

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.163

И-689

6-86-726

ИНОЯТОВ

Анвар Хидоятович

**НОВЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ БЕТА-СПЕКТРОМЕТР
И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ
В ЗАДАЧАХ ПРЕЦИЗИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1986

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель
доктор физико-математических наук Ц. Вылов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук А. И. Феоктистов
кандидат физико-математических наук М. И. Бабенков

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт
атомной энергии им. И. В. Курчатова, Москва.

Защита диссертации состоится "26" ноября 1986 г.
в _____ час. на заседании Специализированного совета
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного инсти-
тута ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан " " декабрь 1986 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Прецизионная спектроскопия низкоэнергетических электронов играет важную роль в решении многих задач современной физики. Одной из актуальнейших задач является проблема ненулевой массы (анти)нейтрино. Считают, что наиболее чувствительным методом измерения массы электронного антинейтрино ($m_{\bar{\nu}}$) является исследование формы бета-спектра трития в области граничной энергии ($\sim 18,6$ кэВ). Именно этим методом в экспериментах ИТЭФ (Козик В.С. и др. ЯЭ, 1980, т.32, с.301) впервые было получено указание на наличие массы у антинейтрино

$$14 \text{ эВ} < m_{\bar{\nu}} c^2 < 46 \text{ эВ} .$$

Однако вывод о величине массы антинейтрино основывается на нескольких предположениях, главным из которых является возможность точного определения приборной формы линии (ПФЛ) системы источник-спектрометр. В свою очередь, точность определения ПФЛ прямым образом связана с учетом формы калибровочных линий, в качестве которых обычно используют линии электронов внутренней конверсии (ЭК) или Оже-электронов. В частности, неучет лишь естественной ширины (Γ) калибровочных линий может привести к генерации массы антинейтрино при истинном нулевом значении (В.Н.Покровский и др. ОИЯИ, Р6-85-405, 1985).

В экспериментах ИТЭФ (а позже и других групп - SIN (Швейцария) и INS (Япония)) в качестве калибровочных линий использовались M_1 - и L_1 -конверсионные линии перехода 20,7 кэВ из распада ^{169}Yb . Однако до настоящего времени прямых экспериментальных данных по величинам $\Gamma(M_1, L_1)$ из распада ^{169}Yb в литературе не опубликовано.

Другим подходом к определению ПФЛ является использование линий К-серии Оже-электронов элементов с меньшими Z . В частности, группа INS использует линии KLL-Оже-переходов из распада ^{109}Cd . Точность определения ПФЛ при этом подходе зависит от правильной оценки соотношения интенсивностей между компонентами Оже-переходов. К сожалению, экспериментальные данные об энергиях и интенсивностях Оже-переходов, а также их ширинах в этой области Z весьма немногочисленны. Добавим также, что отсутствие таких данных (в частности, по KLM- и KMM-пере-

ходам в атомах с $Z < 35$) не позволяет делать однозначные выводы о применимости теоретических приближений, используемых для описания Оже-переходов.

Решение этих задач связано с разработкой техники и методики прецизионной спектрометрии электронов в области энергии ниже 50 кэВ.

Цель работы. Создание комбинированного электростатического бета-спектрометра для исследования электронов в области энергий 0,5–50 кэВ. Исследование относительной эффективности детектора электронов (канальный электронный умножитель) спектрометра и оптимизация режима его работы.

Усовершенствование методики приготовления радиоактивных источников электронов испарением в вакууме.

Прецизионные измерения естественных ширин атомных уровней тулия с помощью низкоэнергетических ЭВК из распада ^{169}Yb .

Исследование К-серии Оже-электронов железа из распада ^{57}Co .

Анализ результатов измерений и сравнение их с предсказаниями теорий.

Метод исследования и научная новизна результатов. Для исследования спектров электронов в области энергий 0,5–50 кэВ создан новый тип комбинированного электростатического спектрометра. В этом спектрометре впервые для задач ядерной физики объединены интегральный анализатор со сферическим замедлителем и дифференциальный анализатор типа двойного цилиндрического зеркала. Использование такой комбинации анализаторов позволило исключить отрицательное влияние релятивистских эффектов, возникающих при больших энергиях анализируемых электронов, на характеристики спектрометра. Достигнутое приборное разрешение $\Delta E = 5$ эВ (при $E_e \sim 20$ кэВ) является наилучшим для спектрометров, работающих в этой области энергий.

С целью оптимизации режима работы спектрометра изучена эффективность регистрации детектора электронов – канального электронного умножителя (КЭУ). Получена зависимость эффективности от энергии регистрируемых электронов в диапазоне 60–1000 эВ. Определен оптимальный режим работы КЭУ, при котором можно добиться увеличения отношения пик/фон примерно в 2 раза без заметного ухудшения аппаратурной формы линии.

