

### 3.1 Протонная радиоактивность

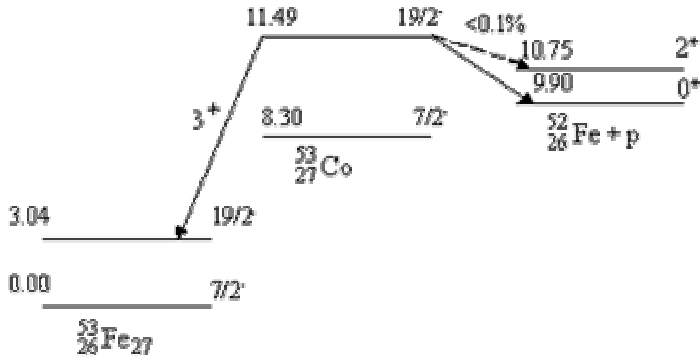
Начиная с 50-х годов физики методично приближались к открытию протонной радиоактивности ядер. Для того чтобы ядро, находящееся в основном состоянии, могло самопроизвольно испускать протон, необходимо, чтобы энергия отделения протона от ядра была положительной. Но таких ядер в земных условиях не существует, и их необходимо было создать искусственно. К получению таких ядер были очень близки российские физики в Дубне, но протонную радиоактивность открыли в 1982 году немецкие физики в Дармштадте, использовавшие самый мощный в мире ускоритель многозарядных ионов. Испускание протонов из основного состояния впервые наблюдалось для ядер  $^{147}\text{Tm}$  и  $^{151}\text{Lu}$ .

**Протонная радиоактивность** - самопроизвольный распад нейтронодефицитных ядер с испусканием протона, проникающего сквозь кулоновский электростатический барьер путём туннельного эффекта. Этот вид распада приводит к уменьшению заряда и массового числа на единицу.

Испускание протонов из основного состояния ядра обнаружено для многих ядер, расположенных вблизи границы протонной стабильности ( $B_p=0$ ).

Излучателями протонов из основного состояния являются ядра  $^{151}\text{Lu}$  ( $T_{1/2}=85$  мс),  $^{113}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=958$  мс),  $^{147}\text{Tm}$  ( $T_{1/2}=1050$  мс) и др.

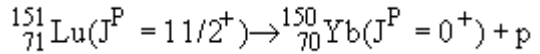
**Рис.24.** Протонная радиоактивность изомерного состояния  $^{53\text{m}}\text{Co}$



Для экспериментального наблюдения протонного распада было исследовано большое число изотопов, расположенных вблизи границы с нулевой энергией отделения протона. С этой целью различные стабильные изотопы от эрбия ( $Z=68$ ) до висмута ( $Z=83$ ) облучались ускоренными ионами  $^{58}\text{Ni}$  и  $^{90}\text{Mo}$ . В реакции, идущей с образованием составного ядра  $^{154}\text{Hf}$



в энергетическом спектре вылетающих частиц, была обнаружена монокроматическая линия с энергией 1.19 МэВ. Анализ результатов эксперимента показал, что наблюдаемую линию следует приписать распаду изотопа  $^{151}\text{Lu}$  с испусканием протона из основного состояния ядра



В дальнейшем протонная радиоактивность была открыта у ядер  $^{109}\text{I}$  и  $^{113}\text{Cs}$ . Использование методики кремниевых детекторов дало целую группу протонных излучателей в диапазоне  $Z=69 - 75$   $^{146}\text{Tm}$ ,  $^{150}\text{Lu}$ ,  $^{156}\text{Ta}$  и  $^{160}\text{Re}$ . Сегодня известно свыше 30 изотопов, испускающих протоны из основного состояния ядер с  $Z>50$  от  $^{105}\text{Sb}$  до  $^{177}\text{Tl}$ . Открылись новые возможности для систематического исследования этого явления. Наблюдение протонной радиоактивности является прямым указанием на то, что в этой области ядер проходит протонная граница связанных состояний. Изучение каналов распада ядер вблизи границы протонной стабильности обнаруживает ряд интересных закономерностей.

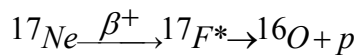
1. Выявлены случаи, когда оба легчайших изотопа данного элемента являются излучателями протонов ( $^{150,151}\text{Lu}$ ,  $^{146,147}\text{Tm}$ ).

2. Выявлен случай, когда легчайший изотоп  $^{108}\text{I}$  является  $\alpha$ -излучателем, в то время как более тяжелый изотоп  $^{109}\text{I}$  испускает протоны из основного состояния.

Испускание протонов из изомерного состояния впервые было обнаружено на ядре  $^{53}\text{Co}$ . Изотоп  $^{53}\text{Co}$  получался путем бомбардировки изотопа  $^{54}\text{Fe}$  протонами, ускоренными до 53 МэВ в реакции  $^{54}\text{Fe}(p,2n)^{53}\text{Co}$ . Была обнаружена протонная радиоактивность с периодом полураспада 243 мс и энергией протонов 1.59 МэВ. Испускание протонов происходило из изомерного состояния ядра  $^{53\text{m}}\text{Co}$  с энергией 3.19 МэВ с образованием конечного ядра  $^{52}\text{Fe}$  в основном состоянии (**Рис.**). Основной вид распада из изомерного состояния -  $\beta^+$ -распад. Это происходит потому, что  $\beta^+$ -распад ядра  $^{53\text{m}}\text{Co}$  - сверхразрешенный, так как образующееся в результате  $\beta^+$ -распада ядро  $^{53}\text{Fe}$  является «зеркальным» по отношению к  $^{53}\text{Co}$ . Доля распадов с испусканием протонов составляет около 1.5%, что соответствует парциальному периоду полураспада около 16 с.

