



БЕТА-РАСПАД

Авторы: Ю. В. Гапонов

БЕТА-РАСПАД (

β -распад) ядер, радиоактивный распад основных или возбуждённых состояний ядер, при котором происходит рождение электрона

e^- и электронного антинейтрино

ν_e (электронный Б.-р.,

β^- -распад) или позитрона

e^+ и электронного нейтрино (позитронный Б.-р.,

β^+ -распад). При этом заряд распадающегося ядра изменяется на одну элементарную

единицу заряда (увеличивается при электронном распаде и уменьшается при

позитронном распаде):

$$A(Z, N) \rightarrow A(Z \pm 1, N \mp 1) + e^{-(+)} + \nu_e(\bar{\nu}_e).$$

Здесь

A – массовое число,

Z – заряд ядра,

N – число нейтронов. Электрон или позитрон, испускаемый при Б.-р., называется [бета-частицей](#).

Процесс Б.-р. является наиболее распространённым видом радиоактивности и имеет место во всех областях масс ядер – от лёгких (

H_3) до тяжёлых (напр.,

No_{261}).

Б.-р. ядер, называвшийся первоначально процессом «испускания бета-лучей», открыт

А. [Беккерелем](#) в 1896 в цепочке радиоактивных превращений урана. В 1899

установлено, что «бета-лучи» состоят из быстрых электронов и в магнитном поле

отделяются от др. видов радиоактивных излучений. В 1930 В. [Паули](#) предположил, что

в Б.-р. одновременно с электроном рождается очень лёгкая нейтральная частица – нейтрино.

Теория бета-распада

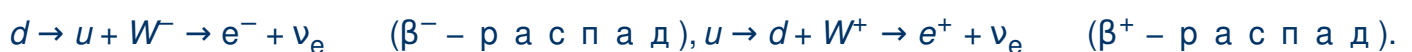
Теоретич. описание Б.-р. ядер было развито Э. Ферми (1933), который ввёл важнейшую характеристику – фермиевскую константу взаимодействия

G_F , через которую определяется абсолютная величина времени жизни ядер по отношению к Б.-р. Одновременно Э. Ферми вычислил форму бета-спектра электронов распада в простейшем случае разрешённых бета-переходов (т. н. фермиевская форма бета-спектра).

В 1956 было обнаружено, что при Б.-р. происходит нарушение закона сохранения квантового числа чётности (Цзундао Ли, Чжэньнин Янг), и вскоре было установлено, что в Б.-р. дают вклад два варианта слабого взаимодействия: векторный, по своей структуре аналогичный электромагнитному взаимодействию, и аксиально-векторный, отличающийся от векторного изменением чётности.

Полное описание процессов Б.-р. даётся стандартной моделью электрослабого взаимодействия, в рамках которой механизм Б.-р. во многом напоминает механизм электромагнитного взаимодействия нуклонов с электронами, при котором ядерный нуклон испускает виртуальный гамма-квант нулевой массы, поглощаемый затем электроном. Аналогично этому в процессе ядерного Б.-р. один из кварков, входящих в состав нуклона ядра (нейтрона или протона), виртуально испускает тяжёлый заряженный

W -бозон (с массой ок. 82 ГэВ), который распадается затем на пару электрон–antineйтрино (электронный распад) или позитрон–нейтрино (позитронный распад):



Константа слабого взаимодействия, определяющая характеристики Б.-р., – константа Ферми – имеет величину

$G_F = (1,4173 \pm 0,0011) \cdot 10^{-62} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$ и в рамках стандартной модели оказывается связанной с константой электромагнитного взаимодействия и массой

W -бозона.

Характеристики бета-распадов

Осн. эксперим. характеристиками Б.-р. являются: период полураспада

$T_{1/2}$ (или время жизни

$\tau = T_{1/2}/\ln 2$) и энергетич. спектр электронов (позитронов) распада. Период полураспада стандартно задаётся величиной

$fT_{1/2}$, где

f – т. н. фермиевская функция, учитывающая влияние кулоновского поля ядра в процессе вылета электрона (позитрона) и зависящая от заряда ядра, энергии электрона (позитрона) и квантовых характеристик ядра. Её значения табулируются.

В отличие от альфа- и гамма-излучений энергетич. спектр электронов (позитронов) Б.-р. является непрерывным: он начинается от нуля и продолжается до верхней границы, которая по закону сохранения энергии равна разности полных энергий начального и конечного ядер (минус энергии покоя электрона и нейтрино).

Классификация бета-переходов

В соответствии с правилами отбора бета-переходов, задающими изменение квантовых чисел полного момента

J ядра и его чётности

π при переходе из начального состояния ядра в конечное, процессы Б.-р. разделяются на фермиевские (учитывающие вклад от фермиевской части взаимодействия), гамов-теллеровские (от аксиально-векторной части взаимодействия) и смешанного типа.