Усовершенствована методика приготовления радиоактивных источников электронов методом испарения в вакууме.

Впервые проведены прямые измерения естественных ширин атомных уровней тулия с помощью низкоэнергетических ЭВК из распада ^{169}Yb , используемых в качестве калибровочных в экспериментах по определению массы антинейтрино из анализа формы бета-спектра трития.

Проведены исследования К-серии Оже-электронов железа ($Z = 26$) из распада ^{57}Co . Измерения интенсивностей и энергий КЛМ- и КММ-переходов проводились впервые. Из анализа результатов измерений относительных интенсивностей КЛМ-переходов впервые сделан вывод о неприменимости релятивистских расчетов, выполненных в рамках теории jj -связи, для описания интенсивностей этих переходов в области $Z \sim 25$.

Научная и практическая значимость работы. Созданный электростатический спектрометр и усовершенствованный метод приготовления источников испарением в вакууме позволяют проводить прецизионные измерения спектров электронов в малоизученной низкоэнергетической области энергий $E_e \leq 50$ кэВ.

Результаты измерений естественных ширин атомных уровней тулия с помощью линий ЭВК из распада ^{169}Yb , а также относительных интенсивностей К-серии Оже-электронов железа ($Z = 26$), возникающих при распаде ^{57}Co , представляют интерес с точки зрения точности оценки ПЭЛ в экспериментах с тритием. Кроме того, сведения об интенсивностях К-серии Оже-электронов железа расширяют базу данных для проверки существующих модельных расчетов и могут быть использованы (в особенности отношения интенсивностей Оже-групп) при определении выходов флуоресценции, вероятностей К-захвата и др.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Новый тип комбинированного электростатического бета-спектрометра в области энергии 0,5–50 кэВ.
2. Определение относительной эффективности канального электронного умножителя спектрометра и оптимизация режима его работы.
3. Усовершенствование метода приготовления радиоактивных источников электронов испарением в вакууме.
4. Результаты прямых измерений естественных ширин атомных уровней тулия с помощью ЭВК из распада ^{169}Yb .
5. Результаты измерений относительных интенсивностей и энергий спектров КЛМ-, КММ-, КММ-Оже-переходов в железе. Выводы из сравнения измеренных интенсивностей с предсказаниями теорий.

Апробация работ. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на XXIII (Москва, 1983), XXIV (Харьков, 1986) Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра; Школе по ядерной физике (Хольцау, ГДР, 1986); Международном симпозиуме "Бета-распад и нейтрино" (Осака, Япония, 1986); Международном симпозиуме по слабым и электромагнитным взаимодействиям в ядрах (Гайдельберг, ФРГ, 1986); XUP сессии Всесоюзной школы по ядерной физике им. В.М.Галицкого (МИФИ, 1986); Международной конференции по ядерной фи-

зике (Харрогейт, Англия, 1986); на семинарах по физике атомного ядра ЛЯП ОИЯИ, кафедры радиационной физики физического факультета ТашГУ им. В.И.Ленина и опубликованы в 5 работах в виде статей в журнале Nucl. Instr. and Meth., сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", а также в виде сообщений и препринтов ОИЯИ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения и содержит 132 страницы текста, 8 таблиц на 10 страницах, 52 рисунка на 35 страницах и списка литературы из 148 наименований на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цели работы и описывается структура диссертации.

В первой главе проведен обзор основных методов энергетического анализа в электронной спектроскопии.

Методы прецизионного анализа энергетического распределения электронов основаны на применении электростатической и магнитной оптики. В течение многих лет главным методом для анализа бета-частиц являлся магнитный анализ. За это время были разработаны различные конструкции магнитных спектрометров. Высокие разрешения ($< 0,1\%$) достигаются, в основном, в области больших энергий $E_e > 50$ кэВ. При энергиях электронов ниже 50 кэВ возникают значительные трудности, связанные с работой в области слабых магнитных полей.

В спектрометрах с железным ярмом, при $H < 25$ Э, форма поля начинает изменяться с изменением величины напряженности магнитного поля. К искажению приводит также и остаточная намагниченность железа. В случае безжелезных спектрометров необходима тщательная защита спектрометров от внешних магнитных полей и высокая стабильность источников питания катушек. Внешние поля должны быть скомпенсированы с помощью катушек Гельмгольца до уровня $\sim 10^{-4}$ Э (в зависимости от размеров спектрометра). При этом, однако, нужно учитывать главный недостаток катушек Гельмгольца - низкую эффективность в присутствии быстро меняющихся внешних полей.

