

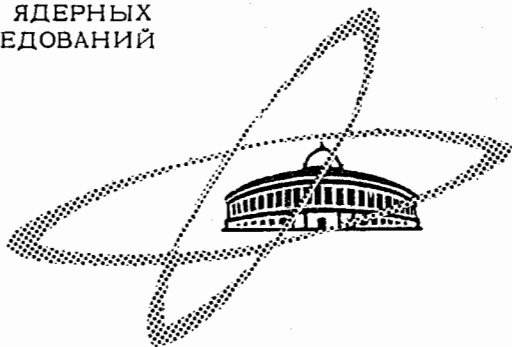
1706

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Ок. чнт. зала

P-1706



В.А. Карнаухов, Г.М. Тер-Акопьян

О ПРОТОННОМ РАСПАДЕ ЯДЕР  
С  $Z > 50$

О ПРОТОННОМ РАСПАДЕ ЯДЕР С  $Z > 50$ .

Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна. 1964.

P-1706

Karnaukhov V.A., Ter-Akopyan G.M.

On Proton Decay of Nuclei with  $Z > 50$ .

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna. 1964.

P-1708

В.А. Карнаухов, Г.М. Тер-Акопян

О ПРОТОННОМ РАСПАДЕ ЯДЕР  
С  $Z > 50$

Направлено в Nuclear Physics

ОИЯИ  
БИБЛИОТЕКА

## А н н о т а ц и я

Рассмотрена возможность протонного распада ядер с  $Z > 50$ . Этот вид радиоактивного превращения, включающий в себя как испускание запаздывающих протонов, так и протонный распад из основного состояния, должен быть весьма распространенным явлением среди нейтронодефицитных изотопов всех элементов вплоть до висмута. Заметная конкуренция со стороны  $\alpha$ -распада может проявиться лишь для ядер с числом протонов или нейтронов, несколько превышающим магические числа 50 и 82. С увеличением  $Z$  энергия связи протона все более плавно зависит от массового числа. Поэтому для каждого элемента тяжелее олова можно указать от двух до четырех изотопов, нестабильных в отношении испускания протона из основного состояния и имеющих измеримое время жизни ( $\tau_p \sim 10^{-1} - 10^{-10}$  сек). Для элементов с нечетным  $Z$  сюда относятся (начиная с  $Z = 51$ ): Sb<sup>105,106</sup>, I<sup>109,110</sup>, Cs<sup>114,115</sup>, La<sup>119,120</sup>, Pr<sup>124,125</sup>, Pm<sup>128,129</sup>, Eu<sup>132,133</sup>, Tb<sup>136,137,138</sup>, Ho<sup>141,142</sup>, Tm<sup>146-148</sup>, Lu<sup>151-154</sup>, Ta<sup>157-160</sup>, Re<sup>162-165</sup>, Ir<sup>165-168</sup>, Au<sup>170-173</sup>, Tl<sup>172-175</sup>. Большинство этих изотопов можно получить из материнских ядер с четным  $Z$  после  $\beta^+$ -распада; это значительно упрощает постановку опытов. Приводятся некоторые ядерные реакции с тяжелыми ионами, которые позволяют получить эти изотопы.

Для элементов тяжелее свинца резко возрастает вероятность  $\alpha$ -распада. Однако и в этой области, вплоть до берклия, возможен протонный распад из основного состояния с  $\tau_p \approx 10^{-5} - 10^{-10}$  сек.

## Abstract

The probability of proton decay of nuclei with  $Z > 50$  is discussed. This kind of radioactivity including the emission of delayed protons as well as proton decay from the ground state should be a rather spread phenomenon among the neutron-deficient isotopes of all elements up to bismuth. A notable competition on the part of  $\alpha$ -radioactivity can be displayed only for nuclei with proton or neutron numbers a little higher than magic numbers 50 and 82. As  $Z$  of the nucleus is increased the proton binding energy ever gradually depends upon the mass number. Therefore, for each element heavier than Sb from 2 to 4 isotopes unstable for proton emission from the ground state and having the measurable half-life ( $\tau_p \approx 10^{-1} - 10^{-10}$  sec) can be observed. Among the elements with odd  $Z$  the following are referred to this series (beginning with  $Z = 51$ ): Sb<sup>105,106</sup>, I<sup>109,110</sup>, Cs<sup>114,115</sup>, La<sup>119,120</sup>, Pr<sup>124,125</sup>, Pm<sup>128,129</sup>, Eu<sup>132,133</sup>, Tb<sup>136,137,138</sup>, Ho<sup>141,142</sup>, Tm<sup>146-148</sup>, Lu<sup>151-154</sup>, Ta<sup>157-160</sup>, Re<sup>162-165</sup>, Ir<sup>165-168</sup>, Au<sup>170-173</sup>, Tl<sup>172-175</sup>. The majority of these isotopes could be obtained from the parent nuclei with even  $Z$  in the result of  $\beta^+$ -decay, which considerably simplifies the experiment. Several nuclear reactions with heavy ions which allow to get these isotopes are given.