Кроме того, они дополнительно классифицируются по степени запрещённости, при этом различают бета-переходы:

сверхразрешённые

$[0^+ \rightarrow 0^+ J_{\text{нач}}^{\pi} \rightarrow J_{\text{кон}}^{\pi}, \Delta J = 0, \text{ чётность не меняется,}$

$\lg fT_{1/2} \leq 3,6];$

разрешённые (

$\Delta J = 0, 1, \text{ чётность не меняется,}$

$\lg fT_{1/2} \geq 4-6);$

запрещённые 1-го запрета (

$\Delta J = 0, 1, 2$, чётность меняется,

$\lg T_{1/2} \approx 6-9$);

запрещённые 2-го запрета (

$\Delta J = 1, 2, 3$, чётность не меняется,

$\lg T_{1/2} \approx 9-13$) и т. д.

Важным примером бета-переходов являются сверхразрешённые бета-переходы $0^+ \rightarrow 0^+$, зависящие только от фермиевского типа взаимодействия, изучение которых позволяет с большой точностью измерять фермиевскую константу G_{F} .

Бета-спектроскопия

Спектры сверхразрешённых и разрешённых бета-переходов имеют универсальную фермиевскую форму; форма спектра для остальных переходов зависит от степени запрещённости. В разрешённых бета-переходах передачи орбитального момента от нуклонов к лептонам не происходит, в случае запрещённых переходов передаётся орбитальный момент

$L = 1, 2, \dots$, который и указывается степенью запрещённости.

Исследование формы бета-спектра электронов распада вблизи его верхней границы даёт важную информацию о массе нейтрино, испускаемого в процессе распада. В экспериментах с Б.-р. тяжёлого изотопа водорода – трития – получено рекордное ограничение на массу электронного нейтрино:

$\nu_e \leq 2$ эВ.

Эксперим. исследования Б.-р. проводятся с помощью бета-спектрометров разл. типа.

Прецизионные измерения бета-спектров выполняются магнитными спектрометрами.

Более широкое применение находят спектрометры из полупроводниковых детекторов, поскольку они позволяют работать со значительно более слабыми и короткоживущими источниками.

В совр. исследованиях особое место занимает изучение [бета-распада нейтрона](#) как простейшего элементарного процесса Б.-р., на основе которого описываются процессы

бета-распада в сложных ядрах.

Двойной бета-распад

Особую роль играет изучение процессов двойного Б.-р. двухнейтринного и безнейтринного типов:

$A(Z, N) \rightarrow A(Z \pm 2, N \mp 2) + 2e^{-(+)} + 2\nu_e(\bar{\nu}_e)$ (двухнейтринный 2β -распад);

$A(Z, N) \rightarrow A(Z \pm 2, N \mp 2) + 2e^{-(+)}$ (безнейтринный 2β -распад).

Процессы первого типа разрешены в рамках стандартной модели, обнаружены экспериментально и характеризуются экстремально большими временами жизни (период полураспада

$T_{1/2} \approx 10^{18} - 10^{22}$ лет). Процессы второго типа описываются теоретическими моделями, выходящими за рамки стандартной модели, и зависят от средней массы нейтрино. В настоящее время активно проводится поиск таких процессов в ряде конкретных ядер с целью экспериментального определения массы нейтрино. Обнаружение таких эффектов означало бы, что масса нейтрино отлична от нуля и существуют явления, лежащие вне рамок стандартной модели и требующие для своего объяснения развития новой теории.

Обратные бета-процессы

Помимо Б.-р. наблюдается ряд обратных ему процессов: [электронный захват](#) (захват электронов с

K-,

L- и др. электронных оболочек атомов, в физике звёзд – урка-процесс захвата электронов ядрами при больших плотностях вещества), реакции обратного Б.-р. в нейтринных (антинейтринных) пучках реакторного, ускорительного или солнечного происхождения, а также в нейтринных потоках, образующихся при взрывах сверхновых звёзд. Исследование реакций обратного Б.-р. на нейтринных потоках от реактора впервые показало, что нейтрино отличается от антинейтрино (Р. [Дейвис](#), 1956–59), а на

ускорителях – что существуют во всяком случае два типа нейтрино – электронное и мюонное. В кон. 1970-х гг. с использованием нейтрино от ускорителей было доказано также существование тауонного нейтрино. Эксперименты по измерению нейтринных потоков от Солнца и реакторов с помощью процессов обратного Б.-р. привели в 2001–04 к открытию [нейтринных осцилляций](#), которые не находят объяснения в стандартной модели электрослабого взаимодействия и требуют дальнейшего развития теории.

Литература

Лит.: Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия. М., 1969. Вып. 4; Валантэн Л. Субатомная физика: ядра и частицы: В 2 т. М., 1986; Гротц К., Клапдор-Клайнротхаус Г. В. Слабое взаимодействие в физике ядра, частиц и астрофизике. М., 1992.

Processing math: 100%