

период полураспада радиоактивного элемента, тем больше пробег испускаемых им α -частиц. Закон Гейгера — Нэттола выражается формулой

$$\text{или} \quad \ln R = A' \ln \lambda + B', \quad (17.12)$$

$$\ln \lambda = A + B \ln R, \quad (17.13)$$

где A' , B' , A и B — эмпирические константы.

7. Более точные исследования показали, что у каждого α -излучающего ядра могут существовать несколько групп «моноэнергетических» α -частиц. Разброс энергий α -частиц внутри каждой группы очень мал. Оценку степени неоднородности α -частиц по энергиям можно произвести с помощью соотношения неопределенностей (12.15). Если обозначить через ΔW разброс энергий α -частиц, а через Δt — время, в течение которого происходит их испускание, то согласно (12.15) $\Delta W \sim \frac{\hbar}{\Delta t}$.

Для радиоактивных элементов с наименьшим периодом полураспада $\Delta t \approx 10^{-4}$ с, откуда $\Delta W \approx 10^{-20}$ Дж. Эта величина значительно меньше разности энергий α -частиц, принадлежащих различным «моноэнергетическим» группам.

Экспериментальные данные о наличии у одного и того же α -радиоактивного элемента нескольких групп α -частиц с различными R_0 и постоянство длин пробегов для каждой такой группы показывают, что выбрасываемые из ядер α -частицы обладают определенным «спектром» энергий и, следовательно, атомные ядра обладают дискретными энергетическими уровнями.

§ 17.6. Гамма-излучение

1. Гамма-излучение не вызывает изменения заряда и массового числа ядер, а поэтому не описывается никакими правилами смещения. Установлено, что γ -лучи как самостоятельный вид естественной радиоактивности не встречаются и обычно сопровождают α - и β -распады. Опытным путем установлено, что γ -лучи испускаются материнским, а дочерним ядром, которое в момент своего образования оказывается возбужденным и обладает избыточной энергией по сравнению с обычным, нормальным энергетическим состоянием ядра. За весьма малое время (порядка 10^{-13} — 10^{-14} с), значительно меньшее, чем время жизни возбужденного атома ($\sim 10^{-8}$ с), дочернее ядро переходит в нормальное или менее возбужденное состояние и при этом испускает γ -излучение, имеющее дискретный, линейчатый спектр.

2. Указанные выше свойства γ -излучения ядер были доказаны при изучении явления **внутренней конверсии γ -лучей**. Так называется явление фотоэффекта на электронах внутренних оболочек атома под действием γ -лучей, испускаемых его ядром. Электроны, которые образуются в результате такого внутриатомного фотоэффекта, называются **конверсированными или электронами конверсии**. В ряде случаев вся энергия γ -излучения расходуется на явление внутренней конверсии и

тогда вместо γ -лучей могут наблюдаться лишь электроны конверсии. Энергия $e\varphi$ фотоэлектрона конверсии связана с энергией $h\nu$ γ -фотона уравнением (11.2) Эйнштейна для фотоэффекта.

$$e\varphi_n = h\nu - A_n,$$

где A_n — работа выхода электрона с n -й электронной оболочки атома, равная энергии электронов, находящихся на определенных энергетических уровнях в атоме. Энергии электронов, находящихся на этих уровнях, известны из данных о характеристических рентгеновских спектрах атомов. Гамма-фотон, обладающий большой энергией $h\nu$, может удалить электрон из любой внутренней оболочки (K -, L -, M -оболочки и т. д.) Поэтому энергии $e\varphi_n$ электронов конверсии выражаются следующим образом:

$$e\varphi_L = h\nu - A_L; e\varphi_M = h\nu - A_M; e\varphi_N = h\nu - A_N \text{ и т. д.}, \quad (17.14)$$

где A_L, A_M, A_N — энергии рентгеновских уровней атома.

3. Очевидно, что атом, ядро которого испускает γ -фотон, должен благодаря внутренней конверсии испускать одновременно характеристические рентгеновские излучения. Действительно, в результате конверсии атом теряет электроны из внутренних оболочек, на их место переходят электроны с внешних оболочек, что сопровождается излучением линий рентгеновского характеристического спектра (см § 14.11). Измерения энергии конверсированных электронов и весьма точные данные об энергиях рентгеновских уровней в атомах позволяют, во-первых, убедиться в том, что ядро может испускать определенный ряд монохроматических γ -лучей, т. е. что γ -излучение обладает линейчатым спектром. Во-вторых, при рассмотрении соотношений (17.14), если считать известными значения всех входящих в них величин, можно убедиться в том, что γ -лучи испускаются не материнским, а дочерним ядром в момент его образования.

4. Наличие дискретного, линейчатого спектра γ -излучения, как и существование определенных энергий α -частиц, выбрасываемых ядрами, имеет принципиальное значение и является доказательством того, что атомные ядра могут находиться в определенных дискретных энергетических состояниях.

Энергия γ -фотона может быть записана следующим образом.

$$h\nu_{ik} = W_i - W_k, \quad (17.15)$$

где ν_{ik} — частота γ -фотона, соответствующего переходу ядра из состояния с энергией W_i в состояние с энергией W_k . Измерения энергии γ -фотонов показывают, что разность $W_i - W_k$ в большинстве случаев имеет порядок величины 0,1 МэВ. Это означает, что γ -лучи являются весьма коротковолновым электромагнитным излучением с длиной волны, не превышающей 10^{-11} м, т. е. 0,1 Å. С другой стороны, это показывает, что энергетические уровни в ядрах весьма раздвинуты друг от друга. Разность энергий ближайших уровней в ядре значительно превышает разность энергий ближайших электронных уровней в атоме.

