

роль в повышении эффективности системы гарантий отводится растущему значению международной координации и объединению усилий в этом направлении.

Другие вопросы. В рамках МОЯТЦ рассмотрены и такие вопросы, как положение на международном рынке урана, условия гарантированных поставок топлива и предоставления услуг на других стадиях ЯТЦ, взаимоотношения частных фирм с правительственными организациями. Особое внимание было уделено специфическим потребностям развивающихся стран, что нашло отражение в документах каждой рабочей группы и в заключительном докладе ТКК.

Заключение. Целью программы МОЯТЦ были не переговоры, а широкое разностороннее изучение различных аспектов развития ЯЭ. Исследования в рамках программы МОЯТЦ не привели к неожиданным результатам, однако всесторонний анализ возможностей и проблем ЯЭ на современном этапе с учетом реальных экономических, научно-технических, экологических и других факторов, а также с учетом укрепления режима нераспространения ядерного оружия усилил позиции ЯЭ. Оценка потребностей в ЯЭ в долгосрочном плане и путей их удовлетворения показала, что они могут быть уверенно обеспечены не любыми реакторными системами и топливными циклами.

В частности, для ряда стран с высоким промышленным потенциалом сочетание быстрых реакторов-размножителей с легководными тепловыми — наиболее оптимальное решение проблемы долгосрочного удовлетворения энергетических потребностей.

Проведенная МОЯТЦ работа подтвердила, что нет топливных циклов, абсолютно устойчивых против распространения ядерного оружия, но она также показала, что при обеспечении соответствующих мер и эффективных гарантий практически все применяемые в настоящее время топливные циклы могут быть достаточно устойчивыми в этом отношении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuel and heavy water availability. INFCE, v. 1. Vienna, IAEA, 1980.
2. Enrichment availability. Ibid., v. 2.
3. Assurances of long-term supply of technology, fuel and heavy water and services in the interest of national needs consistent with non-proliferation. Ibid., v. 3.
4. Reprocessing, plutonium handling, recycle. Ibid., v. 4.
5. Fast breeders. Ibid., v. 5.
6. Spent fuel management. Ibid., v. 6.
7. Waste management and disposal. Ibid., v. 7.
8. Advanced fuel cycle and reactor concepts. Ibid., v. 8.
9. Summary volume. Ibid., v. 9.

Поступила в Редакцию 31.07.80

УДК 539.123

Существует ли у нейтрино масса покоя?

(эксперимент по измерению β -спектра трития)

ЛЮБИМОВ В. А.

Попытки оценить массу покоя нейтрино экспериментально предпринимались уже давно. Прямым методом определения является исследование формы β -спектра. При конечной массе нейтрино происходит изменение формы спектра: у границы β -спектр изгибается и укорачивается как раз на величину массы нейтрино. Чем короче сам β -спектр, тем меньше искажения, обусловленные аппаратурными погрешностями. Поэтому β -распад трития с граничной энергией 18,6 кэВ стал классическим объектом исследования для оценки массы нейтрино. Одна из первых работ была сделана Г. Ханна и Б. Понтекорво в конце 40-х годов [1]. Это очень простой эксперимент: газообразным тритием заполнялся пропорциональный счетчик и непосредственно по амплитуде импульсов можно было получить спектр трития, определить его форму, граничную энергию и соответственно предел массы нейтрино. Предел зависит от разрешения. В этой работе было получено ограничение на массу нейтрино ~ 1 кэВ. Дальнейший прогресс в определении предела массы нейтрино в последующих работах связан с улучшением раз-

решения. Экспериментальным методом, наиболее удобным для этого, явилось использование магнитных β -спектрометров, которые позволили существенно улучшить разрешающую способность. Рекордный результат был получен в 1972 г. в работе К. Берквиста [2]. С помощью магнитного спектрометра, имеющего разрешение около 50 эВ в конце β -спектра, получен верхний предел массы нейтрино, равный 55 эВ с 90%-ным уровнем достоверности.

