

## **ЭНРИКО ФЕРМИ – ОДИН ИЗ ОСНОВОПОЛОЖНИКОВ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ, ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

*Наведено короткий науково-історичний нарис про основні здійснення і відкриття у фізичній науці й атомній техніці видатного фізика ХХ століття Енріко Фермі.*

*Приведен краткий научно-исторический очерк об основных свершениях и открытиях в физической науке и атомной технике выдающегося физика ХХ века Энрико Ферми.*

*К 106-летию со дня рождения выдающегося итальянского физика Энрико Ферми посвящается.*

### **1. ПЕРИОД УЧЕБЫ И СТАНОВЛЕНИЯ МОЛОДОГО УЧЕНОГО**

Родился Энрико Ферми 29 сентября 1901 года вблизи г. Пьяченцы, расположенного в северной части Италии в плодородной долине реки По, в семье потомков крестьян. Отцом Энрико был государственный служащий Альберто Ферми, достигший в недалеком будущем благодаря своим большим природным способностям (не имея при этом высшего образования) в г. Риме высокого поста начальника отдела в Управлении итальянской железной дороги, соответствующего рангу бригадного генерала в армии. Мать Энрико – Ида де Гаттис, дочь армейского офицера получила педагогическое образование и большую часть своей жизни проработала учителем в начальных школах. В семье Энрико (он был третьим ребенком) мать была главным авторитетом, в воспитании своих детей она руководствовалась строгим чувством долга и дисциплины, не забывая о материнском внимании и любви [1]. Как отмечают биографы Э. Ферми, она оказала сильное влияние на своих детей (дочь Марию и двух сыновей – Джулио и Энрико) и своим жизненным примером внушала им серьезное отношение к жизни и к работе. В возрасте шести лет Энрико поступил в римскую государственную начальную школу, которая тогда была строго светской, и вскоре у него обнаружили редкие математические способности. В возрасте 10-ти лет он после блестящего окончания начальной школы перешел в гимназию с пятилетним сроком обучения. Оценки по школьным дисциплинам у него по-прежнему были отличными и он легко стал первым гимназистом в классе. Здесь наш герой Энрико подружился на долгие годы со своим также интересовавшимся наукой школьным товарищем-тезкой Энрико Персико, с которым они впоследствии стали первыми итальянскими профессорами в области теоретической физики. После окончания в 1916 году гимназии и в 1918 году лицея, пройдя его трехгодичный курс за два года, Энрико получил соответствующий диплом. Отметим, что лицей в итальянской системе образования предназначался для подготовки молодежи к дальнейшему поступлению в университет. Перед семьей встал вопрос о его дальнейшем образовании. Как известно, в этот период на вопрос друзей "Чему он хочет посвятить себя: мате-

матике или физике?" Энрико дословно ответил: "Я изучал математику с таким рвением потому, что считал это необходимой подготовкой для изучения физики, которой я намерен посвятить себя целиком и полностью" [1]. Какой четкий и проникнутый глубокими несиюминутными раздумьями ответ! И это-то в возрасте 17-ти лет! Родители Энрико советовали своему сыну поступать в Римский университет со славными учебными традициями, а Энрико самостоятельно выбрал не менее славный Пизанский университет.



*Энрико Ферми (1901–1954)*

По твердому мнению Энрико, ему для получения более качественного высшего образования, кроме университетского конкурса, надо было дополнительно выдержать еще и конкурс в Высшую нормальную школу в г. Пиза (в древнем и полном исторических памятников культуры городе со знаменитой падающей башней), где студенты обеспечивались пансионом, пользовались великолепной научной библиотекой и изучали предметы, дополняющие университетские курсы (например, немецкий язык, на котором за границей публиковались новые результаты в таких быстро развивающихся областях физики как квантовая теория и теория относительности). При положительном исходе в этих конкурсах Энрико мог совмещать занятия в Высшей нормальной школе, основанной еще самим Наполеоном в 1810 году как соответствующий филиал парижской школы, с посещением лекций в Пизанском университете, насчитывавшем в

ту пору примерно 4000 студентов. Заметим, что по сложившейся традиции эта пизанская школа с крайне ограниченным числом студентов (тогда около 40), отбиравшихся в трудном беспристрастном общенациональном конкурсе, была одним из главных в Италии поставщиков для интеллектуальной элиты страны талантливой молодежи. В данной школе одна часть студентов, обладавших большими способностями и одновременно серьезными учебными запросами, в суровых жизненных условиях занималась гуманитарными науками, а другая часть – математикой и естественными науками. Среди питомцев этой школы были такие известные итальянские математики как Вито Вольтерра (1860-1940), Гвидо Фубини (1879-1943), филолог Микеле Барби (1867-1941) и др. [1]. Блестяще выдержав указанные конкурсы, Энрико осенью 1918 года уехал на четыре года из столичного Рима в провинциальный г. Пиза, слава которого была в далеком средневековом прошлом.

