



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

**Кафедра №7
экспериментальной ядерной физики и космофизики**

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №11

Экзотические виды радиоактивного распада ядер

2016

Лекция №11

Экзотические виды радиоактивного распада ядер

- 1. Введение**
- 2. Протонная радиоактивность**
- 3. Двухпротонная радиоактивность**
- 4. Кластерная радиоактивность**
- 5. Нейтронная радиоактивность**

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/index.html>

1. Введение

Распад атомных ядер (радиоактивность) — фундаментальное явление природы.

Каждое радиоактивное ядро может распасться в любой момент.

Закономерности распада наблюдаются только при усреднении его характеристик по достаточно большому количеству событий.

Если радиоактивный источник содержит N радиоактивных ядер и их число практически не изменяется за время измерения, то вероятность того, что за время t распадется n радиоактивных ядер, описывается распределением Пуассона

$$\omega(n) = \frac{(N\lambda t)^n}{n!} e^{-N\lambda t}.$$

Величина $N\lambda t$ характеризует среднее число частиц, распадающихся за время t , и представляет собой среднее число отсчетов \bar{n} , которое получается в случае многократного проведения измерений с одинаковым временем измерения t

$$\bar{n} = N\lambda t.$$

Используя величину \bar{n} , распределение Пуассона можно переписать в виде

$$\omega(n) = \frac{(\bar{n})^n}{n!} e^{-\bar{n}}.$$

История открытия различных видов радиоактивности

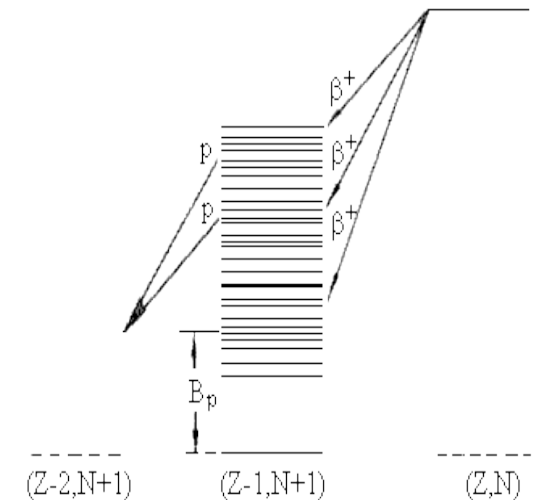
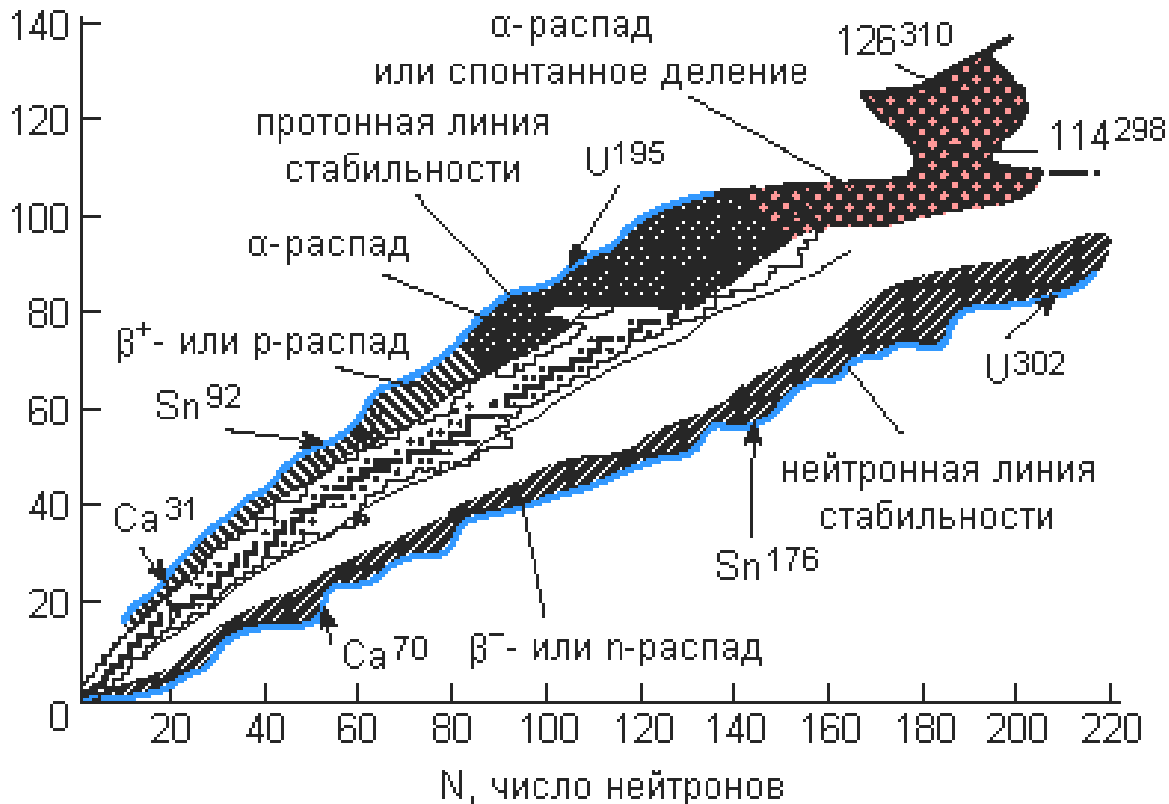
Тип радиоактивности ядер	Вид обнаруженного излучения	Год открытия	Авторы открытия
Радиоактивность атомных ядер	Излучение	1896	А. Беккерель
Альфа-распад	${}^4\text{He}$	1898	Э. Резерфорд
Бета-распад	e^-	1898	Э. Резерфорд
Гамма-распад	γ -Квант	1900	П. Виллард
Спонтанное деление ядер	Два осколка	1940	Г.Н.Флеров, К.А.Петржак
Протонный распад	p	1982	З. Хофман и др.
Кластерный распад	${}^{14}\text{C}$	1984	Х. Роуз, Г. Джонс; Д.В.Александров и др.

В открытии новых (экзотических) типов распада существенную роль сыграли **пучки радиоактивных ядер**, которые научились создавать в 1960-х годах путём использования двух последовательных ускорителей: на первом ускорителе стабильные ионы небольшой массы ускоряются до высоких энергий (100 МэВ – 10 ГэВ) и направляются на мишень, в мишени идут реакции фрагментации, в результате чего образуются радиоактивные ядра, которые после сепарации по массе и энергии, направляются во второй ускоритель, где разгоняются до высокой энергии и попадают на вторую мишень, где исследуются экзотические ядерные состояния.

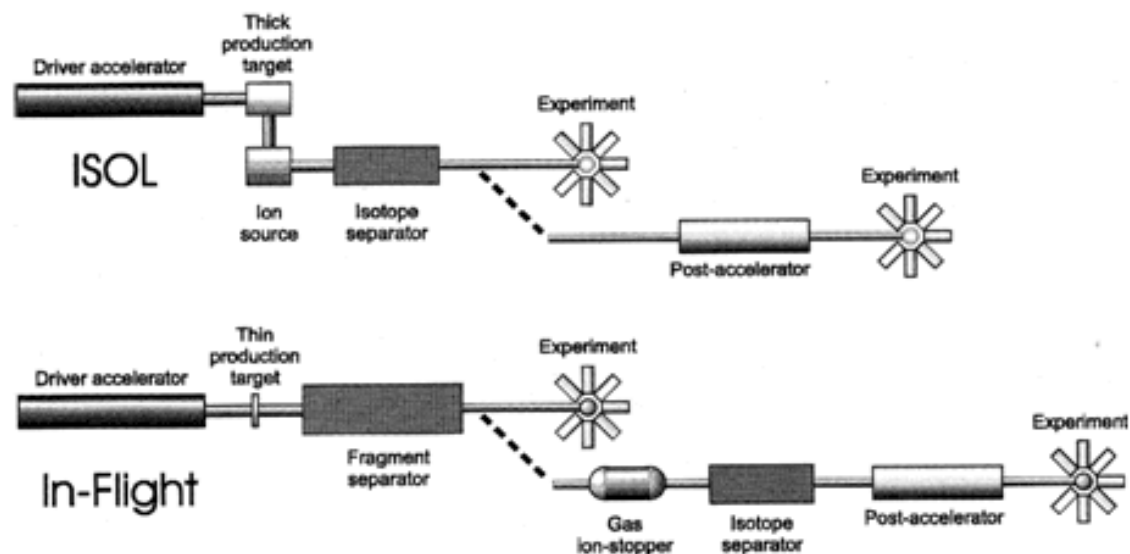
Такая схема позволила синтезировать сильно **нейтроноизбыточные** и **нейтронодефицитные** ядра, многие из которых претерпевают экзотические типы распада.

В тех случаях, когда энергия β -распада Q_β превышает энергию связи нейтрона (B_n), протона (B_p) или α -частицы (B_α), в дочернем ядре – продукте распада, возникает возможность сложного радиоактивного превращения: ядро – продукт β -распада – образуется в сверх-возбуждённом состоянии ($E^* > B_n, B_p$ или B_α) и выбрасывает «запаздывающий» нейтрон, протон или α -частицу.