Достижения в разработке электростатических спектрометров связаны с развитием электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА). Для исследований ЭСХА в области 1 эВ - 2 кэВ электростатические спектрометры обладают рядом преимуществ перед магнитными, а именно: простотой формирования расчетного поля и экранировки магнитных полей, меньшими габаритами и незначительными энергетическими затратами на питание источников напряжения.

При попытке расширить область анализа до 10-50 кэВ возникают трудности, связанные с отрицательным влиянием релятивистских эффектов на разрешение спектрометров. Для улучшения разрешения нужно использовать предварительное замедление анализируемых электронов, что позволяет существенно повысить возможности электростатических спектрометров для анализа спектров электронов с высоким разрешением в широком диапазоне энергий.

С точки зрения современной физики, одной из актуальнейших задач является вопрос о наличии массы у (анти)нейтрино. Считают, что наиболее чувствительным методом измерения массы антинейтрино является анализ формы бета-спектра трития вблизи граничной энергии ($\approx 18,6$ кэВ). При этом корректность решения задачи в значительной степени определяется точностью исследования КЭЛ системы источник-спектрометр. В свою очередь эта задача связана с методами прецизионной спектрометрии спектров дискретных излучений калибровочных нуклидов. Учитываемые оценки величины массы антинейтрино ($m_\nu c^2 \sim 10 \pm 30$ эВ), такие исследования должны быть проведены с приборами, обладающими высоким энергетическим разрешением (лучше 10 эВ) в области 20 кэВ. Это и является одной из первоочередных задач для решения проблемы наличия массы у электронного антинейтрино.

Вторая глава посвящена описанию нового комбинированного электростатического спектрометра для изучения электронов с энергией от 0,5 до 50 кэВ ^{1,2/}.

В этом спектрометре (рис.1) впервые для задач ядерной физики объединены два типа анализаторов: интегральный с тормозящим полем и диф-

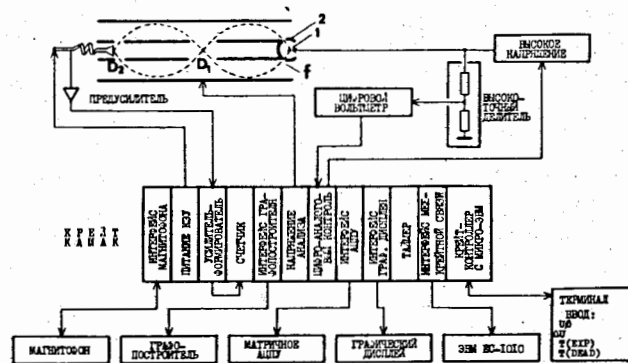


Рис.1. Блок-схема электростатического спектрометра.

ференциальный с двойным цилиндрическим зеркалом. Такой подход позволил исключить релятивистские эффекты, характерные для спектрометров с одним анализатором. Анализатор с тормозящим полем состоит из двух концентрических сфер 1 и 2, между которыми проложено положительное тормозящее напряжение U . Радиоактивный источник находится на поверхности сферы 1. Напряжение замедления приложено к источнику, а сфера 2 заземлена. Измерение энергии замедленных электронов проводится с помощью двойного цилиндрического зеркала. Напряжение анализа u приложено к внешнему цилиндру, а внутренний заземлен.

Электроны вылетают из источника с энергией E_0 , проходя сферы 1 и 2, замедляются до энергии E_a и через коническую щель f попадают в цилиндрический анализатор. Энергия анализируемых электронов равна

$$E_a = E_0 + qU = aqv, \quad (I)$$

где a — постоянная прибора, $q = -e$ — заряд электрона.

Регистрация электронов осуществляется во втором фокусе D_2 с помощью канального электронного умножителя (КЭУ) типа Bendix SEM 4503, диаметр входного окна которого составляет 12 мм.

Развертка спектра производится по замедляющему напряжению U .

При таком способе анализа энергия электронов (E_a), регистрируемых детектором, а также абсолютный разрешаемый интервал энергий (ΔE_a) остаются приблизительно постоянными во всем диапазоне измерений (0,5–50 кэВ). Расчет электронных траекторий в цилиндрическом зеркале выполнен численно и проанализирован простым графическим методом. В результате были выбраны следующие оптимальные параметры прибора:

$$r_1 = 50 \text{ мм}; r_2 = 105 \text{ мм}; 2L = 615 \text{ мм}; a = 1,96, \quad (2)$$

где r_1 и r_2 — соответственно радиусы внутреннего и внешнего цилиндров, $2L$ — расстояние между источником и детектором. Тогда для энергетического разрешения спектрометра в целом можно записать:

$$\frac{\Delta E_0}{E_0} \approx 0,02 \frac{u}{U}. \quad (3)$$

Это приближение получено в предположении высокой точности стабилизации U , которая равна $\sim 10^{-5}$. Следовательно, для достижения высокого энергетического разрешения необходим режим анализа с малыми значениями u относительно U .