Необычайные физико-математические способности Энрико Ферми быстро признали большинство его профессоров и соучеников-студентов по нормальной школе и университету. Так, будучи 19-летним студентом третьего курса физического факультета Пизанского университета он мог в присутствии своих ведущих педагогов проводить для студентов лекции по квантовой теории. В это время он лучше кого-либо в Италии разбирался в квантовой теории атома Бора-Зоммерфельда [1, 2]. Его настольной книгой стала монография знаменитого немецкого физика-теоретика Арнольда Зоммерфельда "*Строение атома и спектры*", а самым важным научным журналом – немецкий академический физический журнал "*Zeitschrift für Physik*", являвшийся в то время ведущим международным печатным изданием по физике. В 1921 году Э. Ферми опубликовал свою первую научную статью "*О динамике поступательного движения жесткой системы электрических зарядов*" [3]. Здесь следует дать одно уточняющее пояснение, имеющее прямое отношение к указанной области научных интересов молодого Энрико: тогда в Италии теоретическую физику не признавали за научную дисциплину, достойную преподавания в университетах. Все итальянские физики были тогда, в основном, экспериментаторами и только экспериментальные данные могли сойти за физику. Поэтому в 1922 году Э. Ферми, несмотря на имевшийся у него уже научный задел по теоретической физике, в качестве дипломной работы решил выбрать результаты своих экспериментальных исследований, проведенных в физической лаборатории университета, по дифракции рентгеновских лучей на изогнутых кристаллах и получению изображений (лауэграмм) таким методом. Предметом же его диплома в Высшей нормальной школе послужила одна теорема из теории вероятностей и ее некоторые приложения к астрономии. Диплом в университете он с отличием (*cum laude*) защитил 7 июля 1922 года, а вскоре получил и диплом Высшей нормальной школы. В 1922 году Э. Ферми, еще будучи в г. Пизе, получил один выдающийся научный результат в теории относительности: он расчетным путем показал, что в окрестности мировой линии пространство является евклидовым. Эта теорема непреходящего значения содержится в его статье "*О явлениях, происходящих вблизи мировой линии*" [4]. Изложенное выше объяс-

няет нам то, почему в период научного становления Э. Ферми такой раздел физики как квантовая механика не завоевал своего плацдарма на итальянском научном поприще, а находился на ничейной научной территории между физиками и математиками.

История науки говорит о том, что именно молодой и полный творческих планов Э. Ферми со своим практически сформировавшимся к 1922 году научным стилем работы первым в Италии вступил на эту территорию. По существу волновую механику открыли для него чуть позже изданные известные статьи на общую тему "*Квантование как проблема собственных значений*" выдающегося австрийского физика-теоретика Эрвина Шредингера, вышедшие из печати в 1926 году [5]. Эти работы Э. Ферми фундаментально изучил и полностью освоил быстро в свойственной ему оперативной манере. Он обладал феноменальной памятью и научился почти всему самостоятельно. Все, что знал в научной сфере молодой Энрико Ферми, он почерпнул из научно-технической литературы или дошел до этого своим умом сам. Зная свое превосходство над окружающими его тогда отечественными физиками, он понимал, что они не были на переднем крае мирового научного фронта. Ему самостоятельно приходилось выбирать себе научные задачи. У него рано выработалась и проявлялось чувство научной интуиции. Он отдавал предпочтение анализу вполне определенных физических явлений, которые можно было проверить прямым экспериментом. Для него в этот начальный период научного созревания и творчества не было ничего более приятного, чем дополнить свои теоретические разработки своим же экспериментом. Он любил конструировать, изготавливать и собирать экспериментальные модели собственными руками. А голова и руки у него были просто замечательными!

## 2. НАЧАЛО ДЛЯ ФЕРМИ БОЛЬШОЙ НАУКИ

Прибыв после учебы в г. Пиза снова в родной г. Рим, молодой Э. Ферми пытался найти ответ на вопрос: как войти в более широкий научный мир? Для него стало ясно, что ему надо отправиться за рубеж, где физическая наука была куда более развита, чем в Италии. Выиграв в октябре 1922 года соответствующий конкурс по министерству просвещения Италии и воспользовавшись положенной ему стипендией, Э. Ферми в начале 1923 года отправился в г. Геттинген (Германия) для научной стажировки у выдающегося немецкого физика-теоретика Макса Борна. Пребывание Энрико у мэтра теоретической физики оказалось менее полезным, чем можно было ожидать: здесь Э. Ферми написал только несколько научных статей, которые, наверное, мог бы написать и в Италии. Он не стал тогда членом группы выдающихся немецких ученых-физиков (Вернера Гейзенберга, Паскуаля Йордана, Джеймса Франка), тесно и продуктивно работавших в г. Геттингене с М. Борном. Вернувшись после годичного пребывания на кафедре теоретической физики последнего в г. Рим, Э. Ферми до лета 1924 года вел курс математики для студентов-химиков Римского университета. В сентябре 1924 года герой нашего научно-исторического очерка отправился в г. Лейден (Голландия) снова в научную командировку (по декабрь 1924 года) к известному австрийскому физико-теоретику Паулю Эренфесту, от

которого он и получил так нужную молодому физика моральную поддержку от уже состоявшегося физика мирового уровня: здесь П. Эренфест одобрительно отозвался о его способностях и потенциальных возможностях (он ведь мог сравнить Э. Ферми практически со всеми физиками-теоретиками мира). По возвращению в Италию Э. Ферми с января 1925 года по сентябрь 1926 года проработал во Флорентийском университете. Здесь он получил свое первое ученое звание приват-доцента (внештатного преподавателя). Именно здесь в феврале 1926 года он создал свою знаменитую работу по квантовой статистике, представленную в статье "О квантовании идеального одноатомного газа", которая вскоре была опубликована в ведущем по физике в Европе немецком научном журнале "Zeitschrift für Physik" [3, 6].

