

АЭС, как статические, так и плавучие, не являются единственным типом атомных станций, использующих энергию цепной реакции деления ядер урана для преобразования в другие виды энергии. Другой разновидностью атомных станций являются атомные теплоэлектроцентрали (АТЭЦ) и плавучие атомные теплоэлектростанции (ПАТЭС). Сравнительная характеристика АЭС, АТЭЦ и ПАТЭС представлена в таблице 5.

Т а б л и ц а 5 — Сравнительная характеристика АЭС, АТЭЦ и ПАТЭС

Показатель	АЭС	АТЭЦ, ПАТЭС
Какая энергия вырабатывается	Электрическая и тепловая	Электрическая и тепловая
Какая энергия при этом доминирует	Электрическая (тепловая используется для собственных нужд или передается на небольшие расстояния)	Тепловая
Примеры статических установок	Ленинградская АЭС, Белоярская АЭС	Билибинская АТЭЦ (Билибинская АЭС)
Примеры плавучих установок	Sturgis (1968—1975 гг., обслуживание Панамского канала), производство США	ПАТЭС «Академик Ломоносов» (с 2020 г.)

Заключение. Предложенные рисунок и таблицы могут быть использованы в образовательном процессе в качестве дополнения к опорным конспектам при изучении темы «Основы ядерной энергетики» в рамках дисциплин «Основы энергосбережения», «Физика атомного ядра и элементарных частиц», «Радиационная безопасность». В силу того, что обсуждаемая тема относится к бурно развивающимся отраслям науки и промышленности, подходы к структуризации соответствующих сведений (в том числе к подборам вопросов для различных сравнительных характеристик) могут быть самыми разнообразными, в связи с чем открываются широкие возможности для творческой деятельности методического характера со стороны как преподавателей, так и учащихся.

Список цитируемых источников

1. Kuroda, P. K. On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals / P. K. Kuroda // J. of Chemical Physics. — 1956. — Vol. 25. — P. 781—782, 1295—1296.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики: учеб. пособие : в 3 т. / И. В. Савельев. — М. : Наука, 1987. — Т. 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. — 320 с.
3. Титаева, Н. А. Ядерная геохимия : учебник. / Н. А. Титаева. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Изд-во МГУ, 2000. — 336 с.
4. Экспериментальные методы нейтронных исследований : учеб. пособие для вузов / Е. А. Крамер-Агеев [и др.] — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 272 с.
5. Деметьев, Б. А. Ядерные энергетические реакторы. / Б. А. Деметьев. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 351 с.
6. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. / Г. Г. Бартоломей [и др.] ; под ред. Г. А. Батя. — М. : Энергоатомиздат, 1982. — 511 с.
7. Angelo, Joseph A. Nuclear technology. / Joseph A. Angelo. — USA : Greenwood Press, 2004. — 647 p.
8. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров ; редкол.: Д. М. Алексеев [и др.]. — М. : Большая рос. энцикл., 1994. — Т. 4 : Пойнтинга — Робертсона — Стримеры. — 704 с.
9. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров ; редкол.: Д. М. Алексеев [и др.]. — М. : Большая рос. энцикл., 1998. — Т. 5 : Стробоскопические приборы — Яркость. — 691 с.

УДК 372.853+539

А. И. Серый

учреждение образования «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина», Брест, Республика Беларусь

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТАБЛИЦ И СХЕМ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕМЫ «БЕТА-РАСПАД» В КУРСЕ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Введение. Раздел «физика атомного ядра и элементарных частиц» является неотъемлемой частью школьного и вузовского курсов физики. При этом в случае вузовского курса изложение ряда вопросов довольно сложно для восприятия как с точки зрения логики рассуждений, так и с точки зрения математических расчетов (особенно при сравнении курсов общей и теоретической физики). Это касается, в частности, темы «бета-распад» [1, с. 190—195, 560—561].

В связи с постепенным сокращением аудиторных часов, отводимых на изучение физики атомного ядра и элементарных частиц, а также с наличием тенденции к ослаблению уровня подготовки студентов, появляется необходимость поиска путей повышения: а) компактности изложения учебного материала; б) четкости логической структуры. Один из допустимых вариантов решения поставленной задачи предполагает использование схем, а также параллелей (аналогий) между идентичными вопросами в виде сопоставительных таблиц. При этом таблицы и схемы призваны не заменять существующие учебные пособия, а дополнять их.