The probability of  $\alpha$ -decay is sharply increased for elements heavier than Pb. However, even in this region up to Bk the proton decay from the ground state with  $\tau_p \approx 10^{-5} - 10^{-10}$  sec is possible.

Вопрос о протонном распаде радиоактивных ядер неоднократно обсуждался в литературе (перечень основных работ приведен в<sup>1/</sup>). Для элементов с  $Z < 50$  предсказано, какие изотопы должны быть излучателями протонов и рассмотрены основные черты различных видов  $p$ -распада.

Энергетическая возможность протонного распада появляется как следствие снижения энергии связи протона при уменьшении числа нейтронов в ядре. Рассматривались несколько механизмов протонного распада.

Во-первых, возможно синтезирование ядер с отрицательной энергией связи протона. Такие ядра нестабильны к испусканию протона из основного состояния. В этом случае картина  $p$ -распада аналогична той, которую мы имеем при  $\alpha$ -распаде из основного состояния ядра.

Во-вторых, возможен двухступенчатый механизм протонного распада - испускание запаздывающих протонов: на первом этапе - позитронный распад с высокой энергией, на втором этапе - вылет протона из возбужденного (а в некоторых случаях и из основного) состояния дочернего ядра. Если энергия протона ниже высоты кулоновского барьера, протон выйдет за пределы ядра путем квантовомеханического проникновения сквозь барьер. Картина распада при этом подобна явлению испускания длинно-пробежных  $\alpha$ -частиц. Если ядром испускается надбарьерный протон, можно говорить об аналогии с запаздывающими нейтронами.

Возможен также третий механизм протонного распада - изомерный<sup>1/</sup>.

Весьма вероятно, что некоторые четные по  $Z$  изотопы с избытком протонов будут испытывать радиоактивный распад иного типа - двухпротонный<sup>2,3/</sup>. Предполагаемое существование такого распада является прямым следствием эффекта парного взаимодействия нуклонов в ядре, поэтому энергия двухпротонного распада ограничена величиной энергии спаривания.

К настоящему времени опубликовано несколько работ об экспериментальном наблюдении излучателей протонов<sup>4-7,1/</sup>. Во всех случаях речь идет, по-видимому, об испускании запаздывающих протонов. Наиболее тяжелый из наблюдавшихся излучателей - изотоп криптона либо брома с массовым числом  $70-72$ <sup>6,1/</sup>.

Возможность существования  $p$ -распада ядер с  $Z < 50$  рассмотрена недостаточно детально. В работе<sup>8/</sup> отмечено, что для элементов тяжелее олова основным конкурентом  $p$ -распада будет  $\alpha$ -распад. В работе<sup>9/</sup> сделан не совсем удач-

ный вывод о том, что из-за конкуренции со стороны  $\alpha$ -распада для элементов тяжелее олова испускание запаздывающих протонов вообще не должно наблюдаться.

В настоящей работе анализируются свойства нейтронодефицитных изотопов элементов с  $Z > 50$ .

В расчетах использовались значения масс из таблиц Камерона<sup>/10/</sup>, которые получены по уточненной полуэмпирической формуле с учетом влияния оболочек. Время жизни ядер в отношении испускания протона или  $\alpha$ -частицы определялось по известным формулам для квантово-механической проницаемости барьера<sup>/11/</sup>. Для нечетных ядер вводился коэффициент запрета (порядка десяти) в отношении  $\alpha$ -распада.

Такие расчеты, разумеется, не претендуют на большую точность, однако, с их помощью можно сделать ряд существенных выводов.

Оказалось, что протонный распад должен быть весьма распространенным, а в ряде случаев наиболее вероятным видом радиоактивного распада среди нейтронодефицитных изотопов всех элементов вплоть до висмута. Заметная конкуренция со стороны  $\alpha$ -распада может проявиться лишь для ядер с числом протонов или нейтронов, несколько превышающим магические числа 50 и 82.

