

Протонный и нейтронный распады.

Если в ядре имеется избыточная энергия, превышающая энергию связи нуклона, она может быть с подавляющей вероятностью передана протону или нейтрону с вылетом его из ядра. Эти процессы возможны только в очень нестабильных изотопах, так как связаны с «самым сильным» сильным взаимодействием. Поэтому такие процессы наблюдаются только в искусственно полученных ядрах.

Известно два изотопа, демонстрирующих нейтронный распад: гелий-5 (период полураспада $7 \cdot 10^{-22}$ сек) и бериллий-13 (период полураспада 0.5 нсек). Курьёзно, нейтронный распад гелия-5 можно формально назвать и альфа-распадом, так как продуктом этого распада является ядро гелия-4, то есть альфа-частица. При нейтронном распаде ядра (не путать с распадом нейтрона, являющимся процессом бета-распада) заряд ядра не изменяется, но уменьшается массовое число на единицу. Быстрота процесса нейтронного распада связана также и с тем, что для нейтрона отсутствует кулоновский барьер (у него нет электрического заряда). Поэтому при наличии энергии, превышающей энергию связи ничто не препятствует нейтрону покинуть ядро.

Протонный распад [1] является более распространённым, он был обнаружен в 1969 году на одном из изомерных состояний кобальта-53 (рисунок 1). При этом процессе заряд ядра уменьшается на 1, как и при позитронном распаде, но также уменьшается и массовое число на 1. Обнаружено более 25 изотопов, демонстрирующих протонный распад. Для протона, как и для альфа-частицы, процесс распада является туннелированием под кулоновским барьером.

Помимо однопротонного распада, в 2002 году был обнаружен двухпротонный распад железа-45 [2]. В таком процессе уменьшаются на 2 и заряд ядра и массовое число. В железе-45 период полураспада 1.9 мсек, двухпротонный распад происходит с вероятностью 75%. Цепь распадов железа-45 показана на рисунке 2 [3]. Интересно подчеркнуть, что этот новый вид распада был обнаружен почти 100 лет спустя после начала исследования радиоактивности. Отметим также, что железо-45 является очень лёгким изотопом железа: природное железо в основном состоит из железа-56, то есть в железе 45 сильный дефицит нейтронов (или, с другой стороны, большой избыток протонов).

Процесс двухпротонного распада интересен ещё и тем, что, согласно теоретическим предсказаниям, связанное состояние двух протонов (дипротон или гелий-2) было бы стабильно, если бы сильное взаимодействие было всего на несколько процентов сильнее. При этом, как и для альфа-частиц, дополнительный выигрыш в энергии связи мог бы сделать такие процессы распада более вероятными. Поэтому детальное изучение двухпротонного распада позволяет получить оценку на параметры сильного взаимодействия.

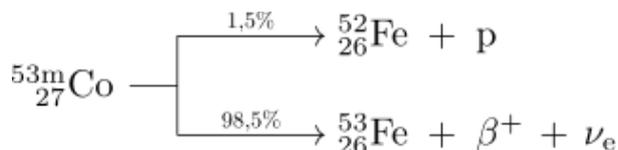


Рисунок 1: Пути распада изомерного состояния кобальта-53. С сайта [1].

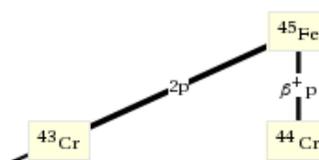


Рисунок 2: Схема распада железа-45. С сайта [3].

Наблюдались и трёхпротонные процессы распада в железе-45 [4] и хrome-43 [5]. Эти распады происходили, если после бета-распада (позитронного бета-распада для этих ядер) дочернее ядро оказывается в сильно возбуждённом состоянии с избытком протонов. Ядра хрома-43

или железа-45 получают бомбардировкой мишени тяжёлыми ионами (в работе [5] никелевая мишень бомбардировалась ионами никеля) Хром-43 уже сильно дефицитен по нейтронам (стабильный наиболее распространённый изотоп имеет массу 52), однако он претерпевает позитронный бета-распад с периодом полураспада около , 20 мсек превращаясь в ванадий-43 в возбуждённом состоянии ядра. С вероятностью около 80% энергия возбуждения дочернего ядра ванадия снимается испусканием одного протона, с вероятностью около 7% - испусканием двух протонов и с вероятностью около 0.1% (десяток зафиксированных событий на десять тысяч изученных распадов) — с испусканием трёх протонов. Примеры изображений с детектора частиц, показывающие как из покоящегося ядра хрома-43 [5] вылетают один, два или три протона показаны на рисунке 3.