Z , число протонов



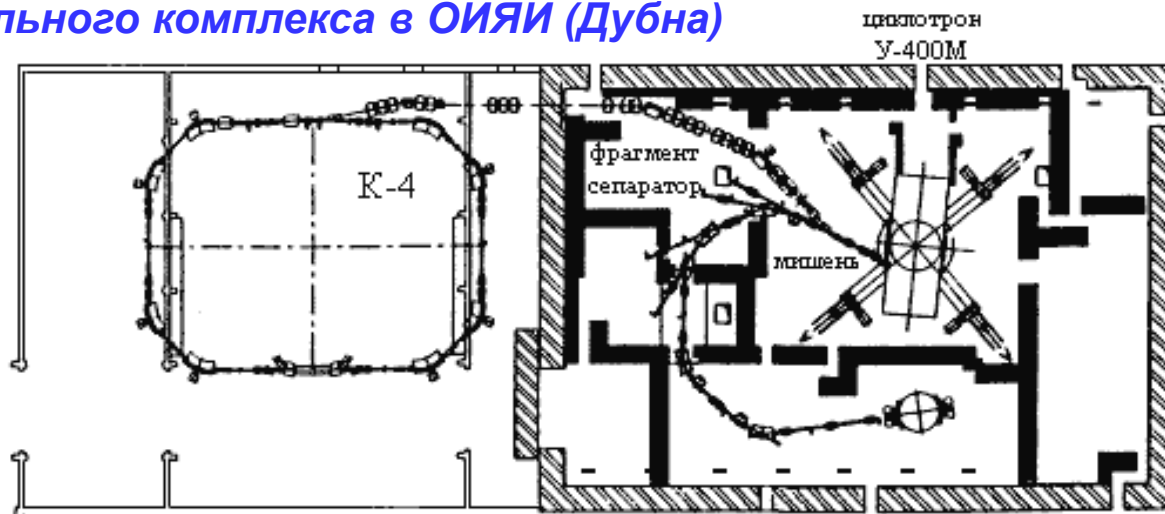
Основные методы получения пучков радиоактивных ядер



Метод ISOL (Isotop Separation On Line) - образование ионов тепловых скоростей в твердой, жидкой или газовой среде (в толстой мишени - **Thick Production Target**), которые остаются в веществе мишени, затем извлекаются из мишени и разделяются с помощью масс-сепаратора (**Isotope Separator**), чтобы быть использованными в прецизионных экспериментах с низкими энергиями (10–500 кэВ) или ускорены во втором ускорителе, где генерируются пучки вторичных частиц высокой интенсивности с энергией до 25 МэВ/нуклон.

Метод In-Flight (метод фрагментации ускоренных ионов на мишени) - оптимален для получения вторичных пучков короткоживущих изотопов со временем жизни от 100 нс. Первичный пучок имеет энергию от 50 МэВ/нуклон до 1 ГэВ/нуклон и взаимодействует с тонкой мишенью. Для выделения определенных изотопов используются электромагнитные сепараторы (**Fragment Separator**). Пучки частиц на выходе сепаратора могут либо непосредственно использоваться в эксперименте, либо после замедления в газовой среде (**Gas Ion-Stopper**) разделяться на отдельные пучки по A и Z и снова ускоряться (**Post-accelerator**) для проведения экспериментов

Схема ускорительного комплекса в ОИЯИ (Дубна)



Ионы	Период полураспада, с	Энергия инжекции, МэВ/нукл.	Макс. энергия, МэВ/нукл.	Светимость, $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$
^6He	0.808	104	176	10^{27}
^8He	0.122	109	123	10^{25}
^9Li	0.178	108	176	10^{27}
^{11}Li	0.009	109	121	10^{24}
^{11}Be	13.8	126	207	10^{27}
^{14}Be	0.05	120	132	10^{22}
^{12}B	0.02	85	264	10^{28}
^{17}B	0.006	121	139	10^{22}
^{16}C	0.75	114	219	10^{26}
^{18}C	0.1	122	176	10^{23}
^{14}O	70.6	109	456	10^{28}
^{22}O	0.76	118	207	10^{24}
^{24}Ne	225	126	264	10^{28}
^{28}Ne	0.014	121	200	10^{23}
$^{44\text{m}}\text{Sc} (J^P=6^+)$	$2 \cdot 10^5$	107	335	10^{30}

Первоначальным источником тяжелых ионов является циклотрон У-400М. После облучения мишени и анализа продуктов фрагмент-сепаратором пучок попадает в накопительное кольцо К4 с электронным охлаждением.

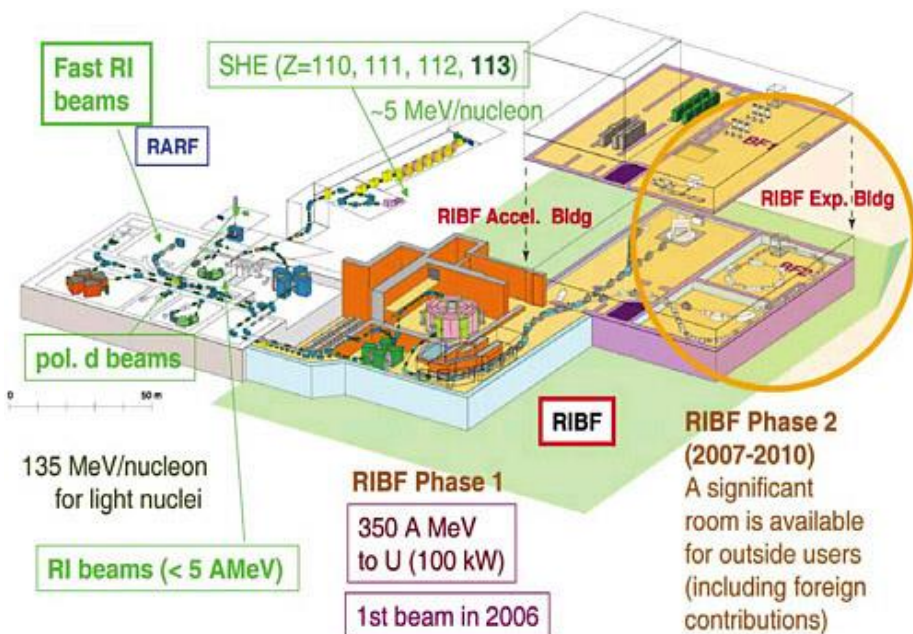
Характеристики пучков накопительного кольца К4 лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ, Дубна

RIKEN (Япония)

RIKEN Accelerator Research Facility (RARF) – фабрика по производству пучков изотопов (RIBF).

В RIKEN получают радиоактивные пучки

- 1) образующиеся в результате фрагментации быстрых частиц на мишени;
- 2) поляризованных радиоактивных ядер;
- 3) высокоспиновых изомеров.



Характеристики пучков в накопительных кольцах ASR и BSR

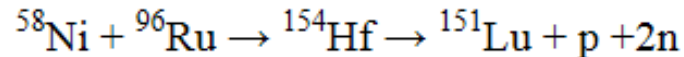
Параметры	ACR	BSR
Энергия	400 МэВ/нуклон	3500 МэВ/нуклон (легкие ионы)
	100 МэВ/нуклон	1000 МэВ/нуклон (тяжелые ионы)
		2500 МэВ (электроны)
Интенсивность	10^{12} частиц/импульс	10^{12} частиц/импульс
Частота повторения	1 Гц	1 Гц
Эмитанс	$\epsilon_x = 125 \pi$ мм·мрад $\epsilon_y = 125 \pi$ мм·мрад	
Длина окружности	168.48 м	168.48 м

Ускорительная система состоит из двух сверхпроводящих циклотронов SCR-4 и SCR-6 с четырьмя и шестью секторами соответственно, в которые поступит пучок из функционирующего в настоящее время циклотрона RRC. Легкие ионы будут ускоряться до энергии ~ 400 МэВ/нуклон, а наиболее тяжелые - до 150 МэВ/нуклон. Пучки тяжелых ионов, полученные на следующем этапе трансформируются в пучки радиоактивных ионов в сепараторном комплексе Big RIPS. После охлаждения в накопительном кольце ACR ионы инжектируются в BSR и ускоряются до энергий 1400 МэВ/нуклон. Затем они поступают в DSR для различных экспериментов с ускоренными пучками. В накопителе BSR также предусмотрено ускорение электронов до энергии 2.5 ГэВ, которые затем также поступают в кольца DSR.

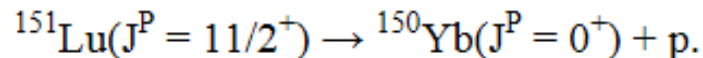
2. Протонная радиоактивность

Испускание протонов из основного состояния ядра впервые наблюдалось для изотопов ^{147}Tm и ^{151}Lu . Механизм аналогичен альфа-распаду — туннелирование сквозь барьер, формируемый сильным и электростатическим взаимодействиями.