Основная часть. Рассмотрим примеры таблиц и схем, относящихся к теме «бета-распад».

В таблице 1 каждый показано место бета-распада среди всевозможных типов бета-превращений, обнаруженных экспериментально. При этом использованы обозначения: A — атомное ядро или его массовое число, Z — зарядовое число ядра, N — количество нейтронов в ядре, e^- — электрон, e^+ — позитрон, ν_e — нейтрино, $\bar{\nu}_e$ — антинейтрино.

Т а б л и ц а 1 — Разновидности бета-превращений (бета-процессов)

Классификационный признак	Сущность различия	Примеры бета-процессов с увеличением заряда ядра		Примеры бета-процессов с уменьшением заряда ядра	
		А	Б	А	Б
Количество участвующих заряженных лептонов	А. Два (двойные бета-процессы) заряженных лептона. Б. Один заряженный лептон (обычные бета-процессы)	Двойной электронный бета-распад $A(Z, N) \rightarrow$ $\rightarrow A(Z+2, N-2) +$ $+2e^- + 2\bar{\nu}_e$	*	**	*
Прямые и обратные процессы	А. Лептоны только испускаются Б. Лептоны не только испускаются, но и поглощаются	Электронный бета-распад, двойной (см. выше) и обычный $A(Z, N) \rightarrow$ $\rightarrow A(Z+1, N-1) +$ $+e^- + \bar{\nu}_e$	Обратный электронный бета-распад $\nu_e + A(Z, N) \rightarrow$ $\rightarrow A(Z+1, N-1) +$ $+e^-$	1) Позитронный бета-распад $A(Z, N) \rightarrow A(Z-1, N+1) +$ $+e^+ + \nu_e$ 2) обратный позитронный бета-распад $\bar{\nu}_e + A(Z, N) \rightarrow A(Z-1, N+1) +$ $+e^+$	Электронный захват (K -, L - и т. д.) $e^- + A(Z, N) \rightarrow$ $\rightarrow A(Z-1, N+1) +$ $+ \nu_e$

Примечание. * — примеры смотри ниже в таблице 1; ** — примеров, подтвержденных экспериментально, нет.

Сведения из таблицы 1 можно структурировать и в виде схемы, представленной на рисунке 1.

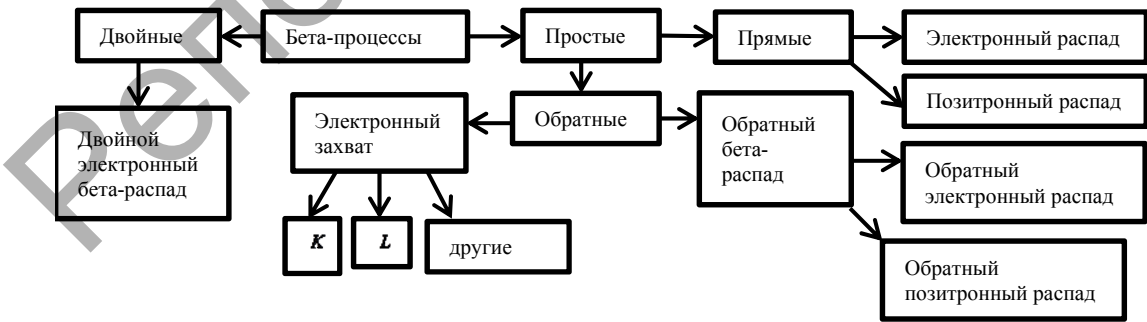


Рисунок 1 — Иной подход к классификации бета-процессов

Основные этапы истории становления теории бета-распада в контексте истории развития теории слабого взаимодействия представлены в таблице 2.

Разновидности обычных бета-распадов в соответствии с основными классификационными признаками представлены в таблице 3.