Спектрометр защищен тремя цилиндрическими магнитными экранами из му-металла, которые размещены внутри вакуумной камеры и перекрывают все пространство сферы и цилиндрического анализатора. С этой же целью шесть цилиндров меньших размеров размещены вокруг источника и детектора. В результате величина остаточного магнитного поля в спектрометре меньше 1 мГс.

Вакуумная система спектрометра обеспечивает безмасляный вакуум $\sim 7 \cdot 10^{-7}$ Торр, который достигается в течение 15–20 мин. с помощью форвакуумного насоса 2НВР-5Д с азотной ловушкой и магнитного электро-разрядного насоса НОРД-250. Для устранения помех от паразитных излучений, связанных с работой НОРД-250 (характеристическое излучение, вторичные электроны) и приводящих к увеличению фона детектора, создана специальная экранирующая система.

В основном, спектрометр сделан из немагнитной нержавеющей стали. Предварительное замедление электронов позволяет обойтись без требуемой для обычного цилиндрического анализатора точности изготовления и настройки деталей. Простота конструкции обеспечивает удобство демонтажа всех элементов спектрометра, что существенно при его загрязнении радиоактивными препаратами. Процедура полной разборки и сборки спектрометра занимает несколько часов.

Система управления спектрометра (см. рис.1) полностью автоматизирована на основе блоков и микроЭВМ в стандарте КАМАК. Разработанный пакет программ обеспечивает:

- а) управление режимами работы;
- б) управление замедляющим напряжением U и его стабилизацию;
- в) формирование и счет импульсов от КЭУ;
- г) визуализацию и предварительную обработку данных;
- д) связь с базовой ЭВМ для последующей полной обработки данных.

Исследование характеристик спектрометра было проведено с помощью источника, приготовленного внедрением ионов ^{169}Yb с энергией ~ 500 эВ в бериллиевую подложку на электромагнитном масс-сепараторе. Фрагменты спектров электронов $L_{1,2,3}$ ($E_e \approx 10,6$ кэВ) и $M_{2,3}$ ($E_e \approx 18,4$ кэВ) приведены на рис.2 и 3, соответственно. Как видно, полученное энергетическое разрешение в области 10 кэВ составляет $\Delta E = 5$ эВ ($\Delta E/E = 0,05\%$; $\Delta p/p \sim 0,025\%$), что является наилучшим для спектрометров, работающих в данной области энергий. Оценка же абсолютной эффективности спектрометра дала значение $\sim 0,1\%$ от 477.

Как уже отмечалось, наилучшее энергетическое разрешение достигается при малых энергиях анализа E_a (см. (1), (3)). Однако при малых E_a уменьшается и эффективность регистрации электронов с помощью КЭУ. Для достижения компромисса между двумя основными параметрами (энергетическим разрешением и эффективностью) спектрометра были проведены эксперименты по исследованию относительной эффективности КЭУ в области от 60 до 1000 эВ и выбору оптимального режима его работы $^{1/3}$. Использовался метод сравнения интенсивности двух конверсионных линий — $K_{I,4}$ и $L_{I,4}$ из распада ^{57}Co . Опыт показал, что в исследуемом диапазоне эффективность КЭУ изменяется примерно в 3 раза. В связи с этим

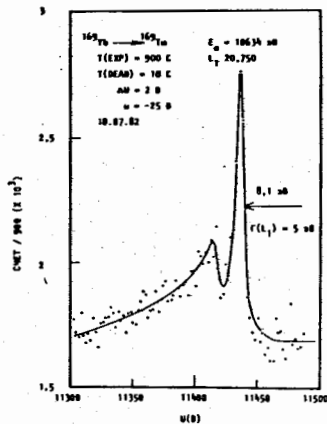


Рис.2. Фрагмент спектра электронов ($L_2, 20, 7$) при распаде ^{169}Yb .

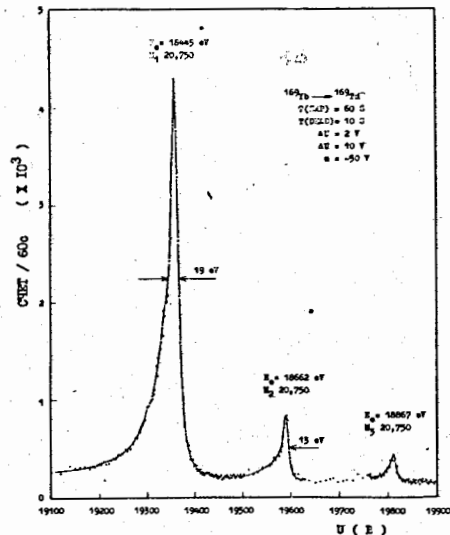


Рис.3. Фрагмент спектра электронов ($M_{20}, 7$) при распаде ^{169}Yb .