В реакции, идущей с образованием составного ядра ^{154}Hf



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



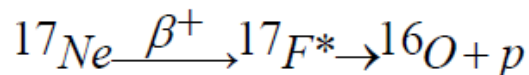
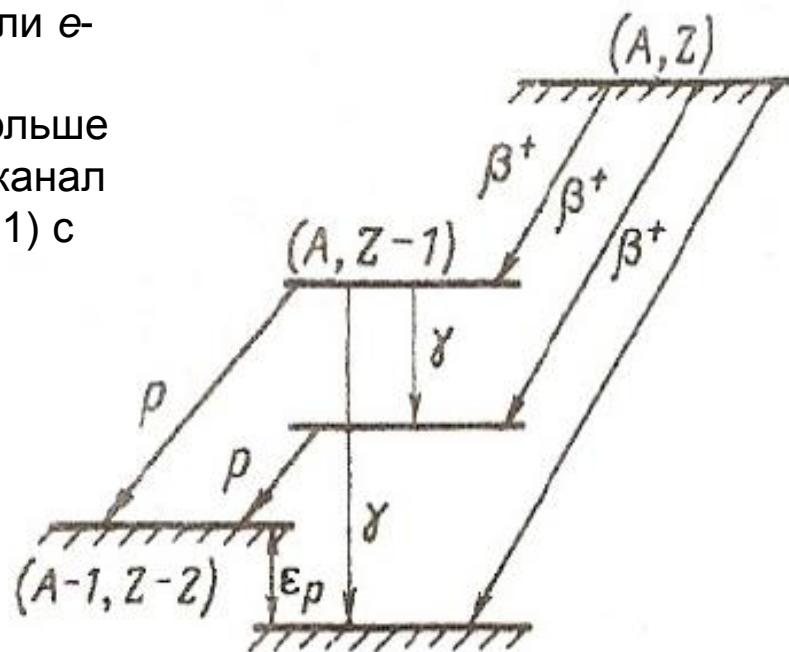
Известно свыше 30 изотопов, испускающих протоны из основного состояния ядер с $Z > 50$ от ^{105}Sb до ^{177}Tl . Наблюдение протонной радиоактивности является прямым указанием на то, что в этой области ядер проходит граница протонной радиоактивности. Как правило протонная радиоактивность приводит к образованию β -радиоактивных изотопов, которые затем распадаются последовательностью β^+ -распадов и e -захватов. Изучение каналов распада ядер вблизи границы протонной радиоактивности обнаруживает ряд интересных закономерностей.

В 1962 г. В.А. Карнауховым в Дубне было обнаружено испускание **«запаздывающих» протонов**:

- 1) Исходное ядро (Z, N) в результате β^+ -распада или e^- -захвата превращается в ядро $(Z-1, N+1)$.
- 2) Если энергия возбуждения E^* ядра $(Z-1, N+1)$ больше энергии отделения протона B_p , то открывается канал распада возбужденного состояния ядра $(Z-1, N+1)$ с испусканием протона.

Распад задержан на время жизни родительского ядра, претерпевающего β^+ распад.

Пример испускания запаздывающих протонов



В настоящее время известно свыше 70 β^+ -радиоактивных ядер, излучателей запаздывающих протонов.

Излучатели запаздывающих протонов

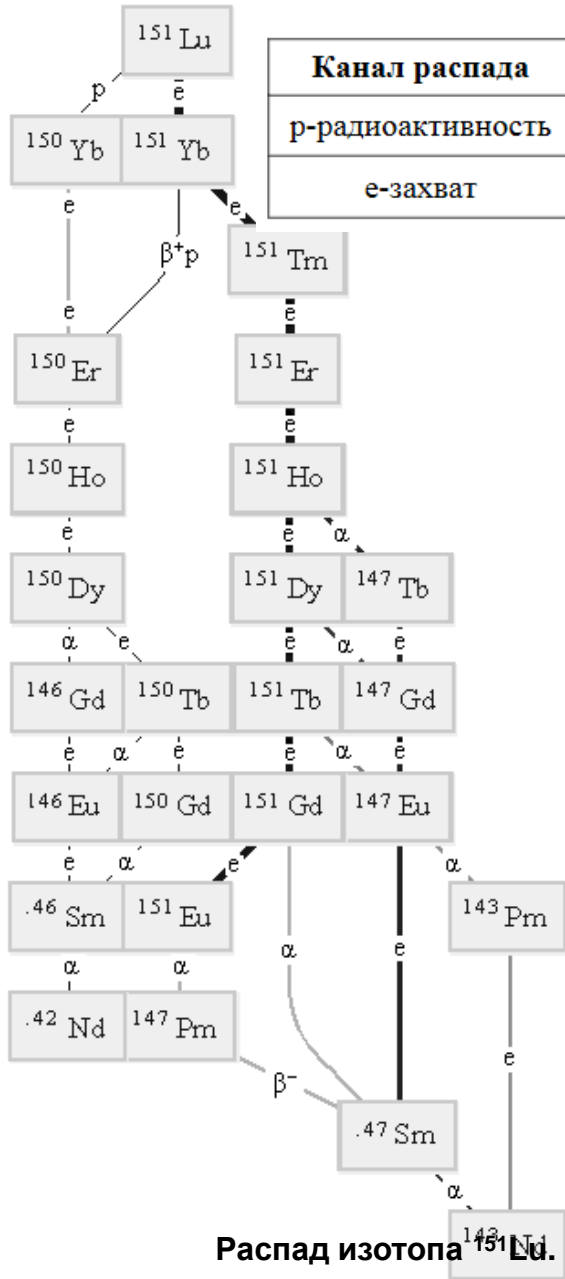
* P_p - вероятность распада по протонному каналу

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

Распады протоноизбыточных изотопов Tm ($Z = 69$) и Lu ($Z = 71$)

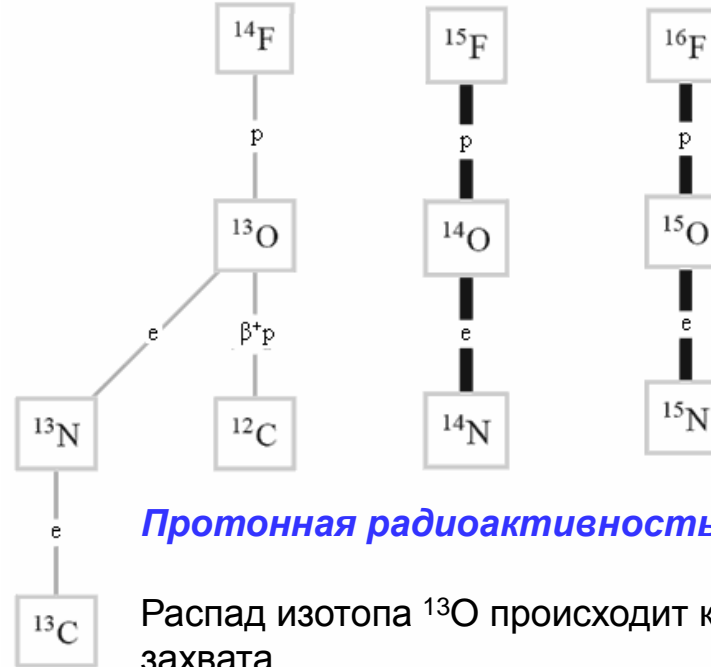
Изотоп	Канал распада	Вероятность распада, %	Ядро-продукт распада
^{145}Tm	p-распад	100	^{144}Er
^{146}Tm	запаздывающие протоны	100	^{145}Ho
^{147}Tm	e-захват	85	^{147}Er
	p-распад	15	^{146}Er
^{150}Lu	p-распад,	68	^{149}Yb
	e-захват	32	^{150}Yb
^{151}Lu	p-распад	63,4	^{150}Yb
	e-захват	36,4	^{151}Yb

Каналы распада изотопа ^{151}Lu



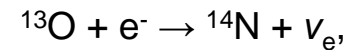
Распад изотопа ^{151}Lu .

Канал распада	Вероятность распада, %	Продукт распада
p-радиоактивность	63.4	^{150}Yb
e-захват	36.6	^{151}Yb

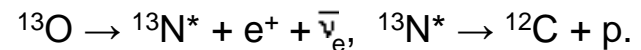


Протонная радиоактивность изотопов $^{14,15,16}\text{F}$

Распад изотопа ^{13}O происходит как в результате e-захвата



так и в результате испускания запаздывающих протонов



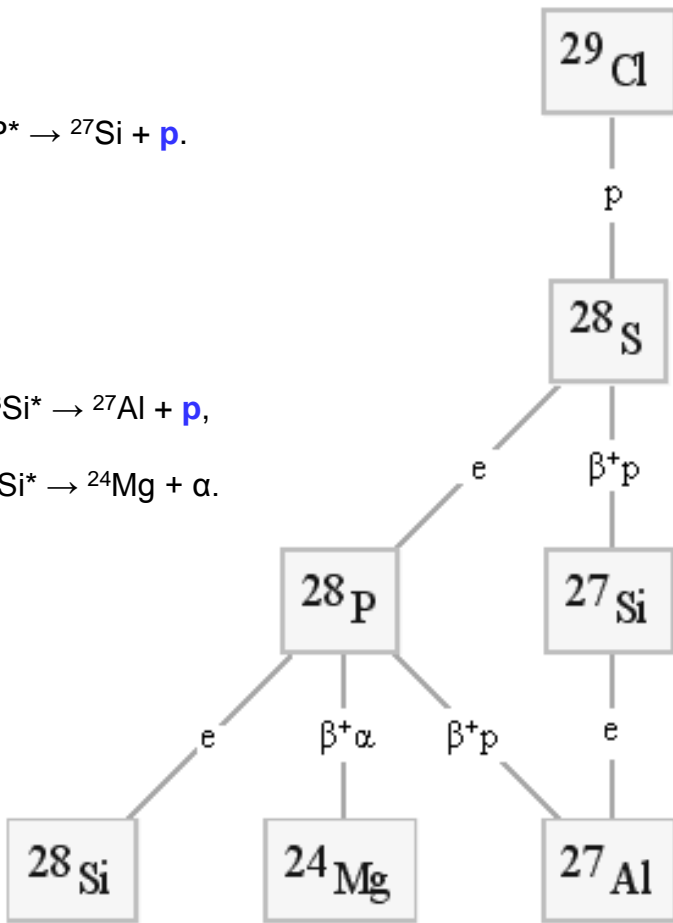
Протонная радиоактивность ^{29}Cl .