Изотопы, которые будут испускать при радиоактивном распаде протоны, образуют обширную область, показанную на рисунке 1. Детально область  $p$ -распада показана на рисунках 2 и 3 отдельно для  $Z < 50$  и  $Z > 50$ .

В правой части этой области, ближе к стабильным ядрам, имеет место лишь двухступенчатый механизм протонного распада - испускание запаздывающих протонов. Рассмотрим условия, при которых такое испускание возможно.

По мере продвижения влево от области стабильности энергия связи протона в ядре ( $B_p$ ) уменьшается, а энергия  $\beta^+$ -распада ( $E_{\beta^+}$ ) увеличивается. Испускание запаздывающих протонов возможно лишь в том случае, если величина  $E_{\beta^+}$  превышает энергию связи протона в дочернем ядре. Более того,  $E^*$  (энергия возбуждения ядра после  $\beta^+$ -распада) должна быть такой, чтобы конкуренция со стороны радиационного перехода не была подавляющей. Это, по существу, условие для энергии испускаемых протонов  $E_p = E^* - B_p$ ; конкуренция со стороны  $\gamma$ -излучения будет несущественна при  $E_p > E_{p0}$ , где  $E_{p0}$  - кинетическая энергия, при которой среднее время жизни протона в ядре  $\tau_p \sim 10^{-14}$  сек. В таблице 1 приведены значения  $E_{p0}$  для различных  $Z$ , определенные по проницаемости кулоновского барьера.

Т а б л и ц а 1

Z	20	30	40	50	60	70	80
$E_{p^0}$	0,7	0,95	1,5	2,0	2,5	2,9	3,4

Таким образом, для появления протонного излучения после  $\beta^+$ -распада необходимо:  $\Delta_p = E_{\beta^+} - (E_{p^0} + B_p) > 0$  /1/. Ядра, начиная с которых выполняется это неравенство, лежат на границе области  $p$ -распада. Разумеется, для этих ядер имеется лишь энергетическая возможность испускания запаздывающих протонов, вероятность же этого явления мала. По мере увеличения дефицита нейтронов разность  $\Delta_p$  возрастает, растет и вероятность испускания запаздывающих протонов.

При достаточно сильном обеднении ядра нейтронами энергия связи протона становится отрицательной. Это отвечает энергетической возможности  $p$ -распада из основного состояния. У нечетных по  $Z$  изотопов такая возможность наступает несколько раньше, чем у четных. Энергии  $\beta^+$ -переходов здесь равны 10-15 Мэв, следовательно, периоды полураспада для разрешенных переходов будут порядка  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  сек. Поэтому протонный распад из основного состояния проявится, если  $\tau_p \lesssim 10^{-1}$  сек.

Особый интерес представляют изотопы с временем жизни относительно испускания протонов от 0,1 сек до  $10^{-10}$  сек, так как такое время может быть измерено. Сюда относятся (начиная с  $Z = 51$ )  $Sb^{105,106}$ ,  $I^{109,110}$ ,  $Cs^{114,115}$ ,  $La^{119,120}$ ,  $Pr^{124,125}$ ,  $Pm^{128,129}$ ,  $Eu^{132,133}$ ,  $Tb^{136-138}$ ,  $Ho^{141,142}$ ,  $Tm^{146-148}$ ,  $Lu^{151-154}$ ,  $Ta^{157-160}$ ,  $Re^{162-165}$ ,  $Ir^{163-168}$ ,  $Au^{170-173}$ ,  $Tl^{172-175}$ .

Следует заметить, что с увеличением  $Z$  энергия связи протона все более плавно зависит от числа нейтронов. Поэтому для каждого элемента тяжелее олова можно указать от двух до четырех изотопов, удобных для изучения протонного распада из основного состояния. Для более легких элементов из-за резкой зависимости  $B_p$  от массового числа и большей проницаемости кулоновского барьера вероятность получения изотопов с измеримым  $\tau_p$  значительно ниже. Все ядра в области  $p$ -распада при  $Z > 50$  нестабильны в отношении испускания  $\alpha$ -частиц. На рисунках 1 и 3 проведена линия, на которой находятся изотопы с временем жизни в отношении  $\alpha$ -распада из основного состояния  $\tau_\alpha \sim 0,1$  сек. Вправо от этой линии  $\tau_\alpha > 0,1$  сек и, следовательно,  $\alpha$ -распад не может конкурировать в этой области с  $p$ -распадом и  $\beta^+$ -распадом. По другую сторону линии, для более легких изотопов,  $\tau_\alpha < 0,1$  сек. Области  $p$ -распада и  $\alpha$ -распада ( $\tau_\alpha < 0,1$  сек) перекрываются в двух местах (рис. 1 и 3) при числах нейтронов и протонов, несколько превышающих магические - 50 и 82. С уменьшением числа нейтронов в ядре