**1. Фермиевская квантовая статистика.** Это исследование было первым из самых важных научных достижений Э. Ферми в физике. Напомним читателю, что под квантовой статистикой понимается статистический метод исследования, применяемый к системам, состоящим из большого числа частиц и подчиняющимся законам квантовой механики [7]. Квантовая статистика, в отличие от исходных положений классической статистической физики, строится на «принципе неразличимости тождественных частиц». Все одинаковые частицы (например, свободные электроны в проводниках, протоны в ядрах атомов вещества и др.) здесь считаются принципиально неразличимыми друг от друга. Сама проблема нахождения уравнения, описывающего состояние (энтропию) идеального газа, до рассматриваемого нами исследования Э. Ферми вообще была не нова (например, вспомним ранее полученное известное классическое распределение молекул газа по скоростям и энергиям Максвелла-Больцмана [2, 7]). Однако статистический подход в области квантовой механики столкнулся с трудностями при попытке корректно найти число энергетических состояний в газе, содержащем тождественные частицы и характеризующемся своим "вырождением". Заметим, что газ (система частиц) считается "вырожденным", если его свойства, описываемые квантовыми закономерностями, отличаются от свойств обычного газа (обычных систем частиц), подчиняющихся законам классической статистической физики [7]. Важный шаг в преодолении этих трудностей был сделан известным индийским физиком Шатъендрантом Бозе и выдающимся немецким физиком Альбертом Эйнштейном, которые совместными усилиями в 1924 году разработали квантовую статистику применительно к элементарным частицам-бозонам, то есть к частицам с целым или нулевым спином (например, к фотонам, фононам и некоторым ядрам атомов) [2, 7]. Понятие "спин" в квантовой физике (от англ. *spin* – вращаться) обозначает собственный механический момент количества движения элементарной частицы или атомного ядра, обусловленный их квантовой природой [2]. Особенностью этих частиц является то, что они не подчиняются фундаментальному принципу Паули [8, 9] и для них не накладываются ограничения на число частиц, которые могут находиться в некотором квантовом энергетическом состоянии. Заметим, что этот принцип квантовой физики был предложен в 1925 году выдающимся австрийским физиком-теоретиком Вольфгангом Пау-

ли. Физический смысл указанного принципа сводится к тому, что в данном квантовом состоянии физической системы в определенный момент времени может находиться не более одной элементарной частицы. Данная статистика по фамилиям ее авторов исторически соответственно и получила название квантовой статистики Бозе-Эйнштейна [2, 7]. Было установлено, что "вырождение" газов (систем элементарных частиц) становится существенным при весьма низких температурах и при их высоких плотностях.

Согласно данной статистике функция распределения  $f_B$  бозонов (бозе-газов) по энергиям описывается так называемой функцией распределения Бозе-Эйнштейна, соответствующей средней "заселенности" бозонами состояний с данной энергией и имеющей следующий вид [2, 7]:

$$f_B = \left[ \exp\left(\frac{W_i - \mu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $W_i$  – энергия частицы в  $i$ -ом квантовом состоянии;  $\mu$  – химический потенциал, отнесенный к одной частице и равный работе, которая совершается в изобарно-изотермических условиях при увеличении числа частиц в исследуемой системе на одну единицу;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

Итальянский физик Э. Ферми же поставил перед собой такую новую физическую задачу: разработать квантовую статистику для идеального газа, частицы которого характеризуются полуцелым спином (например, для таких элементарных частиц как электронов, протонов, нейтронов и других объектов микромира) [2, 7]. Такие элементарные частицы с полуцелым спином (в специальных единицах  $\hbar = h/2\pi$ , где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка), как известно, имеют ту особенность, что согласно упомянутому нами выше принципу Паули [8, 9] в определенном квантовом состоянии из них может находиться либо одна частица, либо ни одной. Ныне такие частицы называются фермионами. В соответствии с полученными Э. Ферми теоретическими результатами функция распределения  $f_F$  фермионов (ферми-газов) по энергиям, отвечающая среднему числу ферми-частиц в одном энергетическом состоянии, может быть представлена в таком виде [2, 7]:

$$f_F = \left[ \exp\left(\frac{W_i - \mu}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}. \quad (2)$$

Из аналитических выражений (1) и (2) видно, что в зависимости от уровня квантованной энергии  $W_i$  поведение функции  $f_F$  для фермионов и ее численное значение принципиально отличаются от характера изменения и количественных значений функции  $f_B$ , характерной для бозонов. В связи с тем, что свободные электроны в металлах (в проводниках с электрическим током проводимости), связанные электроны атомов, нуклоны (протоны и нейтроны) в ядрах атомов вещества можно приближенно рассматривать как "вырожденный" ферми-газ, то полученные Э. Ферми теоретические данные в области квантовой статистики приобретали большое научное и практическое значение. На основе данной статистики Э.

Ферми в дальнейшем А. Зоммерфельдом было осуществлено развитие ряда положений по распределению электронов проводимости в металлах по энергиям и было показано, что максимальное значение химического потенциала  $\mu$  в металлах не может превышать величины так называемой энергии Ферми  $W_F$  [1, 7]. Спустя несколько месяцев после выхода из печати указанной выше статьи Э. Ферми, его статистику и ее квантовомеханические основы независимо от него открыл выдающийся английский физик-теоретик Поль Дирак [1]. Поэтому в настоящее время эта статистика называется квантовой статистикой Ферми-Дирака. Эта теоретическая работа Э. Ферми специалистами из области атомной физики была сразу же оценена как фундаментальное достижение, что способствовало его заслуженному выдвигению в мировую элиту физиков-теоретиков.

Для сравнения с формулами (1) и (2), характерными для квантовой статистики, приведем ниже функцию распределения  $f_{MB}$  частиц (молекул) газа по энергиям в классической статистике Максвелла-Больцмана, выведенную этими всемирно известными учеными до Э. Ферми как среднее число "невырожденных" частиц в одном энергетическом состоянии [7]:

$$f_{MB} = \left[ \exp\left(\frac{W_i - \mu}{kT}\right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $W_i$  – энергия частицы  $i$ -ого состояния.

Из (2) и (3) следует, что из-за своего "вырождения" свободные электроны в металлических проводниках с электрическим током проводимости не подчиняются классическому распределению Максвелла-Больцмана. Квантовая статистика Ферми-Дирака позволила не только объяснить ряд новых свойств свободных электронов в металлах, но и нашла широкое применение в современной атомной (ядерной) физике (например, при построении "модели ядра по Ферми" и "модели атома Томаса-Ферми") [10].