Распад изотопа ^{28}S происходит в результате

- e-захвата $^{28}\text{S} + e^- \rightarrow ^{28}\text{P} + \nu_e$,
- испускания запаздывающих протонов $^{28}\text{S} \rightarrow ^{28}\text{P}^* + e^+ + \bar{\nu}_e$, $^{28}\text{P}^* \rightarrow ^{27}\text{Si} + p$.

Распад изотопа ^{28}P

- e-захвата $^{28}\text{P} + e^- \rightarrow ^{28}\text{Si} + \nu_e$,
- испускания запаздывающих протонов $^{28}\text{P} \rightarrow ^{28}\text{Si}^* + e^+ + \bar{\nu}_e$, $^{28}\text{Si}^* \rightarrow ^{27}\text{Al} + p$,
- испускание запаздывающих α -частиц $^{28}\text{P} \rightarrow ^{28}\text{Si}^* + e^+ + \bar{\nu}_e$, $^{28}\text{Si}^* \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \alpha$.



3. Двухпротонная радиоактивность



В.И.Гольданский
(1923-2001)

Двухпротонная радиоактивность была предсказана В.И. Гольданским в 1960 г.

Этот тип радиоактивного распада обусловлен спариванием протонов в атомных ядрах. В некоторых случаях от ядра с чётным числом протонов Z оказывается легче оторвать сразу два протона, чем один «чётный» протон.

Двухпротонная радиоактивность должна наблюдаться вблизи границы протонной радиоактивности (proton drip-line) в атомных ядрах, имеющих чётное число протонов.

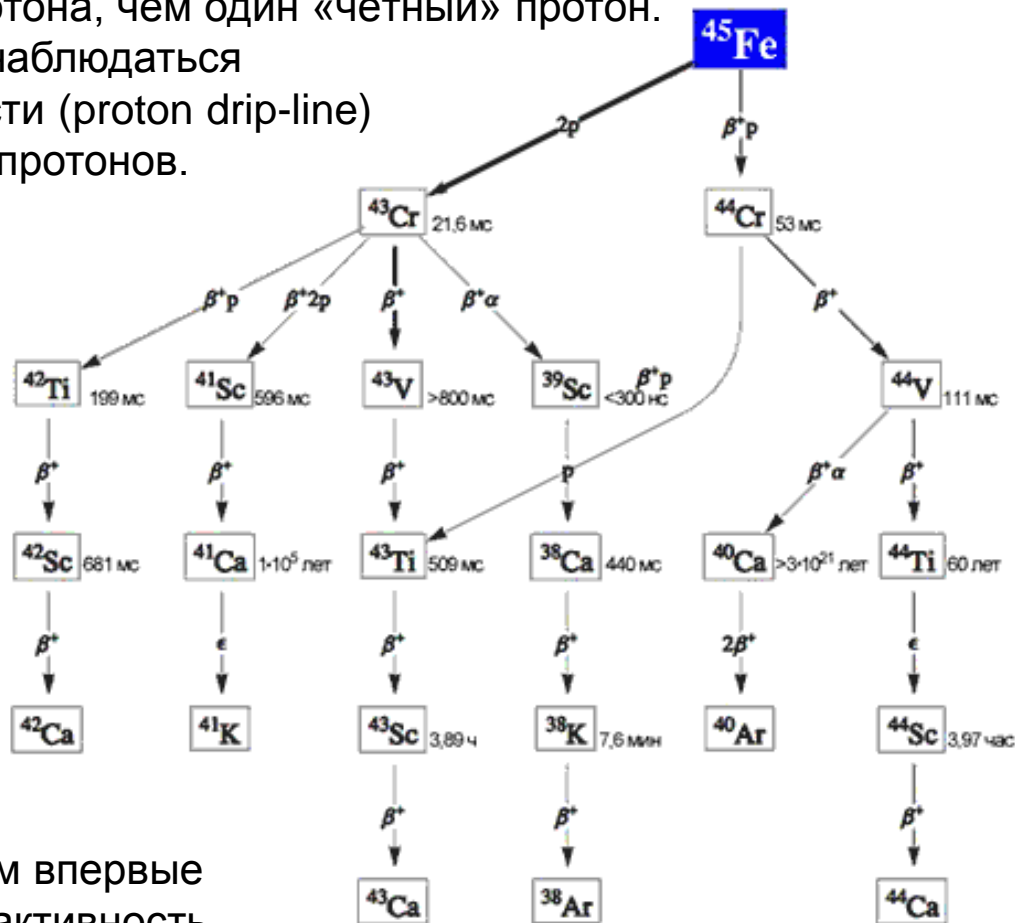
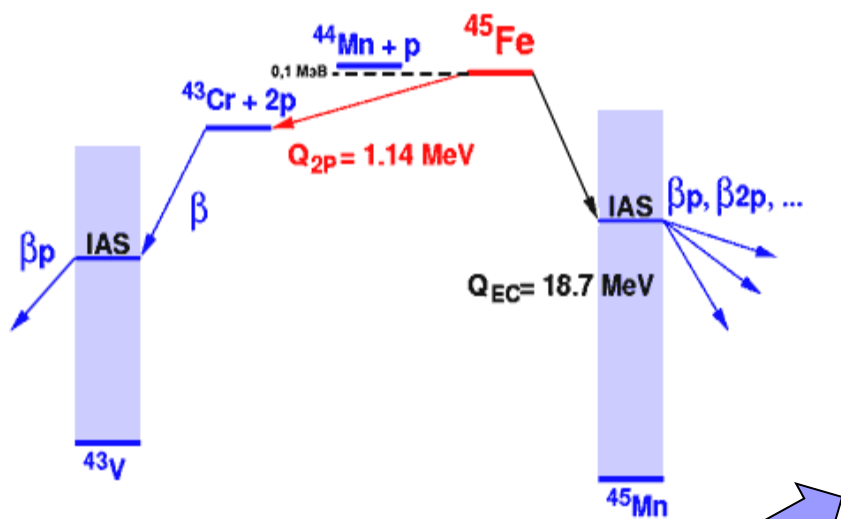
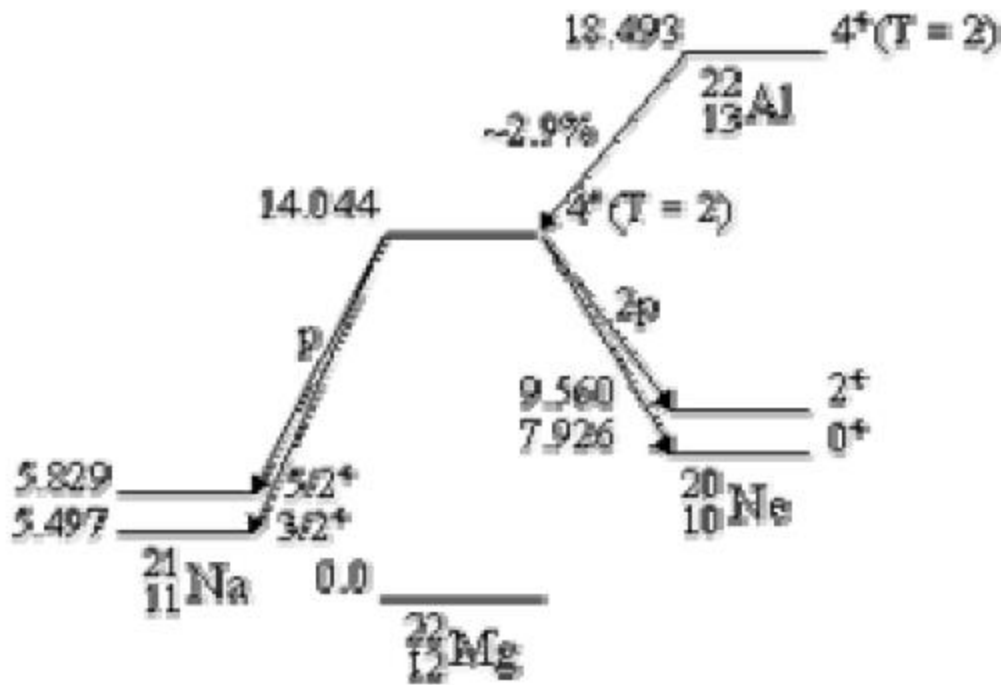
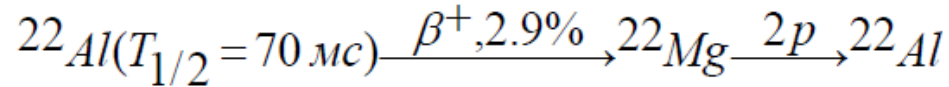


Схема распада изотопа ^{45}Fe , на котором впервые была обнаружена двухпротонная радиоактивность.

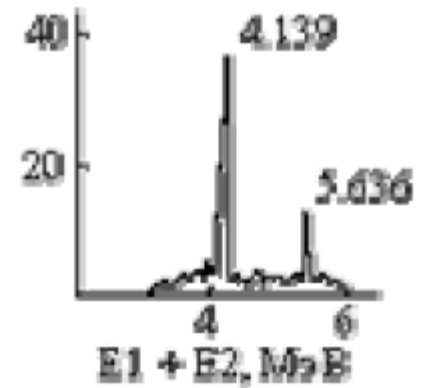
* IAS – isobar analog state

Запаздывающая двухпротонная радиоактивность.

