

## Запаздывающие излучения.

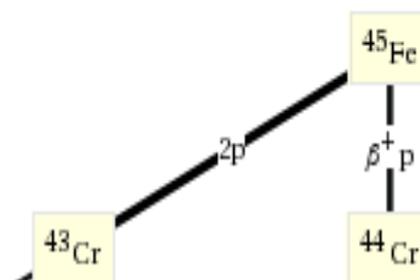
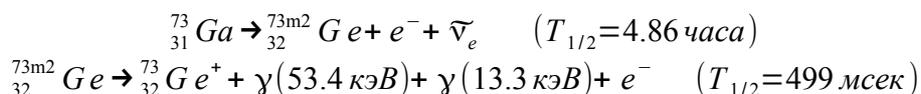


Рисунок 1: Схема распада железа-45. С сайта [1].

Возможны ситуации, когда после распада исходного ядра по одному из описанных способов образуется крайне короткоживущий изотоп или возбуждённое состояние ядра, которое быстро (мгновенно на масштабе времени периода полураспада первого ядра) испытывает следующий распад. В результате количество промежуточных ядер мало, исходные ядра постепенно исчезают, а появляются ядра — конечные продукты двухступенчатой реакции.

Частицы, образовавшиеся на втором этапе называют запаздывающими, так как они образуются через некоторое время после начала отсчёта времени. Такие запаздывающие нейтроны оказываются принципиально важными для регулирования управляемых ядерных реакций.

Примеры запаздывающих излучений:



во второй реакции образуются запаздывающие гамма-кванты и конверсионный электрон.

Изотоп азота  $^{17}\text{N}$  имеет три канала распада (электронный бета-распад с различными запаздывающими излучениями). С вероятностью 95% после бета-распада испускается запаздывающий нейтрон, образуется кислород-16, с вероятностью 5% происходит «чистый» бета-распад с образованием кислорода-17, с вероятностью  $2.5 \cdot 10^{-5}$  происходит испускание запаздывающей альфа-частицы с образованием углерода-13.

Выше мы привели примеры запаздывающего многопротонного распада в ядрах хрома-43.

В схемах распада на участках с испусканием запаздывающего излучения пишут подряд оба символа (например,  $\beta^- n$  для обозначения бета-распада с запаздывающим нейтроном). На диаграмме распадов для железа-45 (рисунок 1) таким образом отмечен распад в хром-44: процесс  $\beta^+ p$  обозначает запаздывающее излучение одного протона после позитронного бета-распада, в результате чего масса ядра уменьшается на 1, а заряд — на 2.

Наблюдались и более необычные формы запаздывающего излучения, когда одновременно испускаются более одной частицы. Трёхпротонные процессы распада наблюдались в железе-45 [2] и хrome-43 [3]. 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 [3] 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  $20 \text{ мсек}$  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 [3] вылетают один, два или три протона показаны на рисунке 2.

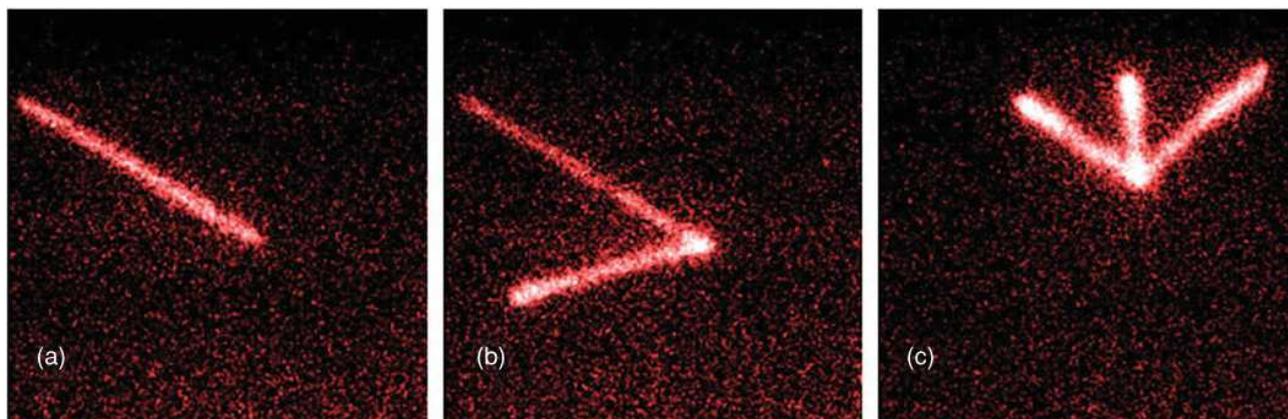


Рисунок 2: Оставленные в детекторе следы однопротонного (a), двухпротонного (b) и трёхпротонного (c) распадов образующегося после позитронного распада хрома-43 ядра ванадия-43. Из статьи [3].

## Литература

- 1: wolframalfa.com, Iron-45 Information List, 2016, [http://www.wolframalpha.com/entities/isotopes/iron\\_45/yn/um/uf/](http://www.wolframalpha.com/entities/isotopes/iron_45/yn/um/uf/)
- 2: 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  $\beta$ -delayed three-proton emission in Fe45, 2007
- 3: 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,  $\beta$ -delayed proton emission branches in Cr43, 2011