5. На большой проникающей способности γ -излучения основана **гамма-дефектоскопия** — метод обнаружения дефектов в изделиях путем просвечивания их γ -лучами, широко применяемый в промышленности и строительстве (металлургия, судостроение и т. д.). Различные местные повреждения в сварных швах, металлических отливках и других объектах обнаруживаются по различной интенсивности γ -излучения, прошедшего через исследуемые тела. В зависимости от состава, толщины, плотности и других свойств просвечиваемого изделия изменяется интенсивность γ -излучения, достигшего приемника, поставленного за объектом. Таким методом определяют местоположение, размеры и формы дефектов (трещины, раковины, непроваренные швы и т. п.).

6. Действие на вещество γ -излучения и других видов ионизирующих излучений оценивается **дозой излучения D** . Так называется величина, равная отношению энергии излучения к массе облучаемого вещества.

Единицей дозы является джоуль на килограмм (Дж/кг). Это доза излучения, при которой массе в 1 кг облученного вещества передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Эта единица называется грей (Гр).

Внесистемная единица дозы — рад, $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 10^{-2} \text{ Гр}$.

Мощностью N дозы излучения называется доза D , отнесенная к единице времени: $N = D/t$

Единицей мощности дозы является ватт на килограмм (Вт/кг или Гр/с).

7. Энергетической характеристикой излучения, оцениваемой по ионизации сухого атмосферного воздуха, является **экспозиционная доза излучения D_3** . Единицей ее служит кулон на килограмм (Кл/кг) — экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой сумма электрических зарядов ионов одного знака, созданных электронами, освободившимися в облученном воздухе массой в 1 кг при полном использовании ионизирующей способности, равна 1 Кл.

Внесистемной единицей экспозиционной дозы служит рентген (Р):

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$

При экспозиционной дозе, равной 1 Р, в 10^{-6} м^3 сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении возникает суммарный заряд ионов одного знака, равный $\frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$

Мощность экспозиционной дозы $N_3 = D_3/t$ выражается в амперах на килограмм (А/кг). Это мощность экспозиционной дозы электромагнитного излучения, при которой за время в 1 с экспозиционная доза возрастает на 1 Кл/кг.

Внесистемные единицы мощности экспозиционной дозы: $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$; $1 \text{ Р/мин} = 4,30 \cdot 10^{-6} \text{ А/кг}$; $1 \text{ Р/ч} = 7,17 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$.

8. Доза излучения может быть оценена по ее биологическому воздействию. Для этой цели вводится **биологический эквивалент рентгена**

(бэр). Так называется поглощенная энергия излучения, биологически эквивалентная одному рентгену:

$$1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Дж/кг.}$$

Для человеческого организма считается безопасной мощность дозы, примерно в 250 раз превосходящая мощность, которую создают космический фон и радиоактивные излучения из недр Земли.

§ 17.7. Эффект Мёссбауэра

1. Выводы о существовании дискретных энергетических уровней у атомного ядра с присущими им определенными значениями энергии нуждаются в одном важном уточнении. Строго говоря, лишь основное состояние стабильного ядра имеет определенную энергию. Все возбужденные состояния ядра имеют значения энергии, определенные лишь с точностью до величины ΔW , вытекающей из соотношения неопределенностей (12.15):

$$\Delta W \approx \hbar / \Delta t,$$

где Δt — время жизни ядра в возбужденном состоянии. Лишь для основного состояния стабильного ядра $\Delta t = \infty$ и $\Delta W = 0$. Чем меньше величина Δt , тем большей становится неопределенность ΔW величины энергии возбужденного состояния. Например, ядро иридия ($^{191}_{77}\text{Ir}$) имеет возбужденное состояние с энергией $W = 129$ кэВ. Переходя в основное состояние, это ядро испускает γ -фотон. Если принять, что у иридия период полураспада $T = 10^{-10}$ с равен времени Δt , то соотношение неопределенностей дает возможность оценить величину ΔW . Она оказывается приблизительно равной $5 \cdot 10^{-8}$ эВ. Конечное время жизни возбужденных энергетических состояний ядра приводит к немонахроматичности γ -излучения, сопровождающего переход ядра из возбужденного состояния в основное. Эта немонахроматичность называется **естественной шириной линии** γ -излучения, а неточность ΔW величины энергии возбужденного состояния называется **естественной шириной энергетического уровня** и обозначается буквой Γ . В предыдущем примере $\Gamma = 5 \cdot 10^{-8}$ эВ, что составляет весьма малую часть энергии W уровня: $\Gamma/W = 4 \cdot 10^{-11}$. Очень важной задачей ядерной физики являлось отыскание способов измерения весьма малых изменений энергии, сравнимых с естественной шириной уровня Γ . Это давало бы возможность измерять энергию уровней в ядрах с весьма большой относительной точностью Γ/W .

2. Методом измерения малых изменений энергии на величину, сравнимую с шириной уровня Γ , является **резонансное поглощение** γ -излучения ядрами. Если ядро облучается γ -фотонами такой частоты ν , что энергия $h\nu$ фотона равна разности энергий одного из возбужденных и основного энергетических состояний ядра, то может происходить резонансное поглощение γ -излучения — ядро поглощает γ -фотон такой же частоты, какую имеет излучаемый самим ядром γ -фотон при переходе ядра из данного возбужденного энергетического состояния в основное.