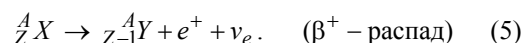
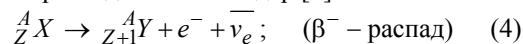
Принимая во внимание фундаментальный характер разработанной Энрико Ферми квантовой статистики, его высокий в современной физике профессиональный и физико-математический уровень и несмотря на его молодость (всего полных 25 лет) и соответственно малый срок работы (всего несколько лет) на учебно-научных должностях в учебных и научных заведениях Италии, он в ноябре 1926 года успешно прошел нелегкий конкурс и был избран на высокий пост профессора и одновременно на должность заведующего новой кафедрой теоретической физики в Римском университете.

### 3. РИМСКИЙ ПЕРИОД РАБОТЫ ФЕРМИ В БОЛЬШОЙ НАУКЕ

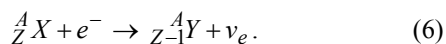
Став пожизненным руководителем важной кафедры Римского университета, молодой Э. Ферми сформулировал перед собой сложную организационную задачу: окружить себя адекватным научным окружением. Прежде всего, была явная необходимость иметь рядом с собой молодого и активного физика-экспериментатора. Им стал Франко Разетти, приобретший через несколько лет благодаря своим оригинальным научным работам мировую известность [1, 11]. Далее в научную группу Э. Ферми вошли Эдоардо Амальди, Эмилио Сегре и Бруно Понтекорво [11].

Этот коллектив молодых физиков в недалеком будущем и составил основной костяк итальянской школы современной теоретической и экспериментальной физики. Работая с 1926 по 1938 годы в г. Риме, Э. Ферми опубликовал здесь ряд важных оригинальных теоретических работ, в т. ч. [1, 10, 12]: статью "Статистический метод определения некоторых свойств атома" в области теории атома, связанную с развитием статистического метода Томаса – Ферми; статью "Квантовая теория излучения" в области квантовой электродинамики, посвященную простому изложению крайне трудного вопроса излучения твердым телом на основе квантовой теории поля; статью "О смещении высших спектральных линий под действием давления", направленную на развитие теории сверхтонкой структуры атомных спектров. В 1929 году Э. Ферми в возрасте 28 лет стал членом Итальянской Академии наук и был избран иностранным членом-корреспондентом Академии наук СССР [10]. С 1932 года Э. Ферми приступил к теоретическим и экспериментальным работам в трудной и перспективной области физики – в области ядерной физики.

**2. Теория бета-распада.** Это исследование явилось его вторым наиболее крупным научным вкладом в современную физику. Результаты данного теоретического исследования были опубликованы Э. Ферми в начале 1934 года в немецком научном журнале "Zeitschrift für Physik" в ставшей для последующих поколений физиков классической статье "К теории  $\beta$ -лучей" [1, 4, 11]. В данной статье Э. Ферми, в частности, говорил [11]: "...Мною предлагается количественная теория  $\beta$ -распада, основанная на существовании нейтрино. При этом испускание электронов и нейтрино рассматривается по аналогии с эмиссией светового кванта возбужденным атомом в теории излучения. Выведены формулы из времени жизни ядра и для формы непрерывного спектра  $\beta$ -лучей". Эта фундаментальная по характеру и значимости работа Э. Ферми согласно современной терминологии была связана с феноменологическим описанием при  $\beta^-$  распаде процесса радиоактивного распада атомных ядер вещества, при котором из ядра атома одновременно вылетает электрон  $e^-$  (бета-частица с отрицательным электрическим зарядом) и нейтральная частица-антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  (частица без заряда и массы покоя), а при  $\beta^+$  – распаде соответственно бета-частица с положительным электрическим зарядом  $e^+$  (позитрон) и нейтральная частица-нейтрино  $\nu_e$  (частица так же, как и антинейтрино, без заряда и массы покоя) [9]. С современных физических позиций для распадающегося исходного (материнского) ядра  ${}^A_Z X$  и образующегося в результате этого распада (дочернего) ядра  $Y$ , где  $Z$  – атомный номер ядра (порядковый номер химического элемента в периодической системе Д.И. Менделеева), а  $A$  – массовое число ядра ( $A = Z + N$ , для которого  $Z$  равно числу протонов, а  $N$  – числу нейтронов в ядре), возможны следующие схемы бета-распада атомных ядер [9]:

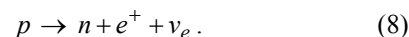
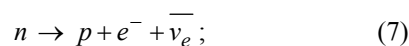


Явление  $\beta$ -распада ядра атома вещества возможно и при захвате материнским ядром электрона с ближайшей к нему электронной  $K$ -оболочки (случай электронного захвата), описываемое такой ядерной реакцией [2, 9]:



Напомним читателю и то, что первым, кто выдвинул гипотезу о существовании новой частицы-нейтрино при бета-распаде, был упомянутый нами выше В. Паули (1930 год). Само слово "нейтрино" (на итальянском языке *neutrino* – нечто маленькое нейтральное) в 1931 году предложил Э. Ферми, обсуждая с В. Паули нейтринную проблему. Понятие легкого нейтрино нам электрофизикам (да, наверное, всем поверхностно знакомым с ядерной физикой) не следует путать с другим важным понятием в ядерной физике – относительно тяжелой элементарной частицы нейтроном (от лат. *neutrum* – ни то, ни другое [13, 14]), который был экспериментально открыт английским физиком Джеймсом Чэдвиком позже в 1932 году [8]. Для полноты нашей "ядерной картины" следует указать и то, что элементарная частица позитрон  $e^+$  была открыта в 1932 году американским физиком Карлом Андерсеном при исследовании с помощью мощного магнитного поля космических лучей [11]. Насколько известно автору до настоящего времени существование в природе антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  опытным путем пока не подтверждено. Что касается нейтрино  $\nu_e$ , то эта элементарная частица была экспериментально обнаружена известными американскими физиками Клайдом Коуэном и Фредериком Рейнесом лишь в 1953 году [9].