$\tau_p$  уменьшается гораздо быстрее, чем  $\tau_\alpha$ . Поэтому даже в этих местах для изотопов с нечетным  $Z$  протонный распад из основного состояния будет более вероятен, чем  $\alpha$ -распад.

Следует отметить, что во всей области  $p$ -распада для элементов тяжелее олова возможно испускание запаздывающих  $\alpha$ -частиц. Условие возможности такого процесса следующее:  $\Delta_\alpha = E_{\beta^+} - (E_{\alpha_0} + B_\alpha) > 0$ , здесь  $B_\alpha$  - энергия связи  $\alpha$ -частицы в дочернем ядре,  $E_{\alpha_0}$  определяется так же, как  $E_{p_0}$ . По мере увеличения дефицита нейтронов разность  $\Delta_\alpha$  растет значительно медленнее, чем  $\Delta_p$ , поэтому испускание запаздывающих  $\alpha$ -частиц не является опасным конкурентом для вылета протонов.

Для элементов тяжелее свинца вероятность  $\alpha$ -распада резко возрастает. Это связано с влиянием оболочки 82 протона. Тем не менее, благодаря резкой зависимости  $\tau_p$  от массового числа, в ряде случаев  $p$ -распад из основного состояния может иметь и здесь большую вероятность, чем  $\alpha$ -распад. Например, изотопы висмута  $Bi^{214-218}$ , для которых  $\tau_p \sim 10^{-5} - 10^{-10}$  сек, должны испытывать  $p$ -распад. Возможно существование излучателей протонов с такими же временами жизни и среди легких изотопов от франция до берклия. Например, для америция это  $Am^{212-215}$ .

Из-за влияния оболочки 126 нейтронов и конкуренции со стороны спонтанного деления и  $\alpha$ -распада,  $p$ -распад, по-видимому, не будет иметь места для ядер тяжелее берклия.

На рисунке 2 отмечены ядра, которые могут испытывать двухпротонный распад <sup>1/2,3/</sup>. Следует отметить, что для ядер тяжелее стронция двухпротонный распад уже не может конкурировать с разрешенным  $\beta$ -переходом. Это обстоятельство следует из того, что из-за роста кулоновского барьера и ограниченности энергии спаривания время жизни этих ядер относительно испускания одновременно двух протонов будет больше  $10^{-1}$  сек.

Область  $p$ -активных ядер с  $Z \geq 50$  значительно удалена от стабильных изотопов. Тем не менее она достижима, если использовать реакции с тяжелыми ионами. Можно привести длинный список ядерных реакций с ускоренными ионами от азота до никеля, которые позволяют получить практически любой изотоп из области  $p$ -распада. Большой интерес представляют ядра с нечетными  $Z$  в интервале от 59 до 71, нестабильные в отношении испускания протонов из основного состояния. Эти изотопы можно получить после  $\beta^+$ -распада материнских ядер с четным  $Z$ , что значительно облегчает постановку эксперимента. Такие сравнительно короткоживущие  $p$ -активные ядра ( $\tau_p \sim 10^{-1} - 10^{-10}$  сек) могут быть доставлены к спектрометру за время порядка



полупериода  $\beta^-$ -распада. Время жизни в отношении испускания протона может быть измерено в данном случае по задержке  $p^-$ -распада относительно предшествующего позитронного перехода. В таблице 2 приводятся некоторые ядерные реакции, с помощью которых можно получить подобные излучатели.