был предложен и реализован метод ускорения электронов перед их регистрацией КЗУ, позволивший добиться улучшения отношения эффект/фон примерно в 2 раза без заметного ухудшения аппаратурной линии в целом (рис.4).

В третьей главе изложены результаты измерений естественных ширин атомных уровней T_m с помощью низкоэнергетических ЭК из распада ^{169}Yb , а также относительных интенсивностей К-серии α -электронов железа ($Z=26$), возникающих при распаде ^{57}Co . Эти исследования связаны с оценкой точности определения КЭЛ в тритиевых экспериментах, которая, как правило, строится с помощью линий электронов внутренней конверсии или α -электронов. Поскольку разработка методики прецизионной спектроскопии низкоэнергетических электронов в значительной степени связана с качеством радиоактивных источников, то здесь же описана техника и методика изготовления тонкослойных источников ^{169}Yb , ^{57}Co и ^{201}Tl .

Исходя из конкретной задачи в качестве наиболее оптимального был выбран метод приготовления источников испарением в вакууме. В диссертации рассмотрены некоторые вопросы механизма этого процесса, а также

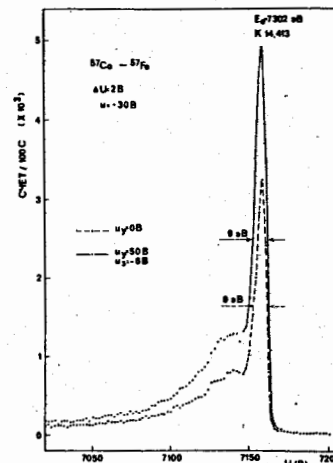


Рис.4. Форма линии $KI_{4,4}$ (^{57}Co), измеренная в режиме ускорения (сплошная линия) и без ускорения (пунктирная линия).

приведено описание экспериментальной установки. Отметим два основных эффекта, ухудшающих качество источников, изготавливаемых этим методом: улетучивание тантала из танталового нагревателя и улетучивание органических соединений, находящихся в исходном радиоактивном препарате. Для уменьшения влияния первого из них методом нейтронно-активационного анализа была показана необходимость предварительного отжига нагревателя в вакууме при температуре, заметно превышающей температуру испарения исследуемого вещества, а для уменьшения влияния второго режим изготовления источника выбирался таким образом, что большая часть органических соединений осаждалась на подвижный танталовый экран.

Методом испарения в вакууме были изготовлены источники ^{57}Co , ^{169}Yb и ^{201}Tl , которые использовались для последующих измерений.

В диссертации рассмотрен вопрос об определении естественной ширины атомных уровней с помощью линий электронов внутренней конверсии^{4/}. Проанализирована правомерность применения полумширического соотношения

$$W^n = R^n + \Gamma^n, \quad (4)$$

где Γ - ширина лоренциана на полувысоте (естественная ширина атомного уровня), R - ширина исходного гауссиана (разрешение спектрометра с гауссовской формой линии), W - ширина свертки лоренциана с гауссианом; $n = 1, 2, 3$. Показано, что использование формулы (4) с фиксированным значением n может привести к заметным погрешностям в определении Γ по известным W и R (см. рис.5).

При определении величин $\Gamma_1(T_m)$ из распада ^{169}Yb мы использовали приближение, согласно которому в виде свертки $G \otimes L$ представлялась лишь правая часть электронной линии, не искаженная процессами взаимодействия электронов с веществом. Для обработки спектров на ЭВМ СМ-4

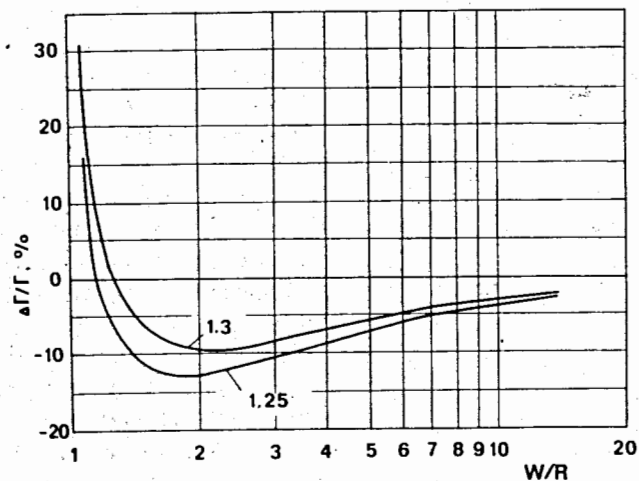


Рис.5. Погрешность в определении Γ при известных W и R при $n = 1,25; 1,3$.