Спектр энергий при бета-распаде ядер атома является непрерывным и принимающим значения от 0 до  $E_{\max}$ . Такой характер спектра объясняется тем, что в процессах радиоактивного  $\beta$ -распада ядер атомов вещества из них вылетают одновременно две частицы ( $e^-$ ,  $\bar{\nu}_e$  или  $e^+$ ,  $\nu_e$ ), между которыми и перераспределяется выделяемая из-за внутриядерных превращений энергия [9]. При большом количестве  $\beta$ -распадов одинаковых ядер, носящих статистический характер, происходит статистическое усреднение значений энергии в спектре, который в ядерной физике называют спектром электронного (позитронного)  $\beta$ -распада или просто  $\beta$ -спектром. Именно непрерывность  $\beta$ -спектра исторически и послужила первым доказательством существования элементарной частицы, названной Э. Ферми нейтрино. Что касается численных значений энергии  $E_{\max}$ , выделяющейся при одном акте  $\beta$ -распада, то она изменяется в достаточно широких пределах: от 20 кэВ для распада ядра трития  ${}^3_1H$  до 13,4 МэВ при распаде ядра изотопа бора  ${}^{12}_5B$  [2, 9]. Главной особенностью  $\beta$ -распада в ядрах атомов является то, что он является внутриядерным (внутриядерным) процессом, происходящим в результате  $\beta$ -переходов в отдельных нуклонах (нейтронах  $n$  и протонах  $p$ ) ядра. При этом рассматриваемые  $\beta$ -переходы в ядрах атомов протекают согласно нижеследующим схемам [9]:



Эти  $\beta$ -переходы (случайные взаимопревращения в ядре нейтронов  $n$  и протонов  $p$ ) вызывают перестройку внутренней структуры ядер атомов, так как при бета-распаде в них, как и для объектов макромира, выполняются законы сохранения энергии и импульса. Интересно отметить, что распад свободного протона  $p$ , то есть протона, не входящего в состав атомного ядра, согласно (8) по энергетическим соображениям невозможен (в связи с тем, что масса заряженного протона  $m_p = 1836 \cdot m_e$  оказывается меньше массы нейтрального нейтрона  $m_n = 1839 \cdot m_e$ , где  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [2, 9]). Поэтому свободный протон  $p$  является стабильной частицей. Для несвободного протона  $p$ , то есть протона, находящегося в ядре атома, указанное выше ограничение снимается. Свободный же нейтрон  $n$  нестабилен. Он, претерпев бета-распад, в соответствии с (7) самопроизвольно превращается в протон  $p$  с периодом полураспада 15 мин [9]. Важным обстоятельством для нас является и то, что в соответствии с имеющимися современными данными электроны  $e^-$  (позитроны  $e^+$ ) и антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  (нейтрино  $\nu_e$ ) не существуют в ядрах атомов сколько-нибудь долго в свободном состоянии. Они образуются непосредственно перед процессом  $\beta$ -распада ядер, сопровождающимся их вылетом за пределы атомного ядра [9].

Как видно из вышеизложенного, Э. Ферми своей теорией  $\beta$ -распада "вдохнул" новую жизнь в гипотезу существования нейтрино и осуществил определенное развитие протонно-нейтронной модели ядра атома вещества. К этому следует добавить то, что чуть раньше в мае 1932 года советский физик Д.Д. Иваненко в английском журнале "Nature" опубликовал свою статью, в которой высказал предположение о том, что нейтрон совместно с протоном являются основными структурными элементами ядра любого атома [11]. Кроме того, в июне 1932 года большую статью о протонно-нейтронной модели ядра атома опубликовал выдающийся немецкий физик-теоретик В. Гейзенберг [11]. Однако протонно-нейтронная модель ядра атома была встречена большинством известных физиков мира мягко сказать скептически, а некоторыми прямо "в штывки". Главным аргументом их служило то, что такая модель ядра противоречила экспериментально установленному факту: испусканию электронов ядрами при  $\beta$ -распаде. Выступая в сентябре 1933 года на весьма представительной международной конференции по ядру (г. Ленинград, СССР), наш молодой физик-теоретик Дмитрий Иваненко при энергичной защите предложенной им протонно-нейтронной модели ядра атома в своем докладе подчеркнул [11]: "...Появление электронов и позитронов следует трактовать как своего рода рождение частиц, по аналогии с излучением светового кванта, также не имевшего индивидуального существования до испускания из атома". Э. Ферми рассматриваемой нами в этом разделе очерка теорией бета-распада атомных ядер в 1934 году практически снял эти про-

тиворечия и укрепил позиции сторонников протонно-нейтронной модели ядра. Из истории развития физики явствует, что в дальнейшем протон  $p$  и нейтрон  $n$  стали рассматриваться как два состояния одной объединенной частицы – нуклона и некогда спорные идеи Д.Д. Иваненко и В. Гейзенберга об протонно-нейтронном устройстве ядра атома стали общепринятыми в ядерной физике [11].