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



Цепочка распадов ^{22}Al

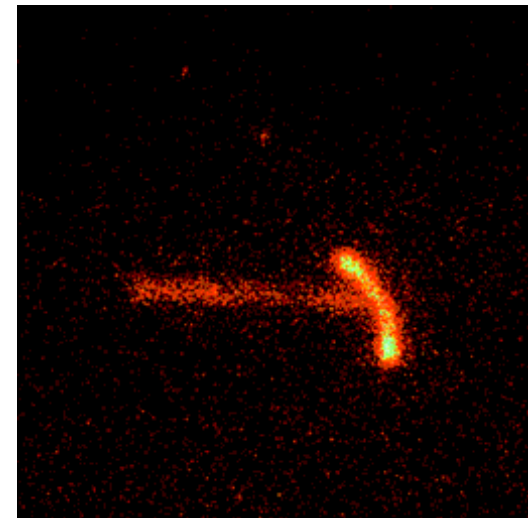
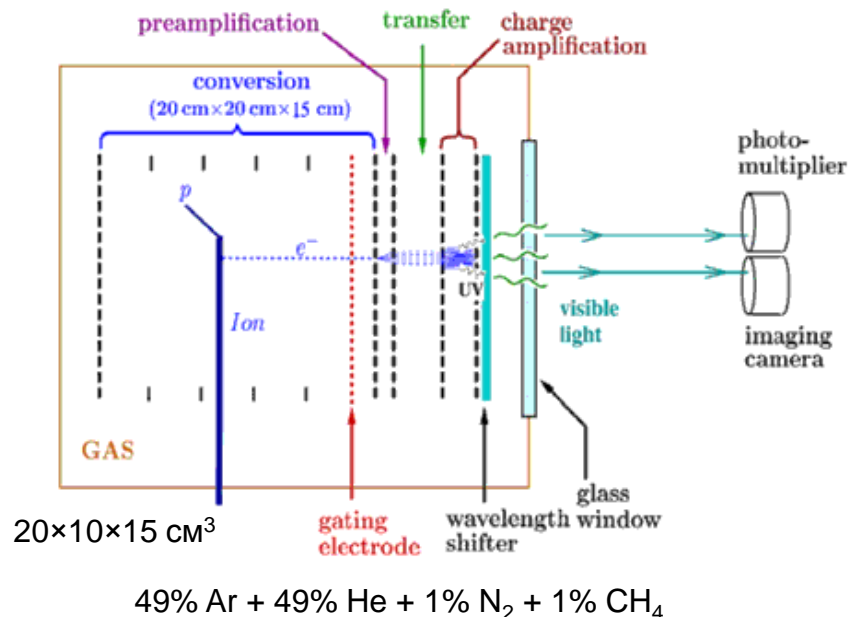


Спектры протонов в режиме совпадений

Для идентификации канала 2p-распада было желательно измерить энергию каждого из двух протонов и угловую корреляцию их импульсами. Для решения этой задачи были созданы специальные приборы

- 1) оптическая время-проекционная камера ОТПС (Optical Time Projection Chamber)
[K. Miernik, W. Dominik et al. NIM A 581 (2007) 194–197; Phys. Rev. Lett. 99, 192501 (2007)],
- 2) время-проекционная камера (TPC - Time Projection Chamber)
[B. Blank, L. Audirac et al. NIM B 266 (2008), 4606–4611],

которые позволяли визуально регистрировать низкоэнергичные протоны, образующиеся при 2p-распаде ядер [J. Giovinazzo, B. Blank et al. Phys. Rev. Lett. 99, 102501 (2007)].



два коротких ярких трека от протонов распада с энергией ~0,6 МэВ, испущенных через 535 мкс после попадания изотопа ⁴⁵Fe в камеру. Более слабый след слева соответствует изотопу ⁴⁵Fe.

Двухпротонная радиоактивность изотопов ^{46}Fe , ^{48}Ni , ^{54}Zn

	Энергия 2p-распада, МэВ	Период полураспада изотопа, мс	Относительная вероятность 2p-распада	Парциальный период 2p-распада изотопа, мс
^{45}Fe	1.151 ± 0.015	$2.5^{+0.2}_{-0.2}$	0.62 ± 0.05	$3.9^{+0.4}_{-0.4}$
^{48}Ni	1.35 ± 0.02	$2.1^{+2.1}_{-0.7}$	$0.25^{+0.29}_{-0.19}$	$8.4^{+12.8}_{-7.0}$
^{54}Zn	1.48 ± 0.02	$3.2^{+1.8}_{-0.8}$	$0.87^{+0.10}_{-0.17}$	$3.7^{+2.2}_{-1.0}$

4. Кластерная радиоактивность

Кластерная радиоактивность – способность некоторых тяжелых ядер самопроизвольно испускать кластеры – ядра ^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne , ^{26}Ne , ^{28}Mg , ^{30}Mg , ^{32}Si и ^{34}Si .

В 1984 году двумя независимо друг от друга работающими группами в Англии [H.J. Rose, G.A. Jones Nature 1984, vol 307 245-247] и СССР [Д.В. Александров и др. Письма в ЖЭТФ 1984 т.40 152-154] был обнаружен радиоактивный распад ^{223}Ra с вылетом ядер ^{14}C :

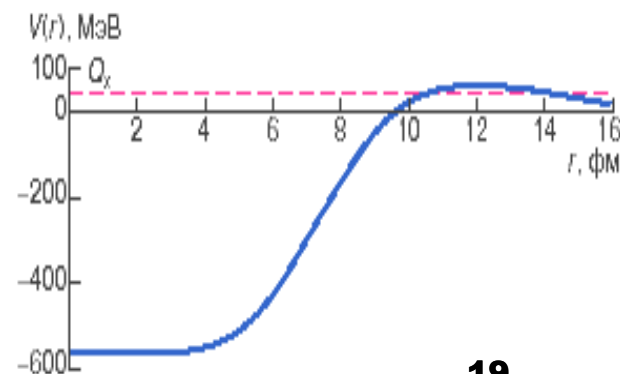
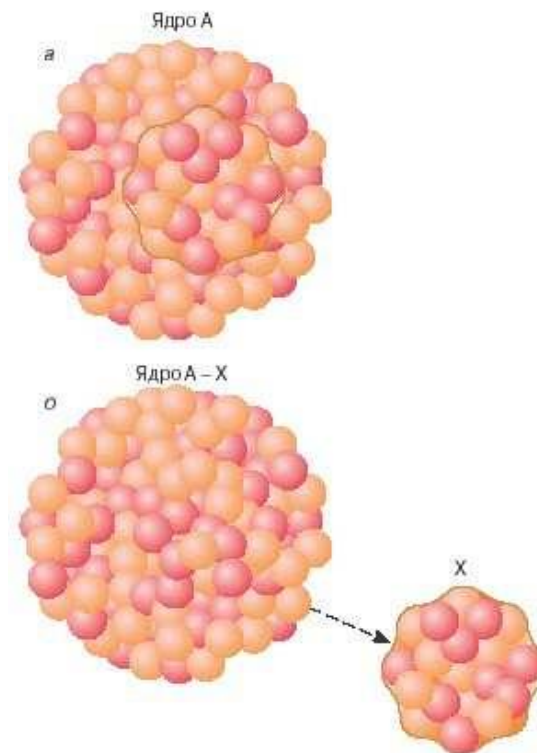


Вероятность испускания ядер ^{14}C почти на **10 порядков** меньше, чем вероятность испускания α -частиц.

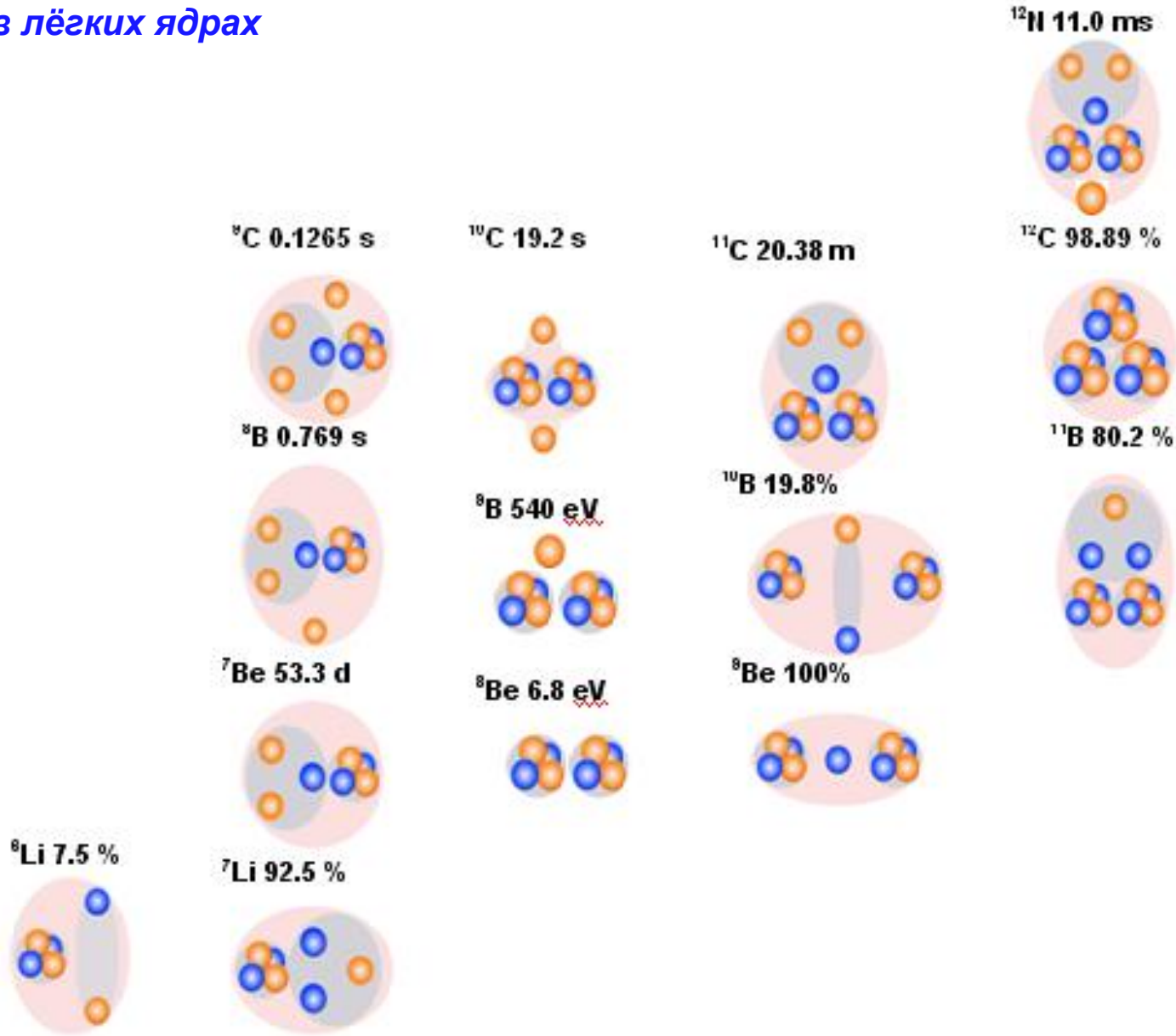
Константа кластерного распада λ или период полураспада $T_{1/2}$ определяется вероятностью образования кластера на поверхности остаточного ядра в единицу времени w и вероятностью прохождения сквозь потенциальный барьер D

