

Альфа-распад.

Альфа-распадом называется вид радиоактивного распада при котором ядро испускает альфа-частицу, то есть ядро атома гелия [1]. После альфа-распада конечное ядро оказывается смещено на две позиции влево по периодической таблице.

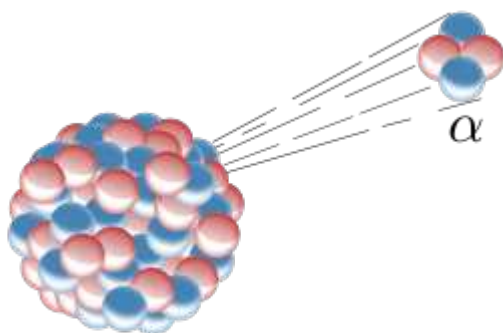


Рисунок 1: Альфа-распад ядра (в представлении художника). Сайт [1].

Кроме альфа-распада, альфа-частицы могут образовываться в некоторых процессах деления, как побочный продукт распада (помимо двух основных осколков). Этот механизм отличается от альфа-распада, в частности, возможно появление высокоэнергетичных альфа-частиц.

Альфа-частицы были выделены в отдельный вид излучения в опытах Резерфорда и Вилларда (1899-1900) как часть «эманаций урана» с наименьшей проникающей способностью. Названия «альфа», «бета» и «гамма» для компонент излучения с разной проникающей способностью были предложены также Резерфордом. После этого было установлено, что альфа-

частицы несут заряд $+2e$, как и ядро гелия. Наконец, в 1907 году в опытах Резерфорда и Ройдса было окончательно показано спектрометрически, что после нейтрализации альфа-частицы превращаются в атомы гелия. Наличие гелия в урансодержащих минералах было установлено Рамзаем ранее, в 1895 году. Резерфорд получил прямое доказательство того, что этот гелий происходит из альфа-частиц¹.

Условие энергетической возможности альфа-распада может быть очевидным образом сформулировано через энергию связи ядра²:

$$E_{св}(A, Z) < E_{св}(A-4, Z-2) + E_{св}(\alpha) .$$

Знак неравенства может показаться неожиданным, но он связан с определением энергии связи: энергия связи тем больше, чем меньше масса ядра при том же количестве нуклонов. При переходе к массам ядер неравенство сменит знак:

$$M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + M(\alpha) .$$

Энергия связи на нуклон в альфа-частице около 7МэВ, что меньше чем энергия связи на нуклон в тяжёлых ядрах. Переходя к удельной энергии связи $\epsilon = E_{св}/A$ можно показать что условие возможности распада превращается в:

$$\epsilon(A, Z) = \frac{E_{св}(A, Z)}{A} < \frac{A-4}{A} \epsilon(A-4, Z-2) + \frac{4}{A} \epsilon(\alpha) = \epsilon(A-4, Z-2) - \frac{4}{A} (\epsilon(A-4, Z-2) - \epsilon(\alpha))$$

Так как удельная энергия связи в тяжёлых ядрах убывает с атомным номером, это условие выполняется для тяжёлых ядер. При снижении атомного номера второе слагаемое

¹ Гелий, используемый в технике (и для надувания воздушных шаров) получают промышленно выделением из природного газа. В подземных месторождениях гелий образуется именно за счёт альфа-распада радиоактивных изотопов в окружающих горных породах. Содержание гелия в наиболее богатых месторождениях достигает 0.5% (объёмного) [2].

² Энергия связи ядра, по определению, $E_{св} = Z M_p c^2 + N M_n c^2 - M_{яд} c^2$, где $M_{n, p}$ массы нейтрона и протона, Z и N числа протонов и нейтронов, $M_{яд}$ – масса составного ядра.

(пропорциональное $1/A$) уменьшает правую часть, что ограничивает количество ядер, способных к альфа-распаду. Такой распад может происходить у ядер с $Z > 83$ и у некоторых редкоземельных изотопов с $A = 140 \dots 160$.