После окончания Э. Ферми работ по  $\beta$ -распаду ядер научный мир облетела ошеломляющая новость: выдающиеся французские физики Фредерик Жолио-Кюри и Ирен Жолио-Кюри при облучении, в частности, бора  ${}_{11}^{11}B$  и алюминия  ${}_{13}^{27}Al$  тяжелыми  $\alpha$ -частицами (ядрами атома гелия  ${}_{2}^{4}He$ ) от полониевого источника  ${}_{84}^{209}Po$  получили новые радиоактивные изотопы азота  ${}_{7}^{13}N$  и фосфора  ${}_{15}^{30}P$ , которые испускали "положительные электроны" (позитроны  $e^+$ ) [1, 11]. В своем докладе в январе 1934 года на заседании Парижской Академии наук они сообщили об открытии ими нового вида радиоактивности и отметили [11]: "...В настоящей работе удалось впервые при помощи внешнего воздействия вызвать у некоторых атомных ядер радиоактивность, которая сохраняется в течение измеримого времени в отсутствие вынуждающей причины". Супруги Жолио-Кюри впервые в мире искусственным путем вызвали в ряде веществ радиоактивность и получили не наблюдаемые в природе изотопы. Напомним читателю, что изотопами называются атомные ядра с одинаковым числом  $Z$  (порядковым номером химического элемента, определяемым числом протонов в ядре), но с разными значениями их массового числа  $A$  [2, 9]. Это было важное открытие в области физики, получившее название "искусственная радиоактивность". Узнав об этом многообещающем открытии, Э. Ферми в марте 1934 года решил в своих ядерных опытах вместо использованных французскими учеными положительно заряженных альфа-частиц, отталкиваемых положительным зарядом атомных ядер вещества, при бомбардировке ядерных мишеней использовать относительно тяжелые нейтральные частицы – нейтроны  $n$ .

**3. Экспериментальные исследования по взаимодействию нейтронов с ядрами атомов.** Результаты этих фундаментальных работ явились третьим наиболее существенным вкладом Э. Ферми в физическую науку и его важным личным достижением как ученого. В качестве источника нейтронов  $n$  Э. Ферми и сотрудники его научной группы (к упомянутым нами выше членам этой группы теперь присоединился молодой итальянский радиохимик Оскар Д'Агостино, прошедший стажировку в парижской лаборатории выдающегося французского физика и химика, дважды лауреата Нобелевской премии Марии Кюри) была использована запаянная стеклянная ампула длиной 15 мм, содержащая порошок бериллия  ${}_{4}^{9}Be$  и радиоактивный радон  ${}_{86}^{222}Rn$  (эманацию радия  ${}_{88}^{226}Ra$ ) [1, 11]. Альфа-частицы, испускаемые в данной ампуле радонном, сталкиваясь с атомами бериллия и вызывали "рождение" нейтронов. Этот источник излучал около  $2 \cdot 10^7$  нейтронов в секунду. Безусловно, такое количе-

ство нейтронов было мало по сравнению с выходом "быстрых" нейтронов, получаемых в дальнейшем с помощью циклических ускорителей (циклотронов) заряженных частиц, бомбардирующих для получения нейтронов после своего ускорения соответствующие мишени [1, 11]. Кстати, первый циклотрон, ускоряющий протоны  $p$  до 1,2 МэВ, был построен в 1932 году в США под руководством известного американского физика Эрнеста Лоуренса, удостоенного в 1939 году за это крупное изобретение Нобелевской премии по физике [11]. Первые же опыты Э. Ферми с нейтронами показали, что при бомбардировке ими алюминия  ${}_{13}^{27}Al$  и фтора  ${}_{9}^{19}F$  получаются изотопы натрия и азота, испускающие электроны  $e^-$ , а не позитроны  $e^+$  (как у супругов Жолио-Кюри). Предложенный Э. Ферми метод бомбардировки ядерных мишеней нейтронами по сравнению с источниками  $\alpha$ -частиц и протонов  $p$  оказался более эффективным для осуществления достаточно широкого ряда ядерных реакций. Научной группе Э. Ферми за короткий срок удалось активировать (вызвать искусственную радиоактивность в ядрах) 37 из 63 изученных химических элементов из периодической системы элементов Д.И. Менделеева [1, 11]. Данными сотрудниками была предпринята попытка нейтронной бомбардировки и таких предварительно очищенных от обычных активных примесей тяжелых радиоактивных элементов как торий  ${}_{90}^{232}Th$  и уран  ${}_{92}^{238}U$ . При этом кроме усиления радиоактивности у этих элементов ими ничего другого нового установлено не было (хотя в действительности, в этих опытах Э. Ферми и его сотрудники просмотрели впервые в мире искусственно вызванную ими и весьма активно происходящую ядерную реакцию "деления" ядер тория и урана) [1, 11]. Как видим от возможных на научном пути просчетов, ошибок и просто "зевков" не застрахованы и великие люди, полностью отдающие себя науке. Позже после открытия при аналогичных экспериментальных условиях этой важнейшей для человечества (с позиций промышленной энергетики) ядерной реакции другими учеными Э. Ферми был крайне обескуражен и долго не находил себе "места" (всю оставшуюся жизнь он с досадой вспоминал те моменты интересной и напряженной работы в родном г. Риме с нейтронами и никак не мог простить себе такого "зевка").

Тем не менее, в октябре 1934 года Э. Ферми, благодаря проводимым его научной группой опытам с нейтронами, сделал фундаментальное открытие в физике, имевшее в недалеком будущем громадное значение для овладения человечеством ядерной энергией: открытие "медленных" нейтронов [1, 10, 11]. Поместив по его предложению между источником нейтронов и активируемой серебряной мишенью сначала парафин, а затем техническую воду, Э. Ферми и члены его группы констатировали усиление искусственно наведенной радиационной активности мишени в сотни раз. В совместной со своими сотрудниками статье "Влияние водородосодержащих веществ на радиоактивность, наведенную нейтронами", оперативно опубликованной осенью 1934 года в итальянском журнале "Ricerca scientifica", этому явлению было дано такое объяснение [1, 11]: "...Изложенные факты объясняются, по-видимому, тем, что нейтроны бы-