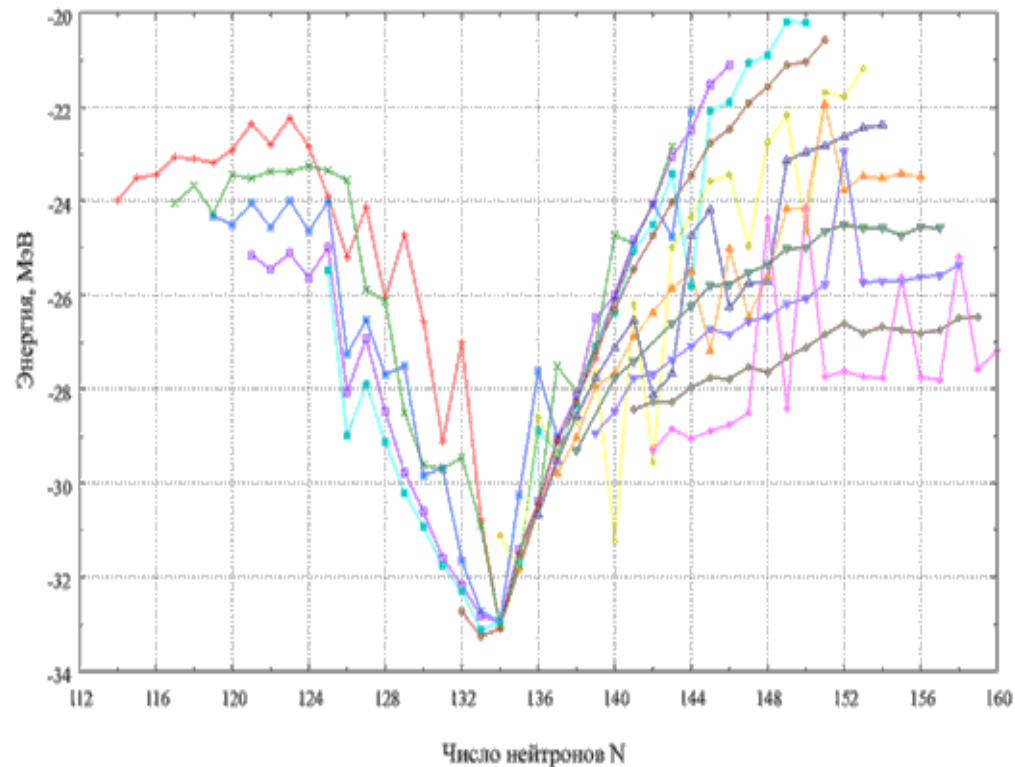
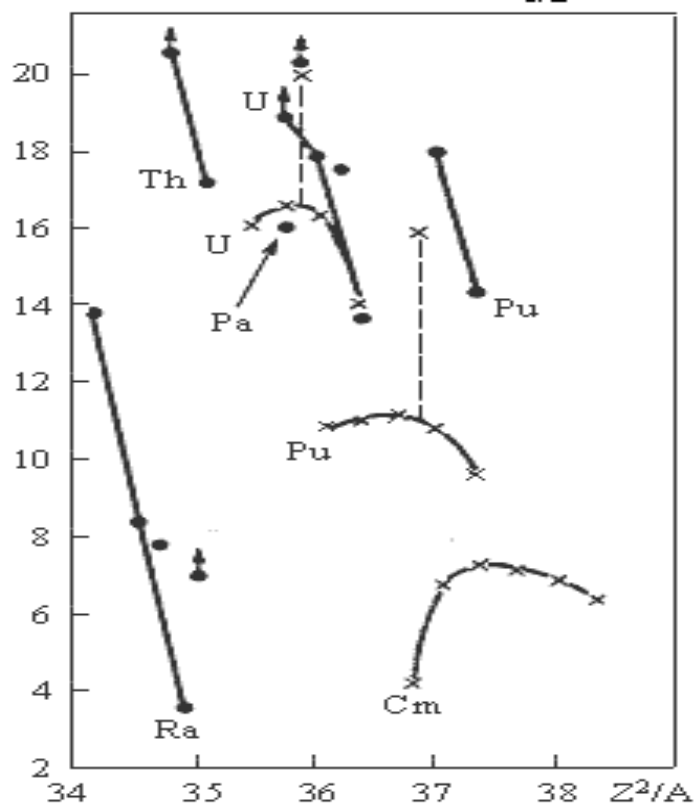
$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = wD.$$

В настоящее время известно свыше 20 изотопов, для которых обнаружена кластерная радиоактивность



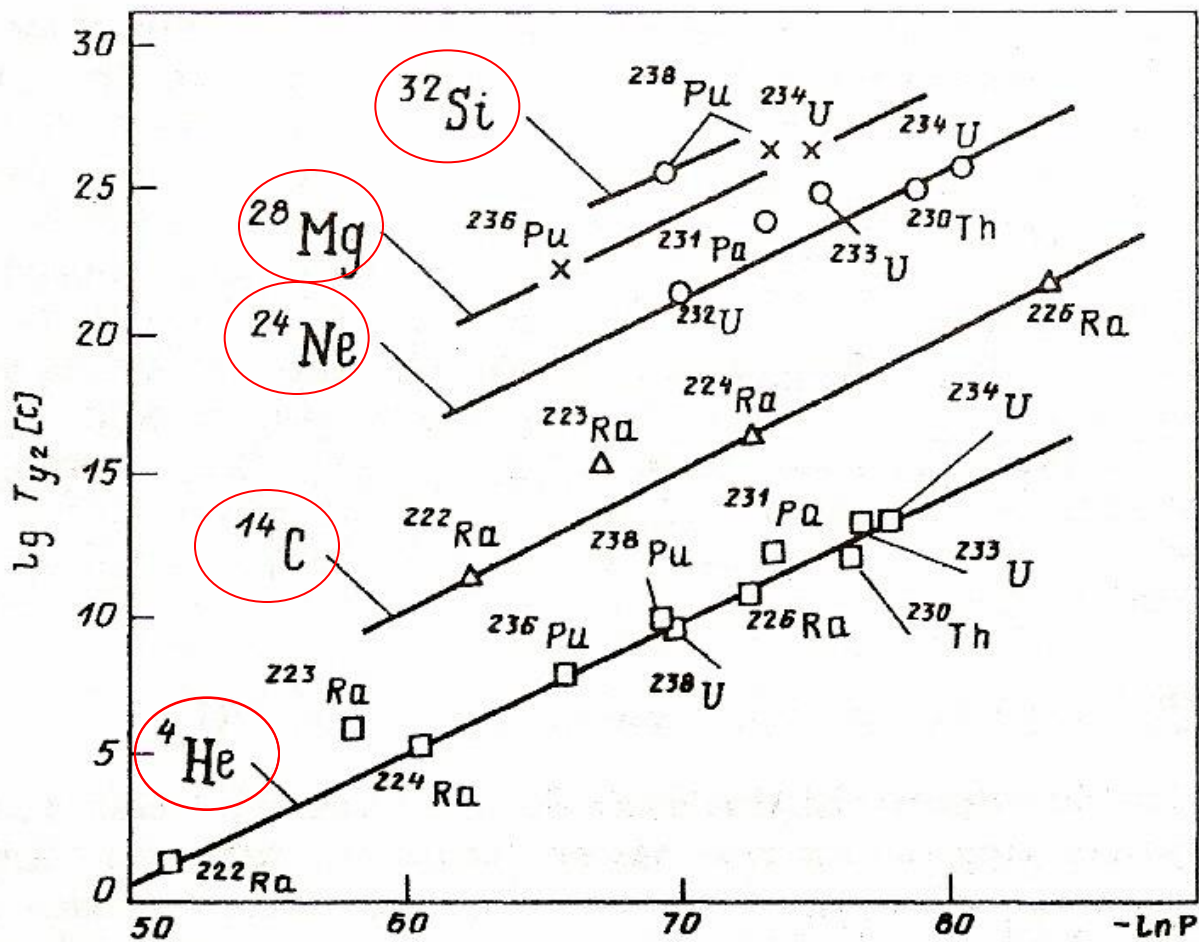
Кластеры в лёгких ядрах





Логарифмы периодов полураспада в случае кластерной радиоактивности распада (точки) и спонтанного деления (крестики) в зависимости от параметра делимости Z^2/A .