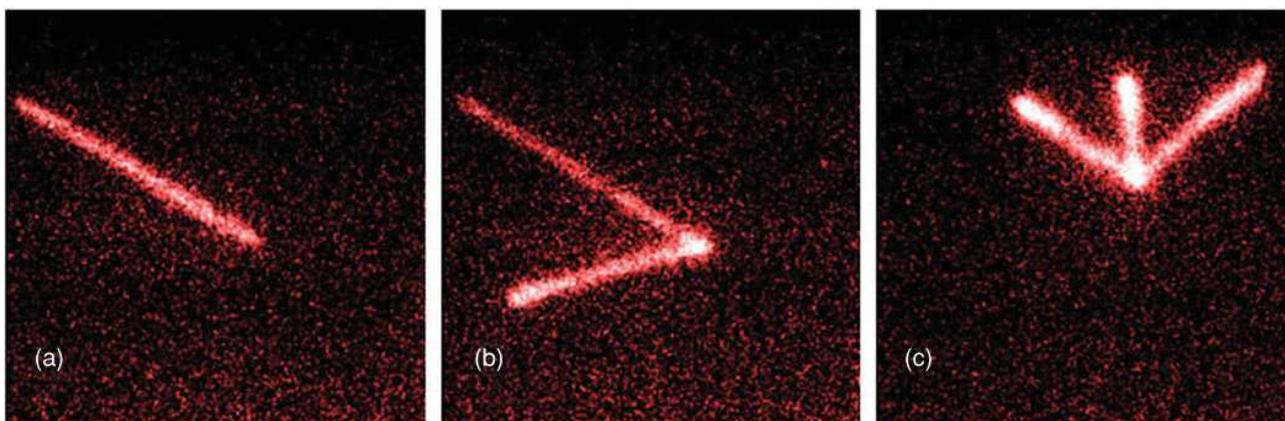


Рисунок 3: Оставленные в детекторе следы однопротонного (a), двухпротонного (b) и трёхпротонного (c) распадов образующегося после позитронного распада хрома-43 ядра ванадия-43. Из статьи [5].

Литература

- 1: wikipedia.org, Протонный распад, 2016, http://ru.wikipedia.org/wiki/Протонный_распад
- 2: J. Giovinazzo, B. Blank, M. Chartier, S. Czajkowski, A. Fleury, M. J. Lopez Jimenez, M. S. Pravikoff, J.-C. Thomas, F. de Oliveira Santos, M. Lewitowicz, V. Maslov, M. Stanoiu, R. Grzywacz, M. Pfützner, C. Borcea, and B. A. Brown, Two-Proton Radioactivity of Fe-45, 2002
- 3: wolframalpha.com, Iron-45 Information List, 2016, http://www.wolframalpha.com/entities/isotopes/iron_45/yn/um/uf/
- 4: K. Miernik, W. Dominik, Z. Janas, M. Pfützner, C. R. Bingham, H. Czyrkowski, M. Ćwiok, I. G. Darby, R. Dąbrowski, T. Ginter, R. Grzywacz, M. Karny, A. Korgul, W. Kuśmierz, S. N. Liddick, M. Rajabali, K. Rykaczewski, and A. Stolz, First observation of β -delayed three-proton emission in Fe45, 2007
- 5: M. Pomorski, K. Miernik, W. Dominik, Z. Janas, M. Pfützner, C. R. Bingham, H. Czyrkowski, M. Ćwiok, I. G. Darby, R. Dąbrowski, T. Ginter, R. Grzywacz, M. Karny, A. Korgul, W. Kuśmierz, S. N. Liddick, M. Rajabali, K. Rykaczewski, and A. Stolz, β -delayed proton emission branches in Cr43, 2011