Т а б л и ц а 2 — Основные этапы истории развития теории бета-распада в контексте истории развития теории слабого взаимодействия

Этап развития теории слабого взаимодействия	Год	Авторы	Характер взаимодействия	Описываемые процессы помимо бета-распада	Замечание о гамильтониане в теории бета-распада
1. Создание теории Ферми после выдвижения гипотезы о существовании нейтрино	1934	Э. Ферми	Точечный, векторный, четырех-фермионный	Нет, теория объясняет только бета-распад	Гамильтониан имеет наиболее простую структуру
2. Усовершенствование теории после открытия странных частиц и несохранения протранственной четности, а также исследования: а) корреляций между направлениями вылета нейтрино и электронов; б) угловых распределений электронов и нейтрино при распаде поляризованных нейтронов	1958	Р. Фейнман, М. Гелл-Ман	Точечный, аксиально-векторный, четырех-фермионный	Другие процессы с участием слабого взаимодействия	Структура гамильтониана усложняется, хотя по-прежнему содержит произведение нуклонного и лептонного токов
3. Объединение слабого и электромагнитного взаимодействий	1967	С. Вайнберг, Ш. Глэшоу, А. Салам	Обменный	Другие процессы с участием слабого взаимодействия	Поскольку энергия покоя заряженных векторных бозонов весьма велика по сравнению с энергией бета-распада, для объяснения последнего все равно удобнее перейти к теории Фейнмана—Гелл-Мана

Т а б л и ц а 3 — Разновидности обычных бета-распадов в соответствии с основными классификационными признаками

Фактор, влияющий на период полураспада $T_{1/2}$	Является ли классификационным признаком	К каким бета-распадам (БР) относится	Примечание
1. Орбитальный момент L , уносимый лептонной парой	Да	Ко всем	БР делятся на разрешенные ($L = 0$) и запрещенные ($L \neq 0$)
2. Изменение спина ядра ΔS (и, соответственно, спин, уносимый лептонной парой)	Да	К разрешенным	БР делятся на фермиевские ($\Delta S = 0$) и гамов-теллеровские ($\Delta S = 1$)
3.1. Степень перекрытия волновых функций начального и конечного ядра	Да	К разрешенным	БР делятся на сверхразрешенные (высокая степень перекрытия волновых функций; например, переходы между аналоговыми состояниями ядер) и затрудненные (малая степень перекрытия волновых функций; например, переходы между состояниями, принадлежащими разным изомультиплетам)
3.2. Степень малости матричного элемента (и максимально возможное изменение полного момента ядра $\Delta I_{\max}$)	Да	К запрещенным	БР делятся на обычные и уникальные ($\Delta I_{\max}$ на единицу больше) первого, второго и т. д. запретов
4. Энергия бета-распада E_0	Да (условно)	Ко всем (вероятность распада в единицу времени w пропорциональна E_0^5)	Поскольку E_0 меняется в пределах от 2,64 кэВ до 13,43 МэВ (а $T_{1/2}$ — от 10^{-2} с до 10^{16} лет), изотопы можно разделить на короткоживущие, со средним временем жизни и долгоживущие

Схема вычисления $T_{1/2}$ представлена в общем виде на Рис. 2. Основные сведения могут быть взяты из [2, с. 554—556] Более конкретный вид окончательной формулы зависит от: а) количества каналов распада (нумеруются индексом j); б) выражений для волновых функций начального (Ψ_{in}) и конечного ($\Psi_{fin}^{(j)}$) состояния ядра; в) выражения для волновой функции электрона или позитрона $\Psi_e^{(j)}$, причем заметное влияние здесь оказывает также внешнее магнитное поле [3, с. 426—436] (структура волновой функции нейтрино или антинейтрино $\Psi_\nu^{(j)}$ не меняется, может меняться лишь значение энергии $E_\nu^{(j)}$ в зависимости от канала распада).

На рисунке 2 приняты следующие обозначения (помимо перечисленных выше): τ — среднее время жизни ядра в начальном состоянии, t — текущий момент времени, x — пространственные координаты, k —

модуль волнового вектора электрона или позитрона, χ — модуль волнового вектора нейтрино или антинейтрино, $\vec{\sigma}$ — тройка матриц Паули, E_{in} — энергия системы в начальном состоянии, $E_{fin}^{(j)}$ — энергия системы в конечном состоянии, f — константа слабого взаимодействия, i — мнимая единица, $\hbar$ — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, L — нормировочная длина, b — нормировочная константа в $\Psi_\nu^{(j)}$.