была создана программа диалоговой графической оптимизации. Характерный фрагмент аппаратного спектра ($M_{120,7}$, ^{169}Yb) и результат его обработки показан на рис.6. Добавим, что разрешение спектрометра R было определено из обработки линии $K_{14,4}$ (^{57}Co) при фиксированном значении $\Gamma(K) = 1,25$ эВ и составляло

$$\begin{aligned} u &= -30 \text{ В} & R &= 4,9 \pm 0,3 \text{ эВ}, \\ u &= -50 \text{ В} & R &= 6,8 \pm 0,2 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

С целью проверки предположения о независимости R от энергии электронов эта величина определялась также и по линиям $L_{130,6}$ ($E_e = 15,8$ эВ) и $L_{132,3}$ ($E_e = 17,4$ кэВ) из распада ^{201}Tl при фиксированном $\Gamma_{L_1}(\text{Hg}) \approx 11,3$ эВ. Результаты подтвердили наши ожидания.

Основные результаты измерений естественных ширин атомных уровней тулия ($Z = 69$) с помощью ЭК из распада ^{169}Yb сведены в таблицу I. Для сравнения там же приведены и данные других авторов. Следует отметить, что результаты Беннета и др. (Phys.Rev.C, 1985, v.31, p.197) определялись из косвенных экспериментов - из измерений рентгеновских переходов типа $L_1M_{2,3}$ и M_1N_3 . Данные же Краузе и Оливера (J.Phys.Chem. Ref.Dat., 1979, v.8, p.329) являются полуэмпирическими расчетами. Что касается результатов Кески-Рахконена (ADNDT, 1974, v.14, p.139) и Сивьера (В кн.: Low Energy Electron Spectrometry. - Willey Interscience,

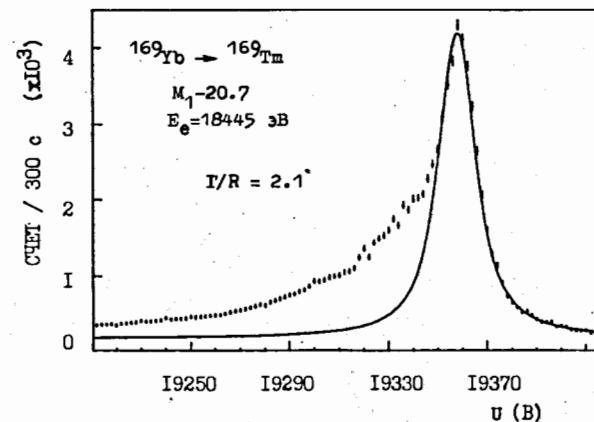


Рис.6. Линия $M_{120,7}$ (^{169}Yb), измеренная при $R = 6,8$ эВ; $\chi^2 = 0,87$.

New-York, 1972, p.220), то эти данные дают лишь качественную информацию о $\Gamma_1(\text{Tm})$, так как представлены в графической форме.

Таблица I. Естественные ширины атомных уровней для $Z = 69$ (Tm), эВ. В скобках даны полные ошибки

| Атомный уровень | Наст. работа | Bennett et al. (эксп.) | Krause et al. (полуэмп.) | Keski-Rahkonen (расч.) | Sevier (полуэмп.) |
|-----------------|--------------|------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|
| K | 35,5(3) | - | 30,1(10) | 32 | 30 |
| L_1 | 4,4(3) | - | 5,47(80) | 7 | 5 |
| L_2 | 4,0(4) | - | 4,49(50) | 5 | 3 |
| L_3 | 4,0(5) | - | 4,48(40) | 4 | 3 |
| M_1 | 13,9(3) | 14(3) | - | 20 | 14 |
| M_2 | 9,2(8) | 7,1(20) | - | II | 9 |
| M_3 | 9,5(12) | 7,7(14) | - | II | 7 |

Спектры K-серии Оже-электронов железа из распада ^{57}Co измерялись в энергетическом диапазоне 5,2+7,1 кэВ при приборном разрешении $\Delta E \approx 7$ эВ ^{75/}. Источники ^{57}Co изготавливались методом испарения в вакууме. Обработка спектров производилась на ЭВМ ЕС-1040 с помощью программы, в которой форма линии выражалась аналитической функцией. Пример измеренного КЛМ-спектра и результат его обработки показан на рис.7.