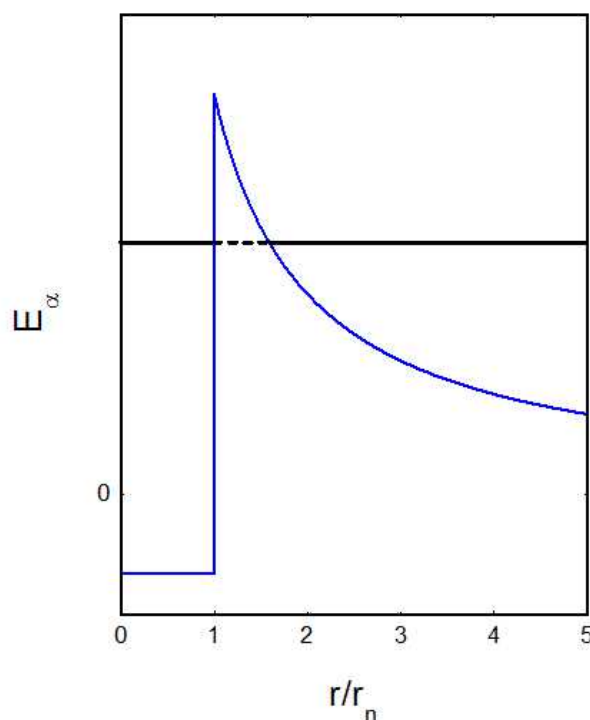


Рисунок 2: Потенциал, действующий на альфа-частицу (схема). Горизонтальная линия соответствует энергии альфа-частицы, пунктир показывает область, в которой альфа-частица с такой энергией существовать не может.

Период полураспада для альфа-распада меняется в широких пределах: от $3 \cdot 10^{-7}$ сек для ${}^{212}_{84}\text{Po}$ до $1.4 \cdot 10^{17}$ лет для ${}^{204}_{82}\text{Pb}$. Однако энергия альфа-частиц, образующихся при распаде обычно имеет значение от 4 до 9 МэВ (что соответствует скоростям 15000-20000 км/сек). Верхний предел энергии близок к максимальной энергии связи в ядрах — и имеет достаточно простое объяснение: если в исходном ядре имеется избыток энергии превышающий энергию связи нуклона, то возможен процесс с вылетом нейтрона или протона, который более вероятен, чем процесс требующий одновременного участия четырёх частиц. Нижний предел энергии связан с тем, что для ядер, испускающих низкоэнергетичные альфа-частицы, период полураспада быстро растёт.

Эмпирическое соотношение между энергией альфа-частицы и временем полураспада было найдено Гейгером и Нэттолом в 1911 году (закон Гейгера-Нэттола): $\lg T_{1/2} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b$ согласно этому закону при уменьшении энергии происходит рост *логарифма* времени полураспада, а сам период полураспада, следовательно, увеличивается экспоненциально быстро. Оценки показывают, что при энергии альфа частицы в 2 МэВ период полураспада превышает время жизни Вселенной.

Закон Гейгера-Нэттола был объяснён в работах Г.Гамова (и независимо Р.Гёрни и Э.Кондона) как процесс туннелирования четырёх нуклонов, образовавших альфа-частицу, через кулоновский барьер (см., например, [3]). Отметим, что внутри ядра все нуклоны движутся независимо — образование альфа-частицы внутри ядра это виртуальный процесс, однако

когда альфа-частица покидает ядро, она становится вполне определённым объектом.