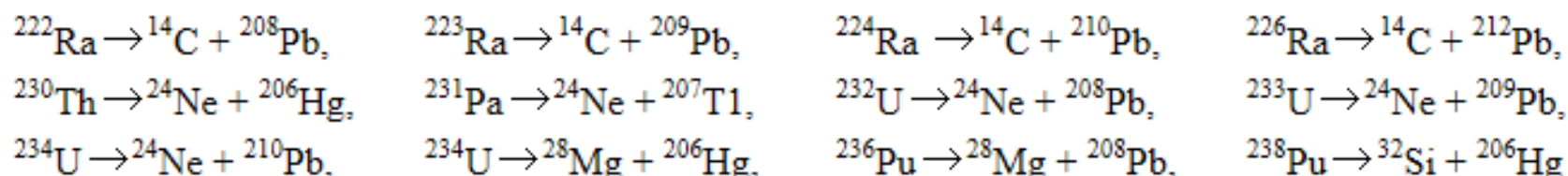
Энергия отделения кластера ^{14}C от изотопов химических элементов от радия ($Z = 88$) до фермия ($Z = 100$) в зависимости от числа нейтронов N .



Зависимость периодов кластерных распадов от проницаемости кулоновского барьера P .

Нижняя прямая описывает альфа-распады.

Достаточно хорошо экспериментально и теоретически изученные примеры кластерного распада

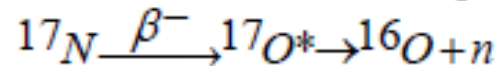


1. Все известные на сегодняшний день ядра, подверженные кластерному распаду, относятся к области тяжелых ядер с массовыми числами $A > 208$.
2. Зарядовые Z_f и массовые A_f числа дочерних ядер, возникающих при испускании кластеров из тяжелых ядер, лежат в узких областях: $80 \leq Z_f \leq 82$, $206 \leq A_f \leq 212$.
3. Кинетическая энергия вылетающей частицы близка к так называемому кинематическому пределу, это означает, что она забирает почти всю энергию распада. Следовательно, после осуществления распада дочернее ядро остается или в основном, или в возбужденном состоянии, но с невысокой энергией возбуждения E^* ($E^* \leq 1.5$ МэВ).

...

5. Нейтронная радиоактивность

Испускание нейтрона может происходить в цепочке распада, когда энергия возбуждения дочернего ядра превышает энергию связи нейтрона. При этом массовое число уменьшается на единицу. Пример испускания запаздывающих нейтронов



Число обнаруженных нейтронорадиоактивных ядер ~ 20 . Предсказано ~ 3000 ...

Нейтронную радиоактивность обнаруживают *все тяжелые изотопы* лёгких ядер с $Z = 1$ (${}^{4,5,6}\text{H}$) и $Z = 2$ (${}^{5,7,9,10}\text{He}$).

Нейтронная радиоактивность наблюдается вплоть до ядер с $Z = 16$, включая тяжелые изотопы ${}^{26}\text{O}$, ${}^{33}\text{Ne}$, ${}^{36}\text{Na}$, ${}^{39}\text{Mg}$ и ${}^{49}\text{S}$.

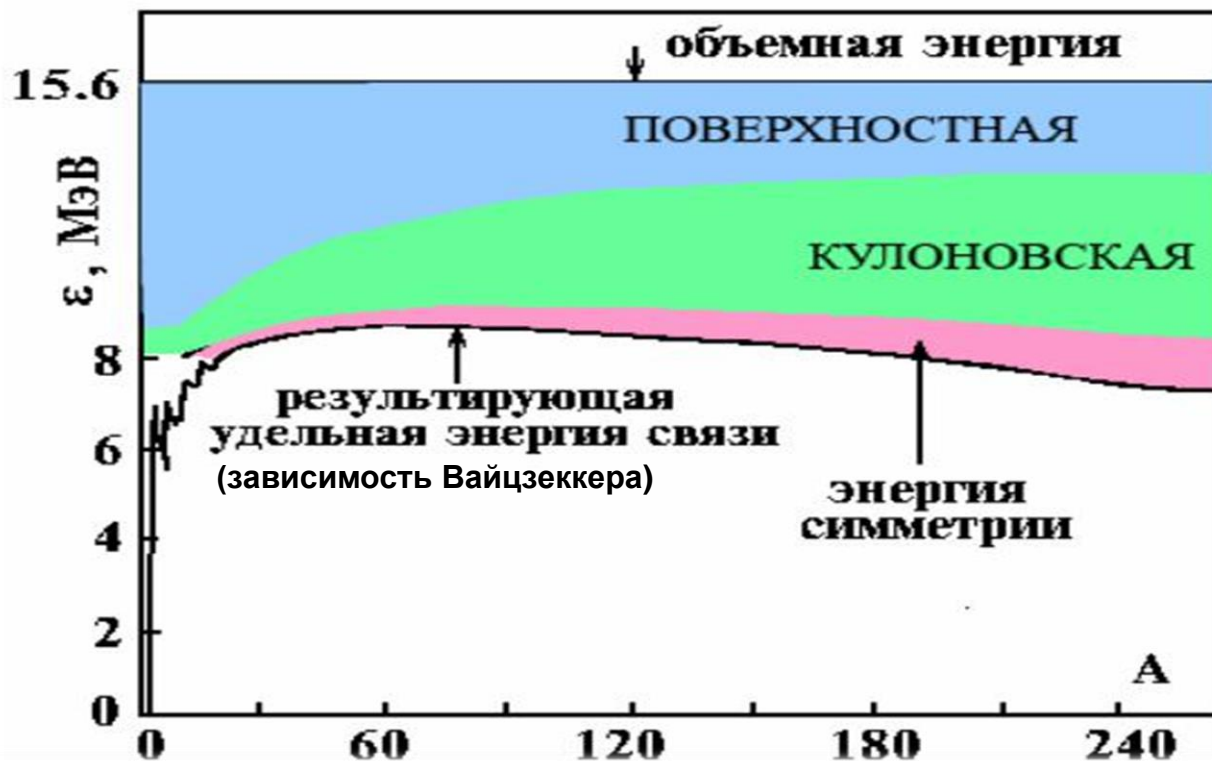
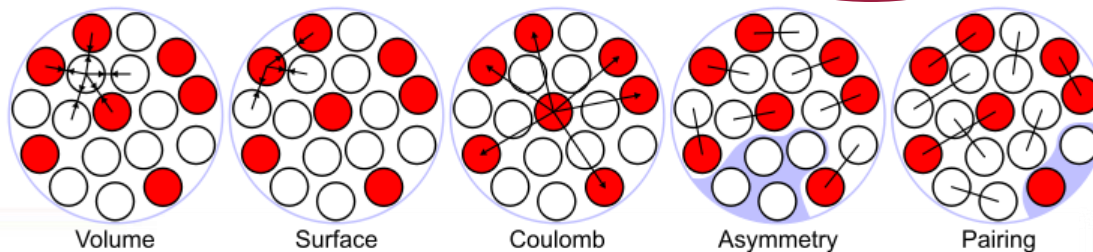
Увеличение вероятности испускания нейтронов с ростом числа нейтронов в ядре обусловлено *увеличением энергии симметрии* (принцип Паули запрещает вплотную сближаться двум нуклонам одинакового сорта с одинаковыми ориентациями спинов)

$$E_{\text{симм}} = 23.6(A-2Z)^2/A$$

Период полураспада с испусканием нейтрона определяется в основном орбитальным моментом, уносимым нейтроном, т.к. для нейтронов не существует кулоновского потенциального барьера, но существует центробежный потенциальный барьер.

При распаде атомных ядер с испусканием нейтронов может сильно изменяться конфигурация начального ядра, что также приводит к увеличению времени жизни радиоактивных ядер.

$$E_{св} = a_{об} A - a_{нов} A^{2/3} - a_{кул} Z^2 A^{-1/3} - a_{сим} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta \cdot A^{-3/4}$$

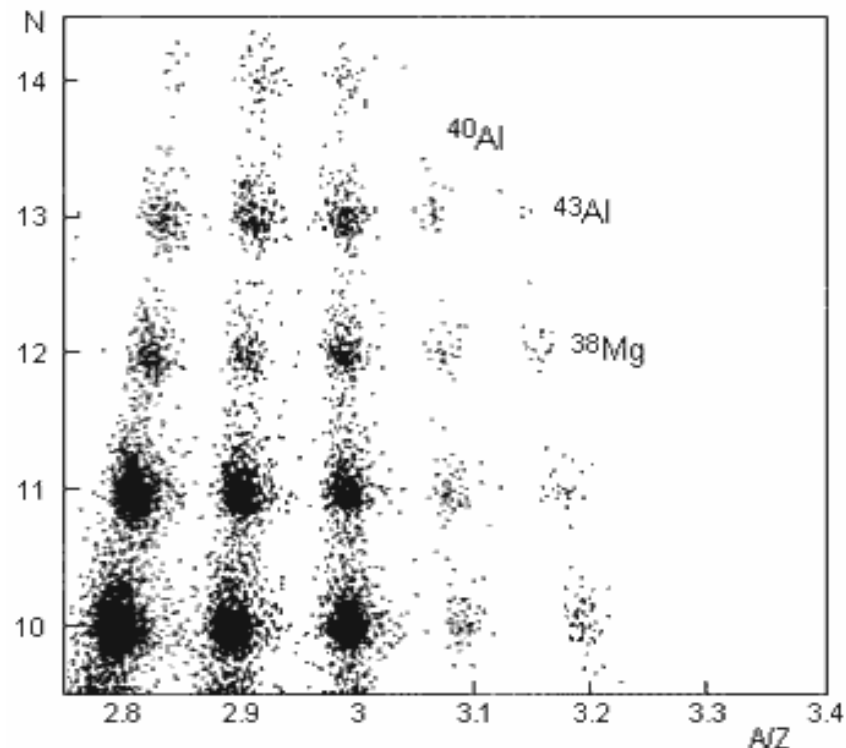


Для получения нейтроноизбыточных ядер в RIKEN использовалась фрагментация пучка ^{48}Ca с энергией 70 МэВ/нуклон на мишени ^{181}Ta .