Во всех работах речь шла о получении верхнего предела массы нейтрино. Вопрос о ее конечности оставался открытым. И вот недавно в ИТЭФ В. А. Любимовым, Е. Г. Новиковым, В. З. Нозиком, Е. Ф. Третьяковым и В. С. Козиком был завершен цикл прецизионных измерений β -спектра трития, включенного в молекулу валина [3]. Из анализа данных получено указание на ненулевое значение массы нейтрино. Измерения осуществлены на спектрометре ИТЭФ [4] с тороидальным магнитным полем. Спектрометр имел большой телесный угол; разрешение ~ 40 эВ в пересчете на конец β -спектра трития. Бета-электрон совер-

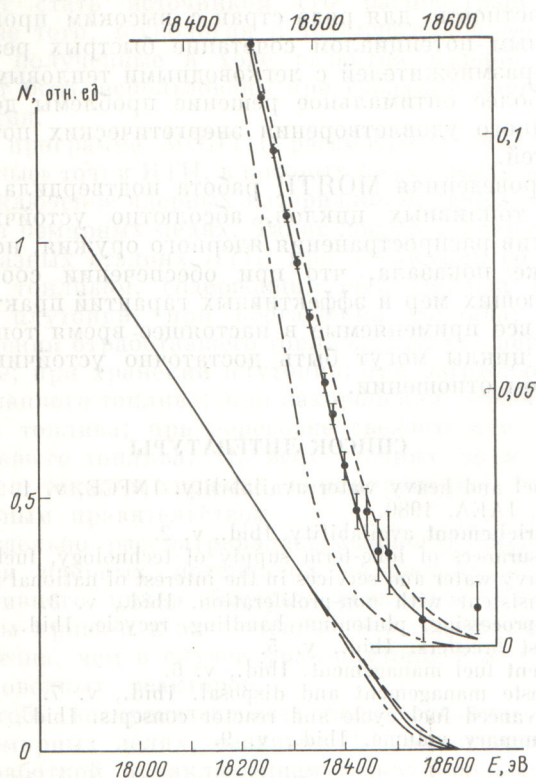


Рис. 1. Измеренный β -спектр трития (— $M_v = 37$ эВ; --- $M_v = 0$; - · - · $M_v = 80$ эВ)

шал четыре отклонения в магнитном поле (поворот на 720°), прежде чем попадал в детектор. Такая конструкция спектрометра привела к тому, что фон в спектре оказался очень малым. В качестве детектора в большинстве измерений использовались пропорциональный счетчик и пропорциональная камера. Информация об амплитуде сигналов с детектора позволила дополнительно уменьшить фон в установке.

Источником являлся тритированный валин ($C_5H_9T_2NO_2$), содержащий два атома трития на молекулу. Толщина источника примерно 2 мкг на 1 см^2 , что соответствовало 5–7 молекулярным слоям. Калибровка осуществлялась с помощью конверсионных линий от источника ^{169}Yb . Этих линий было много в интервале 10–50 кВ. Ширина линий в указанном интервале была примерно одинакова, что указывало на независимость разрешения спектрометра от импульса. Точность калибровки ~ 5 эВ.

В работе тщательно измерялась и экспериментально исследовалась форма линии разрешения спектрометра (имеется в виду разрешение, обусловленное как оптическим разрешением спектрометра, так и искажением, связанным с прохождением β -электронов в рабочем источнике). Была специально разработана методика для измерения формы этой линии. Кроме того, проведены расче-

ты, подтвердившие справедливость экспериментально найденной формы. Этот момент существен, так как традиционный метод улучшения разрешения для дальнейшего прогресса в определении массы нейтрино неэффективен начиная с 40 эВ. Это связано с тем, что распад атомарного трития происходит примерно в 70% в основное состояние He^{3+} и в 30% — в возбужденные состояния, находящиеся на расстояния более 40 эВ от основного состояния. Таким образом, даже улучшение аппаратурного разрешения в 2–3 раза реально не улучшает полного разрешения, определяемого уже физическими причинами.