Уменьшение энергии отделения протона при продвижении в область протонно-избыточных изотопов делает возможным радиоактивные распады с испусканием запаздывающих протонов (**Рис.**). Исходное ядро ( $Z, N$ ) в результате  $\beta^+$ -распада или  $e$ -захвата превращается в ядро ( $Z-1, N+1$ ). Если энергия возбуждения  $E^*$  ядра ( $Z-1, N+1$ ) больше энергии отделения протона  $B_p$ , то открыт канал распада возбужденного состояния ядра ( $Z-1, N+1$ ) с испусканием протона.

Пример испускания запаздывающих протонов



В настоящее время известно свыше 70  $\beta^+$ -радиоактивных ядер, излучателей запаздывающих протонов. В **Табл. 5** приведены характеристики некоторых из них. В случае легких ядер область протонных излучателей находится относительно близко от долины стабильности. Поэтому излучатели запаздывающих протонов получают в реакциях типа (p, 2-3n), ( $^3\text{He}$ , 2-3n).

**Таб. 5.** Излучатели запаздывающих протонов

Изотоп	$T_{1/2}$ , с	$Q_b - E_p$ , МэВ	* $P_p$ , %	Реакция
$^9\text{C}$	0.126	16.68	100	$^{10}\text{B}(p,2n), ^7\text{Be}(^3\text{He},n)$
$^{13}\text{O}$	0.09	15.81	12	$^{14}\text{N}(p,2n)$
$^{21}\text{Mg}$	0.121	10.66	20	$^{23}\text{Na}(p,3n), ^{20}\text{Ne}(^3\text{He},2n)$
$^{33}\text{Ar}$	0.174	9.32	63	$^{32}\text{S}(^3\text{He},2n), ^{35}\text{Cl}(p,3n)$
$^{109}\text{Te}$	4.4	7.14	3	$^{92}\text{Mo}(^{20}\text{He},3n), ^{96}\text{Ru}(^{16}\text{O},3n)$
$^{111}\text{Te}$	19.3	5.1	0.12	$^{102}\text{Po}(^{12}\text{C},3n), ^{98}\text{Ru}(^{16}\text{O},3n)$
$^{114}\text{Cs}$	0.7	8.8	$7 \cdot 10^{-2}$	$\text{La}(p,3pxn)$
$^{115}\text{Cs}$	1.4	5.41	$7 \cdot 10^{-4}$	$\text{La}(p,3pxn)$
$^{116}\text{Cs}$	3.9	6.45	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$^{92}\text{Mo}(^{32}\text{S},3p5n)$
$^{118}\text{Cs}$	16	4.7	$4.4 \cdot 10^{-4}$	$\text{La}(p,3pxn)$
$^{120}\text{Cs}$	58	2.73	$7 \cdot 10^{-8}$	$\text{La}(p,3pxn)$
$^{181}\text{Hg}$	3.6	6.15	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$\text{Pb}(p,3pxn)$
$^{183}\text{Hg}$	8.8	5.00	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$\text{Pb}(p,3pxn)$

\*  $P_p$  - вероятность распада по протонному каналу

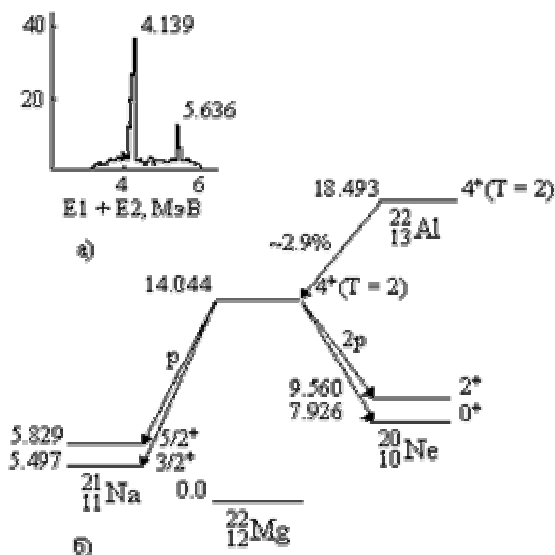
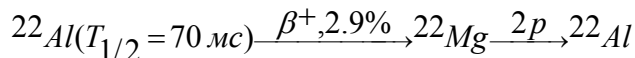
В последнее время (2005) появились сообщения, что у некоторых протонообогащенных (нейтронодефицитных) ядер наблюдается распад с вылетом нескольких протонов и более тяжелых заряженных частиц.

Испускание двух запаздывающих протонов было обнаружено при  $\beta^+$ -распаде изотопа  $^{22}\text{Al}$ . Эксперимент выполнен на пучке ускоренных ионов  $^3\text{He}$  с энергией 110 МэВ.

Изотоп  $^{22}\text{Al}$  образовывался в реакции:



и далее распадался (**Рис. 25**) по цепочке



**Рис.25.** Испускание двух запаздывающих протонов при  $\beta^+$ -распаде  $^{22}\text{Al}$ . а - спектры протонов в режиме совпадений, б - цепочка распадов  $^{22}\text{Al}$

В.И.Гольданский предсказал дипротонную радиоактивность (одновременное испускание ядром двух протонов). Сейчас известен дипротонный распад возбужденного состояния ядра  $^{14}\text{O}$  (7.77 МэВ), образовавшегося в реакции  $^{13}\text{N}(p,\gamma)$ .

Ожидается открытие испускания дипротона -  $^2\text{He}$  из основного состояния ядра. Однако до сих пор оно не состоялось несмотря на то, что поиск проводился довольно интенсивно. Были подозрения, что такая ситуация реализуется в ядре  $^{39}\text{Ti}$ , но они оказались безосновательными.