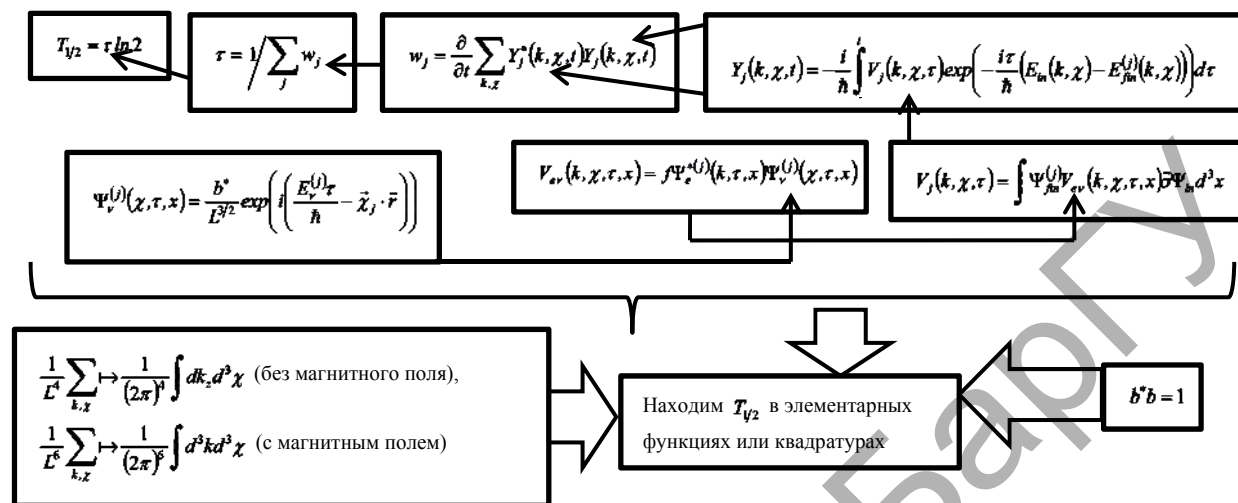


Рисунок 2 — Схема вычисления периода полураспада в общем виде

Заключение. Предложенные таблицы и рисунки могут быть использованы в образовательном процессе в качестве дополнений к опорным конспектам, в том числе при подготовке к экзамену по дисциплине «Физика атомного ядра и элементарных частиц» (для физических специальностей) или по дисциплине «Физика» для нефизических специальностей (если столь углубленное изучение обсуждаемой темы предусмотрено учебными программами). Учащиеся могут пробовать также самостоятельно составлять подобные схемы и таблицы по отдельным вопросам курса «Физика атомного ядра и элементарных частиц» на основе материала существующих учебных пособий. Следует, однако, признать, что уровень подготовки большинства современных студентов вынуждает отнести подобные задания к категории сложных и сверхсложных.

Список цитируемых источников

1. Физическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. А.М. Прохоров ; редкол. Д. М. Алексеев [и др.]. — М. : Совет. энцикл., 1988. — Т. 1. Ааронова–Боме эффект — Длинные линии. — 704 с.
2. Квантовая механика / А. А. Соколов [и др.]. — М. : Учпедгиз, 1962. — 591 с.
3. Серый, А. И. О вероятности распада связанного синглетного состояния двух протонов в квантующем магнитном поле в модели параболического потенциала / А. И. Серый // Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.] : матеріали XXII міжнар. наук.-практич. інтернет-конф. (м. Київ, 19 лист. 2021 р.). — Київ, 2021. — 537 с. — С. 426–436.

УДК 620.92

А. П. Цыкман, М. Е. Шудельский, Г. В. Качкар

Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Республика Беларусь

СОЛНЕЧНАЯ БАТАРЕЯ — АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Введение. Солнечная энергетика — нетрадиционная энергетика, основанная на преобразовании солнечного излучения в другие виды энергии. В основе преобразования солнечного излучения лежит фотоэлектрический эффект. Фотоэффект — это испускание электронов веществом при поглощении им квантов электромагнитного излучения [1].

Основная часть. Ключевым элементом солнечной батареи является фотоэлемент (кремниевый фотогальванический), который преобразует видимый солнечный свет, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение в электричество.