Примерно за пятилетний период выполнено 16 серий измерений. Каждая серия представляет собой независимый полный опыт. Общая статистика составила $1,5 \cdot 10^7$ событий или порядка 10^5 событий на массочувствительную область шириной 100 эВ от конца β -спектра трития.

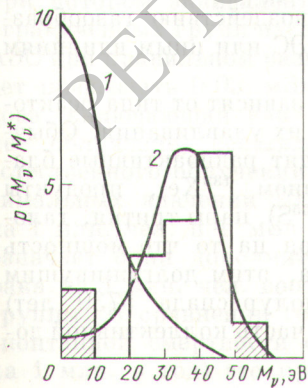
На рис. 1 приведен экспериментальный спектр (график Кюри), показывающий, в каком интервале (примерно 700 эВ от конца β -спектра) осуществлялись измерения. Здесь дана половина статистики. Конец этого спектра в увеличенном масштабе приведен на втором графике. Интервал — около 150 эВ.

Важные стороны данного эксперимента — обработка результатов (определение параметров модели) и анализ полученных данных (придание параметрам физического смысла). Дело в том, что эффект массы в экспериментальном спектре сам по себе лишен наглядности, поскольку искомое значение параметра массы нейтрино оказывается меньше, чем значение ширины функции разрешения. Поэтому математическая обработка приобретает значительный вес, и от ее корректности в большой мере зависит надежность выводов. В то же время физический смысл имеет лишь такое утверждение о массе нейтрино, которое не зависит от конкретных экспериментальных условий. Измерения же были осуществлены с веществом источника с неизвестным спектром конечного состояния (He^{3+} в молекуле валина). Таким образом, другая проблема состоит в формулировке такого безмодельного утверждения.

Процедура обработки состояла в следующем. В процессе измерения в результате влияния прибора на истинный спектр происходит искажение его формы. В итоге получается экспериментальный спектр. Для того чтобы получить параметры массы нейтрино и энергии β -распада, необходимо адекватное сравнение с теоретическим спектром. Для этого использовалась теоретически известная форма β -спектра трития, включающая в себя в качестве параметров массу нейтрино и граничную энергию β -перехода. Далее проводилась свертка теоретического спектра с разрешением, определенным экспериментально. Кроме того, учитывались эффективность детектора, фон и нормировка. По-

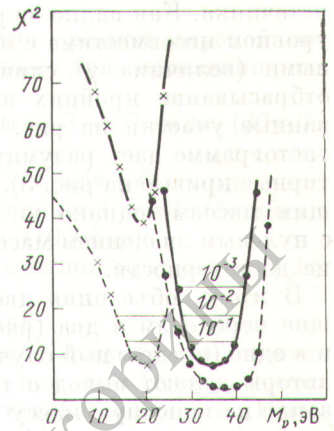
лученную таким образом теоретическую форму β -спектра можно сравнить с экспериментальной. Признаком совместимости служил критерий χ^2 ; она оказалась удовлетворительной.