Т а б л и ц а 2

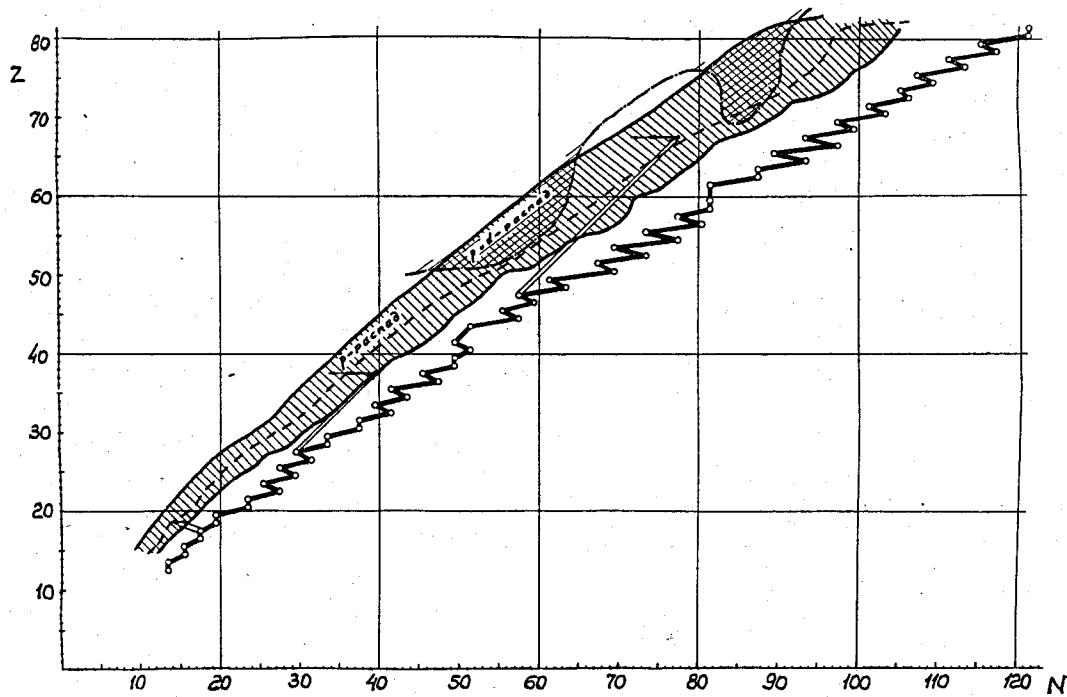
Протонно-радиоактивное ядро	Энергия $p^-$ -распада (Мэв)	Ядерная реакция, в которой образуется материнское $\beta^+$ -активное ядро
$Pr^{124}$	1,3	$Ru^{96} (Si^{28}, 6n) Nd^{124}$
$Pr^{125}$	0,9	$Ru^{96} (Si^{28}, 5n) Nd^{125}$
$Pm^{128}$	1,5	$Cd^{106} (Si^{28}, 6-5n) Sm^{128-129}$
$Pm^{129}$	1,1	$Ru^{96} (Ar^{36}, 3-4n) Sm^{129-128}$
$Eu^{132}$	1,4	$Cd^{106} (S^{32}, 5-6n) Gd^{132-132}$
$Eu^{133}$	1	$Ru^{96} (Ca^{40}, 3-4n) Gd^{133-132}$
$Tb^{136}$	1,6	$Cd^{106} (Ar^{36}, 4-6n) Dy^{136-136}$
$Tb^{137}$	1,2	$Pd^{102} (Ca^{40}, 4-6n) Dy^{136-136}$
$Tb^{138}$	0,8	
$Ho^{141}$	1,5	$Cd^{106} (Ca^{40}, 4-5n) Er^{142-141}$
$Ho^{142}$	1,2	
$Tm^{146}$	1,7	$Sn^{112} (Ca^{40}, 4-6n) Yb^{146-146}$
$Tm^{147}$	1,3	$Mo^{92} (Ni^{58}, 3-4n) Yb^{147-146}$
$Tm^{148}$	1	$Mo^{94} (Ni^{58}, 4n) Yb^{148}$
$Lu^{151}$	1,9	$Ru^{96} (Ni^{58}, 3n) Hf^{151}$
$Lu^{152}$	1,6	$Ru^{98} (Ni^{58}, 3-5n) Hf^{152-151}$
$Lu^{153}$	1,2	$Ru^{99} (Ni^{58}, 3n) Hf^{154}$
$Lu^{154}$	0,9	

В заключение авторы выражают признательность проф. Г.Н. Флерову за глубокий интерес к работе и полезные обсуждения.