стро теряют энергию в ряде повторных столкновений с ядрами водорода. Сечение столкновения нейтрон-протон, вероятно, увеличивается с уменьшением их энергии". Теоретически Э. Ферми было показано, что в среде с высокой концентрацией водорода  ${}^1_1\text{H}$ , все ядра которого состоят из одного протона  $p$  по массе близкого к массе нейтрона  $n$ , "быстрый" нейтрон с начальной энергией порядка 1 МэВ примерно через 20 столкновений с атомами водорода будет иметь энергию, близкую к энергии его теплового движения (порядка 0,025 эВ [9]), и будет превращаться в тепловой или "медленный" нейтрон [1]. Так как ядерные реакции в мишени в случае воздействия на нее "медленных" нейтронов протекают с большим эффективным сечением радиационного захвата  $\sigma_{\text{зах}}$ , чем в случае "быстрых" нейтронов [1, 9, 11], то это и приводит к существенному увеличению радиационной активации мишени данными нейтронами. Эти исследования Э. Ферми показали большую эффективность "медленных" нейтронов при осуществлении ядерных превращений в веществе.

В октябре 1935 года Э. Ферми и его ближайшими сотрудниками (Э. Амальди, Б. Понтекорво, Ф. Разетти и Э. Сегре) был получен итальянский патент №324458 на "Способ получения радиоактивных веществ путем облучения нейтронами", в основе которого находился описанный выше эффект Ферми по усилению активации ядерных мишеней "медленными нейтронами" [1, 4]. Со временем этот патент был зарегистрирован и в ряде других ведущих стран мира. Забегая немного вперед, отметим, что владельцы этого патента после окончания Второй мировой войны могли претендовать на выплату серьезных денежных вознаграждений, поскольку "медленные нейтроны" стали активно "трудиться" (прежде всего, в США) в ядерных реакторах мирного (в установках для промышленного производства электрической энергии) и военного (в установках по производству ядерного горючего для атомного оружия) применения. Данный итальянский патент, по авторитетному мнению одного из его авторов, стал со временем основным изобретением в новой технологии ядерной энергетики [1].

Тем временем политическая обстановка как в Европе, так и в родной Италии ухудшалась. В Италии с ее мягким климатом и славными музыкальными традициями царил мрачный общеполитический и тяжелый китайский атмосфера. Его (Э. Ферми) не богатая природными, материальными и финансовыми ресурсами страна не прекращала подготовки к войне. К началу 1936 году немногочисленная научная группа Э. Ферми под суровыми жизненными ударами практически распалась: большинство ее членов разъехались по зарубежным университетам и рядом с ее руководителем остался лишь один Э. Амальди. С ним Э. Ферми к концу 1938 года выполнил ряд исследований и опубликовал результаты нескольких экспериментальных работ по поглощению и диффузии "медленных нейтронов". Так, в своей работе 1936 года "О поглощении и диффузии медленных нейтронов" они подтвердили открытое ранее в 1935 году группой советских ученых под научным руководством нашего выдающегося физика-ядерщика Игоря Курчатова резонансное поглощение нейтронов [1, 11]. При этом было установлено, что для их (нейтронов) определенных скоростей некоторые

химические элементы особенно сильно поглощают нейтроны. По воспоминаниям ученика Энрико Ферми и близкого ему по духу его друга Эмилио Сегре, получившего в 1959 году совместно с американским физиком Оуэном Чемберленом Нобелевскую премию за открытие антипротона, он был всегда далек от политики, он не любил тратить свои силы и энергию на то, что было не в его власти. Он стал в это тяжелое время еще более замкнутым, скрытным в общении и все меньше говорил о своих делах и творческих планах. И все это происходило на том общечеловеческом фоне, что он ведь и раньше не был склонен делиться своими сокровенными мыслями, касающимися научных или иных интересов [1].

10 ноября 1938 года Э. Ферми был уведомлен из г. Стокгольма (Швеция) о присуждении ему Нобелевской премии по физике за 1938 год. В соответствии с традиционным церемониалом 10 декабря 1938 года данную премию Э. Ферми в г. Стокгольме вручил шведский король Густав V. В зачитанном на церемонии официальном сообщении Нобелевского комитета по данному поводу нашему герою-лауреату, в частности, было сказано [1]: "Шведская королевская Академия наук присудила Вам Нобелевскую премию по физике 1938 года за Ваше открытие новых радиоактивных веществ по всей периодической системе элементов и за открытие селективной способности медленных нейтронов, сделанное Вами во время этих исследований...". По традиции в своей Нобелевской лекции Э. Ферми остановился на основных результатах всех своих римских экспериментальных исследований по нейтронам, заложивших основу для такого нового раздела физики как нейтронная физика.

Тем временем в Германии в декабре 1938 года немецкими учеными – физиком Отто Ханом и химиком Фрицем Штрассманом было сделано великое открытие: было определено установлено, что при облучении нейтронами природного урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , содержащего в малых количествах (не более 0,7% на единицу веса [1]) редкий изотоп урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , возникают радиоактивные изотопы бария  ${}^{140}_{56}\text{Ba}$  и лантана  ${}^{140}_{57}\text{La}$  [1, 9, 11]. Свою статью "О доказательстве возникновения щелочноземельных металлов при облучении урана нейтронами и их свойствах" О. Хан и Ф. Штрассман 22 декабря 1938 года послали в немецкий журнал "Naturwissenschaften" и в январе 1939 года она была опубликована [1, 11]. Узнав из письма О. Гана об этих результатах (еще до их опубликования), немецкий физик Лиза Мейтнер, работавшая в годы нацизма в Швеции, и ее племянник австрийский физик Отто Фриш, работавший в Дании у великого физика-теоретика Нильса Бора и пребывавший в это время на рождественских каникулах в г. Стокгольме, совместно пришли к выводу о том, что присутствие бария среди радиоактивных изотопов, образующихся при бомбардировке урана нейтронами, указывает на ядерную реакцию "деления" и раскалывание ядра атома урана на два больших осколка [1, 11]. Срочно возвратившись в г. Копенгаген, О. Фриш сразу же сообщил об этом открытии немецких ученых Н. Бору и тут же повторил ядерный эксперимент немецких коллег. Убедившись через несколько дней опытным путем в правильности своей интерпретации полученных О. Ханом и Ф. Штрассма-