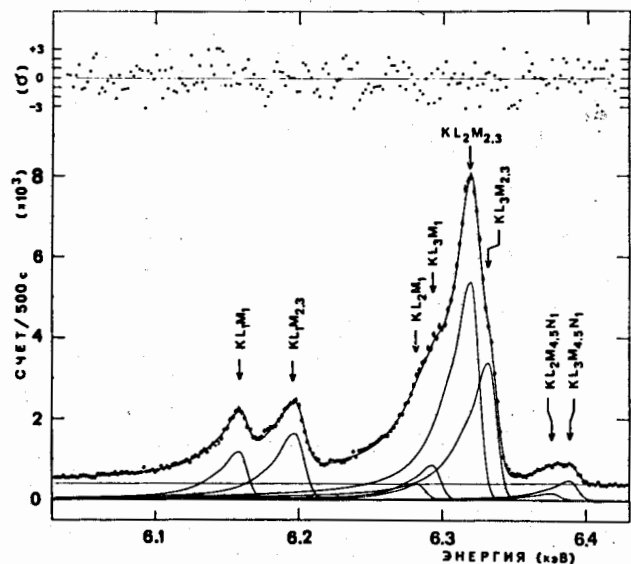


Рис. 7. КЛМ-спектр Оме-электронов железа. В верхней части рисунка приведены нормированные невязки.

Основные выводы из результатов измерений К-серии Оме-электронов железа заключаются в следующем.

Относительные интенсивности наиболее сильных $KL_1L_2(1p_1)$ -, $KL_2L_3(1d_1)$ - и $KL_1L_1(1s_0)$ -переходов существенно расходятся с результатами релятивистских и нерелятивистских расчетов в схеме промежуточной связи с учетом взаимодействия конфигурации, что подтверждает систематический характер этого расхождения для атомов с $z < 40$. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости учета в расчетах более тонких эффектов. Относительные энергии КЛЛ-переходов довольно хорошо согласуются с результатами полужемпирических расчетов Ларкинса (ADNDT, 1977, v.20, p.311).

Из сравнения (табл.2) измеренных относительных интенсивностей (в частности, из отношения $KL_3M_{2,3}/KL_2M_{2,3}$) с результатами релятивистских расчетов в схеме jj-связи (Чен и др. - ADNDT, 1979, v.24, p.13) и нерелятивистских расчетов в схеме промежуточной связи (Бабенков и др. - В сб.: Ядерн.спектроскоп. и структ. ат.ядра. Тезисы докл. 36 совещ. - Л., Наука, 1986, с.268) впервые сделан вывод о неприменимости релятивистских расчетов в схеме jj-связи для описания КЛМ-переходов в атомах с $Z = 26$. Адекватная теория, описывающая КЛМ-переходы в этой области,

Таблица 2. Относительные интенсивности и энергии КЛМ-переходов в железе ($Z = 26$)

| Переходы | Относительные интенсивности KL_1M_j/KL_1M_1 | | | Относительные энергии (эВ) | |
|------------------|---|-----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| | Наши данные эксп. | теор. а) рел., jj-св. | теор. а) нерел., пром. св. | Наши данные эксп. | Ларкинс теор. б) |
| KL_1M_1 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | -162(2) | -167 |
| $KL_1M_{2,3}$ | 1,67(8) | 1,50 | 1,62 | -123(2) | -124 |
| KL_2M_1 | 0,32(15) | 0,48 | 0,58 | -37(5) | -39 |
| KL_3M_1 | 0,75(15) | 0,86 | 0,90 | -26(4) | -27 |
| $KL_2M_{2,3}$ | 4,73(30) | 2,16 | 4,11 | 0 | 0 |
| $KL_3M_{2,3}$ | 2,90(20) | 4,33 | 3,62 | +12(1) | +12 |
| $KL_2M_{4,5}N_1$ | 0,15(7) | 0,14 | - | +56(5) | - |
| $KL_3M_{4,5}N_1$ | 0,43(6) | 0,30 | - | +68(1) | - |

а) Данные для $Z = 26$ получены графической интерполяцией.

б) Значения получены с учетом перераспределения интенсивностей в дублетах и квартете $KL_3M_3(3P_0 + 1P_1 + 3D_2 + 3D_3)$.

по-видимому, должна основываться на схеме промежуточной связи. Относительные энергии переходов находятся в хорошем согласии с полужемпирическими данными Ларкинса.

Значительные погрешности в определении относительных интенсивностей из-за наложения КММ-группы на низкоэнергетический склон конверсионной линии $KI_{4,4}$ не позволили сделать однозначные выводы о применимости релятивистских и нерелятивистских расчетов, выполненных соответственно в схемах jj- и промежуточной связи.

Упомянутое выше наложение приводит также к тому, что при использовании линии $KI_{4,4}$ кэВ для точного определения ПЭЛ в тритиевых экспериментах необходимо учитывать и вклад КММ-группы. Из измерений интенсивностей К-серии Оме-электронов и линии ЭК $KI_{4,4}$ кэВ нами определены следующие отношения: $КЛЛ : КЛМ : КММ : KI_{4,4} = 4,0(6) : 1,0(1) : 0,05(2) : 3,0(3)$.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертации.