Фрагменты отбирались и накапливались с помощью RIKEN-RIPS спектрометра.

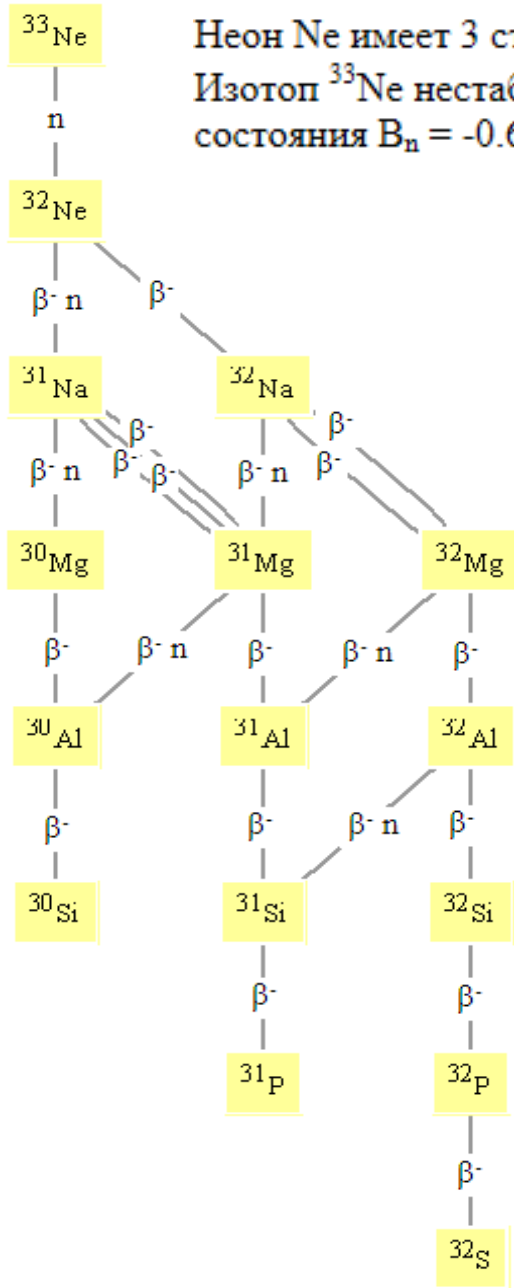
Идентификация радиоактивных частиц проводилась с помощью измерения магнитной жесткости, времени пролета, измерения потерь энергии E и полной кинетической энергии.

Было обнаружено 3 новых нейтроноизбыточных изотопа – ^{38}Mg (18 случаев), ^{40}Al (34 случая), ^{41}Al (4 случая).



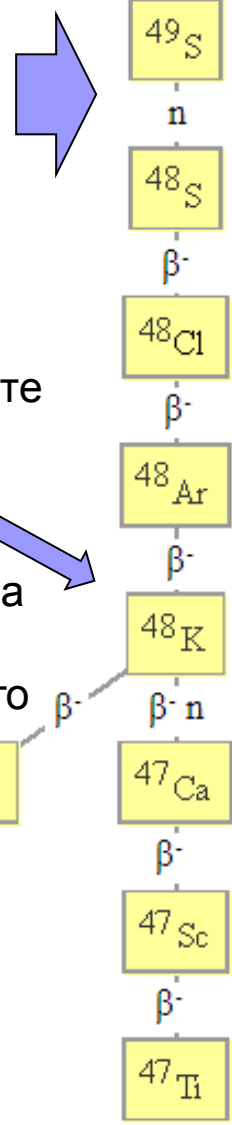
Двумерное распределение изотопов $A/Z - Z$, полученных в реакции взаимодействия ионов пучка ^{48}Ca с танталовой мишенью в течение одного дня.

H. Sakurai et al. Nucl. Phys. A616, 1997, p.311.



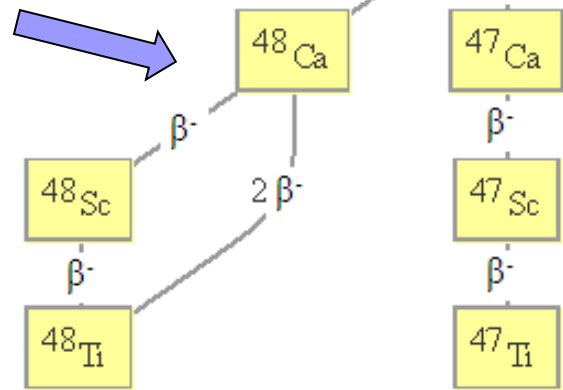
Неон Ne имеет 3 стабильных изотопа ^{20}Ne (20.48%), ^{21}Ne (0.27%), ^{22}Ne (9.25%).
 Изотоп ^{33}Ne нестабилен по отношению к испусканию нейтрона из основного состояния $B_n = -0.6$ МэВ. Период полураспада $T_{1/2} < 180$ нс.

Нейтронная радиоактивность изотопа ^{49}S и цепочка последующих распадов.



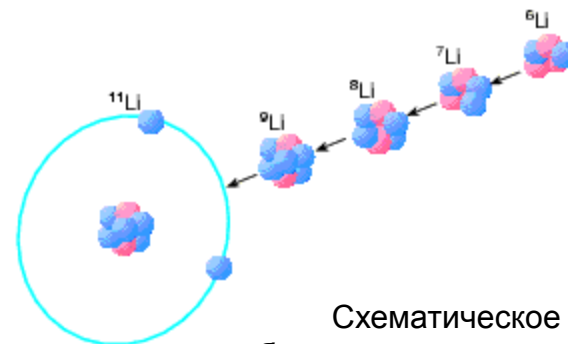
Изотоп ^{48}K распадается как в результате β^- -распад, так и с испусканием запаздывающих нейтронов.

Изотоп ^{48}Ca имеет период полураспада $T_{1/2} = 2 \cdot 10^{19}$ лет и распадается в результате β^- -распада (25%) и двойного β^- -распада (75%).



Граница обнаруженных изотопов излучателей нейтронов

Порядковый номер хим. элемента	Символ хим. элемента	Массовые числа A стабильных изотопов	Массовое число A нейтронно-радиоактивного изотопа
1	H	2, 3	4, 5, 6
2	He	3, 4	7, 9, 10
3	Li	6, 7	10, 12(?)
4	Be	9	13, 15(?)
5	B	10, 11	16, 18(?)
6	C	12, 13	21(?)
7	N	14, 15	17, 18(?)
8	O	16, 17, 18	25, 26, 27(?), 28(?)
9	F	19	28, 30(?)
10	Ne	20, 21, 22	33
11	Na	23	36
12	Mg	24, 25, 26	39
16	S	32, 33, 34	49



Схематическое изображение эволюции ядра лития по мере увеличения числа нейтронов

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

The image shows a color-coded periodic table of elements. The groups are labeled I through VIII at the top. The elements are color-coded by group: Group I (pink), Group II (purple), Groups III-VI (yellow), Group VII (orange), Group VIII (light blue), Group IX (dark blue), Group X (cyan), Group XI (light green), Group XII (green), Group XIII (light blue), Group XIV (blue), Group XV (dark blue), Group XVI (purple), Group XVII (pink), Group XVIII (yellow), and Group XIX (orange). Below the table, there are chemical formulas for oxides: R₂O, RO, R₂O₃, RO₂, R₂O₅, RO₃, R₂O₇, RO₄, RH₄, RH₃, H₃R, and HR. The lanthanoids and actinoids are shown at the bottom.

www.calc.ru

Д.И. Менделеев
1834-1907

СИМВОЛ ЭЛЕМЕНТА

ПОРЯДОКОВЫЙ НОМЕР

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ АТОМНАЯ МАССА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СЛОЯМ

5-элементы
6-элементы
7-элементы
8-элементы

«...гениальным предвидением Менделеева рамки периодической системы так широко предусмотрены, что каждое новое открытие, оставаясь в объёме их, ещё более укрепляет её»

Лиза Мейтнер

«Атомное ядро и периодическая система элементов»,
УФН, т.15, вып. 1, стр. 1 (1935)

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, §20, стр.282-293
2. Б.С. Ишханов. Радиоактивность,
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/index.html>
3. И.Н. Бекман. Ядерная физика, Лекция 9. Экзотические типы распада, <http://profbeckman.narod.ru/YadFiz.files/L9.pdf>