Шестнадцать серий измерений были обработаны независимо друг от друга, и значения параметра масс, полученные в каждой из серий, отложены в виде гистограммы. Каждая серия — это отдельный эксперимент с довольно точным определением массы, 16 серий — это уже некоторая статистика самих опытов, по которой можно судить о распределении параметров масс. На рис. 2 видно распределение с выраженным пиком и определенной шириной. Ширина распределения характеризует в среднем точность определения массы в каждой отдельной серии и составляет ~ 15 эВ. Среднее значение параметра массы равно 34 эВ с ошибкой 4 эВ, т. е. отличается от нулевого значения на 8—9 ошибок. Однако интерпретация этого пика требует тщательного анализа, так как такая обработка может давать смещенную оценку M_ν из-за корреляции различных параметров. Для этого методом Монте-Карло осуществлялась генерация модели теоретического спектра для набора фиксированных масс (обозначаемых M_ν^*) и последующая подгонка параметров по тем же формулам. Статистика, фон и функция разрешения при генерации соответствуют экспериментальным условиям одной из серий измерений. Результатом такой процедуры является функция $P(M_\nu/M_\nu^*)$ — вероятность получить при подгонке β -спектра массу M_ν при заданной в процессе генерации массе M_ν^* . На рис. 2 показаны вычисленные функции $P(M_\nu/M_\nu^*)$ для $M_\nu^* = 0$ и $M_\nu^* = 35$ эВ. Были вычислены вероятности совмещения $P(M_\nu/M_\nu^*)$ при разных M_ν^* с экспериментальной гистограммой. На рис. 3 приведены кривые совместимости по вероятности. Сплошная кривая, отмеченная точками, указывает, в каком районе получается параметр для массы M_ν^* . Минимум кривой расположен около 35 эВ. Горизонтальными линиями показаны уровни достоверности. С достоверностью 99% параметр массы нейтрино оказывается заключенным в интервале от 28 до ~ 40 эВ.



Р и с. 2. Гистограмма экспериментальных значений M_ν по 16 сериям измерений и функции ожидания: 1 — $P(M_\nu/M_\nu^*)$ при $M_\nu^* = 0$; 2 — $P(M_\nu/M_\nu^*)$ при $M_\nu^* = 35$ эВ; заштрихованы обретенные значения M_ν (см. текст)

Р и с. 3. Кривые совместимости (● — спектр конечных состояний He^{3+} с двумя уровнями; × — спектр одного конечного состояния; — — — — обретенная гистограмма; горизонтальные линии — уровни достоверности)



Полученный результат следует проанализировать. Возникает вопрос: какие эффекты могут имитировать массу? Т. е. может ли быть ситуация, когда масса в природе равна нулю, а в эксперименте окажется ненулевой. Наиболее существенно, если есть какие-то искажения в конце β -спектра, т. е. в массочувствительной области. Природа этих искажений может быть связана либо с функцией разрешения, либо с эквивалентными ей эффектами. Функция разрешения варьировалась в тех допустимых пределах, которые определялись экспериментально, и эта вариация отражена в кривой совместимости. Но распределение энергии по уровням возбуждения системы He^{3+} , оставшейся после β -распада трития, эквивалентно уширению функции разрешения. В случае распада атомарного трития имеем 70%-ную вероятность перехода в основное состояние и 30%-ную — в возбужденное, отличающееся от основного на 43 эВ. Все это дает достаточно широкое распределение функции разрешения. Именно такая (третий в атомарном состоянии) ситуация предполагается при обработке. Однако спектр состояния молекулы валина, в которой 3H замещается на He^{3+} в результате β -распада, отличается от спектра трития в атомарном состоянии. Молекула валина представляет собой сложное образование, и мы даже не знаем, насколько велики отличия в спектрах. Это означает, что функция разрешения для трития в молекуле валина может быть как шире, так и уже, чем в случае распада атомарного трития. Самая опасная ситуация с точки зрения имитации, если истинное разрешение окажется уже, чем предполагалось при обработке. В таком случае предельной является ситуация, при которой реализуется только один уровень. При этом может быть самое узкое распределение, что справедливо для любого химического соединения.

Вычисляя $P(M_\nu/M_\nu^*)$ для структуры с одним уровнем и сравнивая с экспериментальной гистограммой масс, получаем нижний предел массы нейтрино, не зависящий от химического состава

источника. Как видно из рис. 3, структура с одним уровнем несовместима с экспериментальными данными (величина χ^2 слишком велика), и только отбрасывание крайних значений M_ν (заштрихованные участки на рис. 2) в экспериментальной гистограмме дает разумную совместимость (пунктирные кривые на рис. 3). Кривая смещена к меньшим массам, однако не может быть совместима с нулевым значением массы при допустимом уровне достоверности.