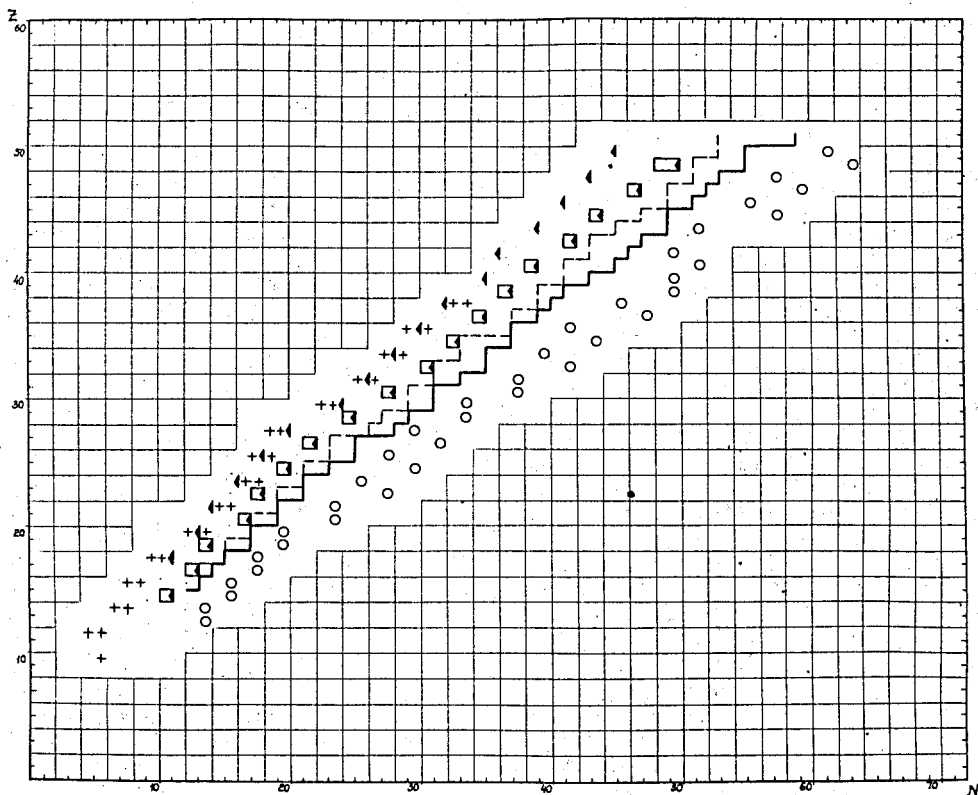
Л и т е р а т у р а

1. Г.Н. Флеров, В.А. Карнаухов, Г.М. Тер-Акопян, Л.А. Петров, В.Г. Субботин. Препринт ОИЯИ Д-1570, Дубна 1964 г.  
J.Jäneske Препринт KFK 185, Nuclear Physics, (В печати).
2. Я.Б. Зельдович. ЖЭТФ, 38 1123 (1960).
3. В.И. Гольданский. ЖЭТФ, 39, 497 (1960).
4. В.А. Карнаухов, Г.М. Тер-Акопян, В.Г. Субботин. Препринт ОИЯИ, Р-1972, Дубна 1962.
5. V.A.Karnaoukhov, G.M.Ter-Akopian, V.G.Subbotin. Proceedings of the Third Conference on Reactions Between Complex Nuclei. Asilomar (Pacific Grove, California) April 14-18, 1963, p. 434
6. В.А. Карнаухов, Г.М. Тер-Акопян, Л.А. Петров, В.Г. Субботин, ЖЭТФ, 45, 1280 (1963).
7. R.Barton, R.McPherson, R.Bell, W.Frisken, W.Link, R.Moore. Can Journ. Phys., 41, 2007 (1963).
8. В.А. Карнаухов, Н.И. Тарантин. ЖЭТФ, 39, 1106 (1960).
9. В.И. Гольданский. ДАН, 146, 1309, (1962).
10. A.G.W.Cameron. Can. Journ. Phys., 35, 1021 (1957).
11. Г. Бете. Физика ядра ч. II, ИИЛ 1948.