На альфа-частицу вне ядра действует кулоновский потенциал ядра-остатка

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2(Z-2)e^2}{r} \quad (\text{двойка в числителе связана с зарядом альфа-частицы}).$$

Внутри ядра вступают в действие сильные ядерные силы, так что для нуклонов возникает минимум энергии (потенциальная яма) внутри ядра (рисунок 2). Величина кулоновского потенциала на размере ядра (10^{-15} м) для $Z=80$ составляет 230 МэВ, то есть гораздо больше чем энергия вылетающей альфа-частицы. Из-за этого, даже если виртуальная альфа частица в ядре имеет избыток энергии, позволяющий ей существовать вне ядра, существует область вблизи ядра, в которой альфа частица существовать не может. Однако, в квантовой физике возможно проникновение через такой барьер (туннелирование). Решение задачи о туннелировании приводит к закону Гейгера-Нэттола, с коэффициентами слабо зависящими от заряда ядра $a \approx 1.6Z$ $b \approx -1.6Z^{2/3} - 21.4$ (при этом период полураспада выражается в секундах, а энергия в МэВ).

Спектр альфа-частиц (распределение по энергиям) состоит из одной или нескольких узких линий. Значения энергии частиц и вид спектра индивидуален для разных изотопов (рисунок 3) [4]. Дискретный характер спектра связан с тем, что при испускании альфа-частицы происходит переход между определёнными состояниями исходного и конечного ядра, и энергия альфа-частиц и конечного ядра оказываются жёстко определены законами сохранения энергии и импульса. В этом смысле происхождение дискретного спектра аналогично линейчатому спектру излучения атомов. Для некоторых изотопов в спектре альфа-распада наблюдается несколько линий, это связано с тем, что после испускания альфа-частицы возможен переход не только в одно основное состояние конечного ядра, но и в его возбуждённые состояния, релаксация из которых может идти по другим каналам (например, испусканием гамма-кванта).