В итоге, объединяя две кривые, соответствующие переходам в два (распад атомарного трития) и в одно (предельный случай) конечные состояния, авторы делают вывод о том, что существует указание на конечную массу нейтрино, которая находится в интервале 14—46 эВ с вероятностью 99%. Этот вывод является безмодельным, т. е. не зависит от предположения о схеме уровней H^3+ и, следовательно, от состава источника.

Итак, при измерениях с конкретным веществом источника (тритированным валином) сформулирован общий вывод о массе нейтрино, не зависящий от вещества источника. Это означает, что с каким бы веществом ни проводились измерения, полученные параметры массы нейтрино следует ожидать в указанном выше интервале. Авторы планируют проверить это заключение экспериментально, т. е. провести новые измерения с другим источником по более усовершенствованной методике, чтобы прийти к окончательному выводу о массе нейтрино.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hanna G., Pontecorvo V. «Phys. Rev.», 1949, v. 75, p. 983.
2. Bergkvist K. «Nucl. Phys.», 1972, v. B39, p. 317.
3. Козик В. С. и др. «Ядерная физика», 1980, т. 32, с. 301.
4. Третьяков Е. Ф. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1975, т. 39, с. 583.

Поступила в Редакцию 12.08.80

УДК 577.3

Экологические проблемы развития ядерной энергетики

ГЕРЖМАНСКИ Б. (Чешское Высшее техническое училище, Прага)

Мировое потребление электроэнергии за последние 10 лет возросло более чем на 50% [1], а в расчете на душу населения в среднем удвоилось за 30 лет. В будущем рост энергообеспеченности в значительной степени будет связан со строительством АЭС. Согласно прогнозу МАГАТЭ, их доля достигнет в 1985 г. 11—13% при мощности 350—400 ГВт (эл.), а в 2000 г. 17—20% при мощности 1500—1800 ГВт (эл.). Так как АЭС используют прежде всего в основной нагрузке, их доля в общей выработке электроэнергии будет еще больше. Эти тенденции вызывают необходимость оценки возрастающего влияния АЭС на окружающую среду.

При этом следует иметь в виду, что любая современная крупномасштабная деятельность человечества отрицательно влияет на окружающую среду. Так, например, растущую за последние 30 лет смертность от рака легких (рис. 1) можно непосредственно связать с увеличением газообразных отходов химической промышленности, хотя нужно учитывать и другие факторы.

Ниже рассмотрено влияние ядерной энергетики на окружающую среду на следующих этапах ядерного топливного цикла (ЯТЦ):

- добыча и обогащение руд;
- производство топливных элементов;
- эксплуатация реакторов;
- переработка топлива;
- складирование радиоактивных отходов;
- перевозка между предприятиями топливного цикла.

В этой статье анализируются специфические проблемы применения ядерной энергии, в частности получение и использование радиоактивных веществ.

Нормальная эксплуатация АЭС. В настоящее время доказано, что ионизирующее излучение канцерогенно и может вызывать генетические эффекты. Обычно предполагается линейная беспороговая зависимость между дозой излучения и частотой появления рака, независимо от мощности дозы. Согласно данным Консультативного Комитета США по биологическому действию ионизирующего излучения (BEIR), при хроническом (в течение всей жизни) облучении 1 млн. человек годовая эквивалентная доза 1 МЗв* (0,1 бэр) ежегодно вызывает 15—20 смертных случаев. Это значение можно использовать для расчетов риска ввиду того, что некоторые группы населения подвергаются хроническому воздействию газообразных и жидких выбросов АЭС или иным влияниям предприятий ЯТЦ.

Радиоактивные выбросы зависят от типа реактора и используемой системы их улавливания. Обычно в состав выбросов входят радиоактивные благородные газы (в основном ^{133}Xe), продукты активации (^{14}Ar , ^{14}C , ^{16}N и ^{35}S), пары трития, галогены и аэрозоли. Несмотря на то что мощность выброса ^{14}C весьма низка, этим долгоживущим радионуклидом (период полураспада 5730 лет) обусловлена значительная часть коллективной до-

* 1 Зв = 100 бэр.