1. Создан новый комбинированный электростатический спектрометр для изучения электронов с энергией 0,5-50 кэВ. В этом спектрометре впервые для задач ядерной физики объединены два типа анализаторов: интегральный со сферическим тормозящим полем и дифференциальный типа

двойного цилиндрического зеркала. Управление и контроль работы спектрометра осуществляется с помощью микроЭВМ в стандарте КАМАК. Полученное аппаратное разрешение $\Delta E \approx 5$ эВ в области энергий ~ 20 кэВ является наилучшим для спектрометров, работающих в данной области энергий.

2. Проведены исследования относительной эффективности КЭУ электростатического спектрометра. Получена зависимость эффективности регистрации от энергии электронов в диапазоне 60–1000 эВ. Из эксперимента следует, что при малых энергиях электронов эффективность падает примерно в 3 раза.

3. С целью достижения компромисса между эффективностью регистрации и энергетическим разрешением спектрометра проведен эксперимент с ускорением электронов, регистрируемых КЭУ. Из эксперимента определен оптимальный режим работы КЭУ, при котором можно добиться увеличения отношения пик/фон примерно в 2 раза без заметного ухудшения аппаратной формы линии спектрометра.

4. На основе анализа явлений, сопровождающих процесс испарения в вакууме, и эксперимента по оценке эффекта улетучивания материала нагревателя выбрана оптимальная процедура приготовления тонкослойных радиоактивных источников электронов для прецизионной спектрометрии низкоэнергетических электронов.

5. Впервые проведены прямые измерения естественных ширин атомных уровней тм с помощью низкоэнергетических ЭЖ из распада ^{169}Yb , используемого в качестве калибровочного источника в экспериментах по измерению массы антинейтрино (см. табл. I).

6. Проведены исследования К-серии Оже-переходов в железе ($Z = 26$) из распада ^{57}Co . Измерения интенсивностей и энергий КМ- и КММ-переходов проводились впервые. Из анализа результатов измерений относительных интенсивностей КМ-переходов впервые сделан вывод о неприменимости расчетов, выполненных в рамках теории $j\bar{j}$ -связи для описания интенсивностей этих переходов в области $Z \sim 25$. Расчеты интенсивностей КМ-переходов в этой области Z должны проводиться в рамках теории промежуточной связи.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

I. Ц. Вылов, А. Минкова, А. Х. Инояттов, С. Бацев, К. Я. Громов, А. Маринов, П. Петев, В. Т. Сидоров, В. Г. Чумин, Ш. Бриансон, Р. Ж. Вален, Б. Легран, О. Гобло, Д. Лекутэрие. Электростатический бета-спектрометр в области энергий 0,5–50 кэВ. – Дубна, 1982. – 13 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р6–82–918); В сб.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып. I3. – Л.: Энергоатомиздат, 1984, с. I2–2I; В сб.: Тезисы докладов XXXIII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. – Л.: Наука, 1983, с. 496.

2. Ch. Briancon, B. Legrand, R. J. Walen, Ts. Vylov, A. Minkova, A. Inoyatov. A new combined electrostatic electron spectrometer. – Nucl. Instr. and Meth., 1984, v. 221, p. 547–557.
3. А. Х. Инояттов, Ш. Бриансон, К. Бурин, Р. Вален, Ц. Вылов, Б. Легран, А. Минкова, В. Н. Покровский. Об относительной эффективности регистрации канального электронного умножителя электростатического бета-спектрометра. – Дубна, 1985. – II с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р6–85–753); В сб.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов XXXVI совещания. – Л.: Наука, 1986, с. 525.
4. В. Н. Покровский, А. Х. Инояттов, И. А. Простаков, Ш. Бриансон, Ц. Вылов, Б. Легран, А. Минкова, А. А. Пасько. Измерение естественных ширин атомных уровней тулия из распада ^{169}Yb . – Дубна, 1986. – 10 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р6–86–I34); In: International Symposium on weak and electromagnetic interactions in nuclei. – Heidelberg, 1986, p. 251.
5. А. Ковалик, А. Х. Инояттов, А. Ф. Новгородов, В. Брабец, М. Рышавы, Ц. Вылов, О. Драгоун, А. Минкова. Исследование КЛ- и КМ-спектров Оже-электронов железа при распаде $^{57}\text{Co} - ^{57}\text{Fe}$. – Дубна, 1986. – 10 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р6–86–I33); В сб.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов XXXVI совещания. – Л.: Наука, 1986, с. 249.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 ноября 1986 года.