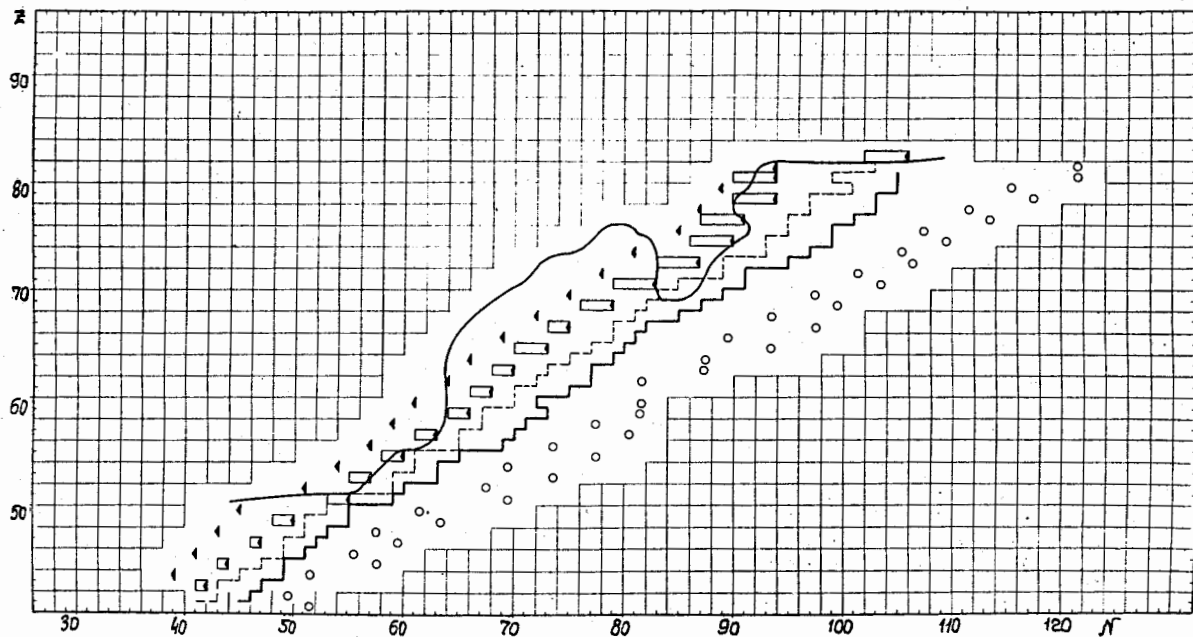
Рукопись поступила в издательский отдел  
16 июня 1964 г.



Р и с. 1. Область протонно-активных ядер, изображенная в координатах  $Z$  и  $N$  заштрихована ( $Z$  - число протонов,  $N$  - число нейтронов в ядре). Граница области  $p$ -распада справа проходит через изотопы, для которых  $\Delta_p = E_p + (E_{p_0} + V_p) \approx 0$  (см. пояснения в тексте). Другая граница проведена таким образом, чтобы влево от нее находились лишь изотопы с временем жизни в отношении испускания протонов из основного состояния  $\tau_p < 10^{-10}$  сек. На пунктирной линии находятся нечетные по  $Z$  ядра, для которых  $\tau_p \approx 10^{-1}$  сек. На штрих-пунктирной линии расположены изотопы с временем жизни в отношении  $\alpha$ -распада из основного состояния  $\tau_\alpha \approx 10^{-1}$  сек. Легчайшие стабильные изотопы элементов показаны кружками, соединенными ломаной линией. Стрелки изображают условно пути получения  $p$ -активных ядер в реакциях с ускоренными ядрами  $Ne^{20}$  и  $Ca^{40}$ .



Р и с. 2. Область  $p$ -активных ядер с  $Z < 50$ . Кружки - легчайшие стабильные изотопы элементов. Ломанная сплошная линия проведена через ядра, для которых  $\Delta_p = E_{\beta^+} - (E_{p_0} + V_p) = 0$ . Ядра, для которых  $E_{\beta^+} = 2(E_{p_0} + V_p)$  находятся на пунктирной ломанной линии. Зачерченными треугольниками показаны изотопы, начиная с которых  $\tau_p \leq 10^{-1}$  сек. Нечетные по  $Z$  ядра с временем жизни относительно  $p$ -распада из основного состояния ( $10^{-1} - 10^{-10}$ ) сек заключены в прямоугольники. Крестиками обозначены изотопы, для которых не исключена возможность двухпротонного распада.



Р и с. 3. Область  $p$ -активных ядер с  $Z > 50$ . Сплошная плавная кривая обозначает границу, левее которой время жизни изотопов в отношении  $\alpha$ -распада из основного состояния  $t_{\alpha} < 10^1$  сек. Остальные обозначения те же, что на рис. 2.