ном результатов, Л. Мейтнер и О. Фриш 15 января 1939 года направили свое видение генезиса этой ядерной реакции в печать [1, 15]. В их-то работе и был впервые применен термин "деление" ядра урана нейтроном, заимствованный из биологии (по аналогии с понятием "деление" биологической клетки). Интересна реакция великого физика Н. Бора на данное ошеломляющее сообщение молодого и еще "неоперившегося" физика О. Фриша. По воспоминаниям самого О. Фриша после услышанного Н. Бор хлопнул себя по лбу и воскликнул [11, 15]: "О какие мы были дураки! Мы должны были заметить это раньше".

Обо всем этом сознательно уехавший с семьей из Швеции (после получения Нобелевской премии) и соответственно из Италии в США Э. Ферми узнал позже, вскоре после своего прибытия на теплоходе "Франкония" 2 января 1939 года в г. Нью-Йорк и устроился на работу в должности профессора физического факультета Колумбийского университета (об этой работе он договорился путем переписки по почте с руководством этого известного учебного заведения заранее, еще до поездки в Швецию на вручение премии). 16 января 1939 года с лекцией о достижениях современной физики в американском г. Принстоне выступил Н. Бор, поведавший слушателям о недавнем открытии в Европе ядерной реакции "деления" урана, вызванной воздействием на него потока нейтронов. На этой лекции присутствовал знаменитый в будущем американский физик Уиллис Лэмб (лауреат Нобелевской премии по физике 1955 года, прославился изучением эффекта "сдвига" энергетических уровней в атоме водорода [1, 11]), который тут же и передал эту важную научную новость уже известному в США мэтру итальянской физики Э. Ферми. Тем временем в Европе предвоенная "гонка" за "делением" урана набирала свои обороты. 30 января 1939 года Ф. Жолио-Кюри на заседании Парижской Академии наук сообщил об экспериментальном доказательстве расщепления ядер урана и тория под действием нейтронов [11]. 20 февраля 1939 года им для ведущих физиков Франции было продемонстрировано "деление" ядер урана методом камеры Вильсона, зафиксированное на фотопластинку. 8 марта этого же года его научная группа опубликовала статью в английском журнале "Nature", в которой сообщалось об испускании "быстрых вторичных" нейтронов при ядерном "взрыве" (Ф. Жолио-Кюри обычно употреблял термин "взрыв", а не "деление") урана. 7 февраля 1939 года Н. Бор опубликовал свою статью "Резонансные явления в расщеплении урана и тория", указывая в ней, что эффект "деления" урана связан с захватом нейтрона ядром редкого изотопа урана-235 или в современном обозначении изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  [11].

*Продолжение следует...*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сегре Э. Энрико Ферми – физик / Пер. с англ. под ред. академика Б.М. Потекорво.- М.: Мир, 1973.- 324 с.
- [2] Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.- М.: Мир, 1982.-520 с.
- [3] Fermi E. The Collected Papers.- Chicago, vol.1, 1962.- 414 p.
- [4] Ферми Э. Научные труды.- М.: т.1, 1971.- 415 с.
- [5] Schrödinger E. Quantisierung als Eigenwertproblem// Annalen der Physik.-1926.-№79.-S.489-527; 1926.-№79.-S.734-757; 1926.-№80.-S.437-491; 1926.-№81.-S. 109-140.
- [6] Fermi E. The Collected Papers. - Chicago, vol.2, 1965.- 355 p.
- [7] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.- 624 с.
- [8] Баранов М.И. Эрвин Шредингер и новые пути развития физической науки микромира // Электротехника і електромеханіка.-2006.- №4.- С. 5-15.
- [9] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.-864с.
- [10] Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель.- М.: Типография б-ки им. В.И. Ленина, 1958.- 435 с.
- [11] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.- М.: Просвещение, 1974.- 312 с.
- [12] Вигнер Е. Этюды о симметрии.- М.: Мир, 1971.- 199 с.
- [13] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004. - 957 с.
- [14] Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества.- М.: Просвещение, 1977.- 160 с.
- [15] Frish O. Niels Bohr.-New York, S. Rozental, 1967.- p.137.
- [16] Волкогонов Д.А. Триумф и трагедия / Политический портрет И.В. Сталина.- М.: Новости (АПН), кн. 2, 1990.- 688 с.
- [17] Патент США №2708656. Нейтронный реактор / Ферми Э., Сцилард Л.
- [18] Патент США №2768134. Испытание материалов в нейтронном реакторе / Ферми Э., Андерсен Г.
- [19] Патент США №2780595. Экспоненциальный котел / Ферми Э.
- [20] Патент США №2807727. Защита нейтронного реактора/ Ферми Э., Зинн У.
- [21] Патент США №2837477. Система цепной реакции / Ферми Э., Леверетт М.К.
- [22] Патент США №2836554. Нейтронный реактор, охлаждаемый воздухом/ Ферми Э., Сцилард Л.
- [23] Патент США №2813070. Метод испытания нейтронной системы на цепной реакции/ Ферми Э., Леверетт М.К.
- [24] Патент США №2807581. Нейтронный реактор/ Ферми Э., Сцилард Л.
- [25] Патент США №2852461. Нейтронный реактор/ Ферми Э., Зинн У.
- [26] Патент США №2931762. Нейтронный реактор / Ферми Э.

*Поступила 29.01.2007*