphi \rangle_{\exp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \varphi(X_i)$$

Приравнивая эти две величины, мы получаем уравнение для определения оценки θ.





Figure 1. Part of the tritium spectrum (a) and Curie-plot (b) near the end point.

Paper presented at XXVII Int. Conf. on High Energy Physics: Session Pa-13 Glasgow, UK, 20–27 July 1994