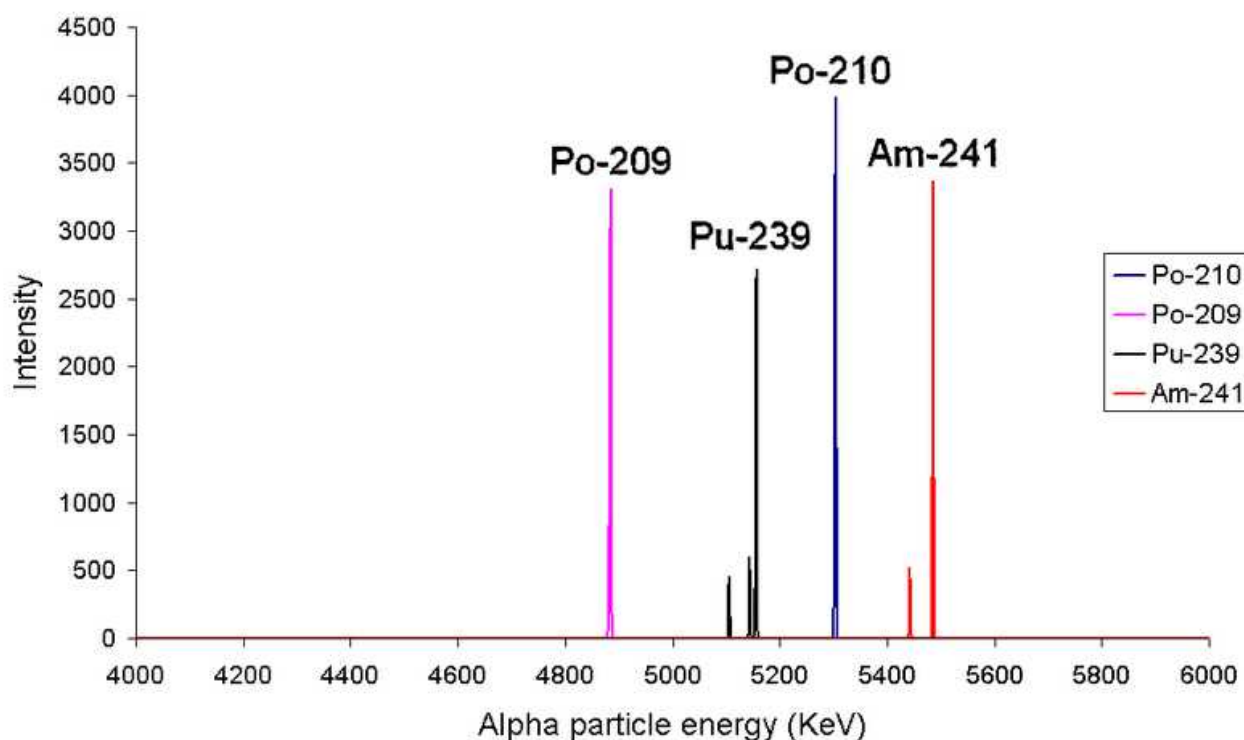


Рисунок 3: Спектры альфа-частиц от разных источников. С сайта [4].

Маленькая проникающая способность альфа-излучения позволяет использовать альфа-активные источники в некоторых практических приложениях [5]. Некоторые детекторы дыма используют альфа-активные изотопы для ионизации воздуха в зазоре между электродами (рисунки 4, 5). Частицы дыма увеличивают эффективное сопротивление зазора, которое может быть зафиксировано электроникой. Альфа-активные изотопы являются предпочтительным источником энергии для радиоизотопных термоэлектрических генераторов [6]. В этих приборах энергия альфа-частиц превращается в тепло, которое при помощи термопар преобразуется в электрическое напряжение. Например, изотоп плутония ^{238}Pu выделяет около полуватта тепловой мощности на грамм (рисунок 6). Такие источники электричества используются на космических зондах, в удалённых местах (маяки, метеостанции), а также в некоторых моделях вживляемых кардиостимуляторов. Ионизирующее действие альфа-частиц используется для снятия статического заряда.



Рисунок 4: Контейнер для амерция-241 в бытовом детекторе дыма. С сайта [5].



Рисунок 5: Капсула амерция-241 из бытового детектора дыма. Оболочка - алюминий, тёмный элемент в центре – диоксид амерция-241. С сайта [5].

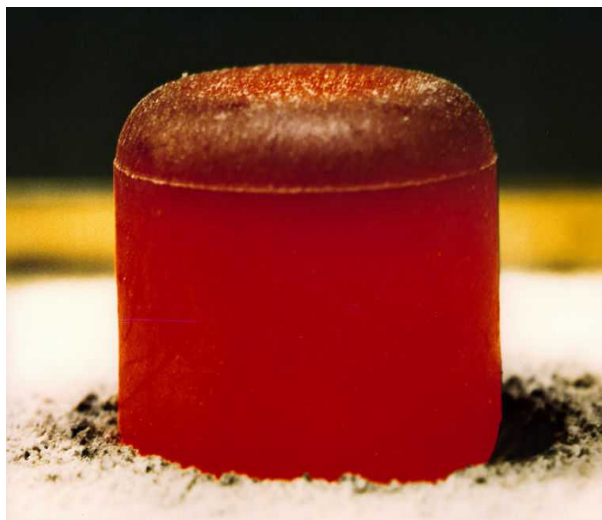


Рисунок 6: Таблетка оксида плутония $^{238}\text{PuO}_2$ для радиоизотопного термоэлектрического генератора космического зонда («Кассини» или «Галилео»). Цвет связан с тепловым излучением от разогретой альфа-частицами таблетки. С сайта [6].

Литература

- 1: wikipedia.org, Alpha decay, , http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_decay
- 2: GAZPROM Informatorium, Producing helium from natural gas, 2016, <http://www.gazprominfo.com/articles/helium/>
- 3: В.Е.Белонучкин, Д.А.Заикин, Ю.М.Ципенюк, Основы физики, том 2, 2007
- 4: wikipedia.org, Alpha particle spectroscopy, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha-particle_spectroscopy
- 5: wikipedia.org, Radioisotope, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope>
- 6: wikipedia.org, Radioisotope thermoelectric generator, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator