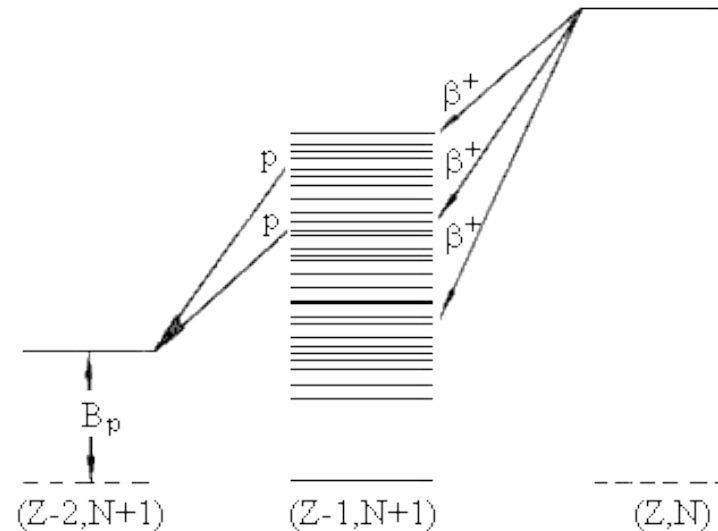


# **Экзотические виды радиоактивного распада**

## Испускание запаздывающих протонов

- В 1962 г. был обнаружен вылет протонов из высоковозбужденных и поэтому короткоживущих состояний ядер, заселяемых при бета-распаде или в различных ядерных реакциях.

- Уменьшение энергии отделения протона при продвижении в область протоно-избыточных изотопов делает возможным радиоактивные распады с испусканием запаздывающих протонов.



- 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.

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

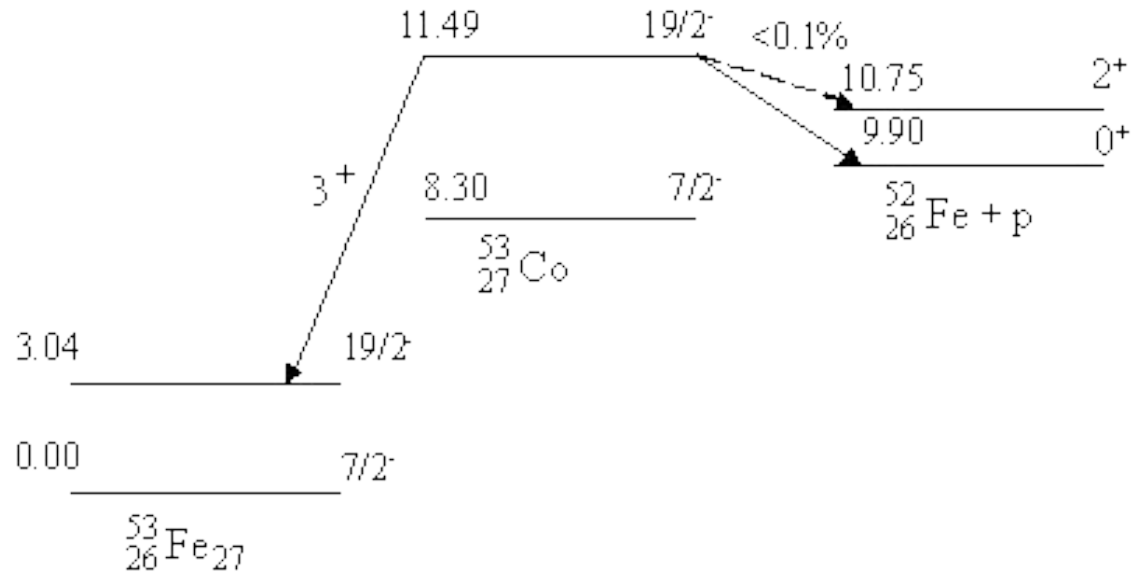
В случае легких ядер область протонных излучателей находится относительно близко от долины стабильности.

Поэтому излучатели запаздывающих протонов получают в реакциях типа  $(p, 2-3n)$ ,  $({}^3\text{He}, 2-3n)$ .

# 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	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$\text{Pb}(p,3pxn)$

- В 1970 году были зафиксированы протоны, связанные с распадом изомерного состояния ядра  $^{53m}\text{Co}_{27}$



Испускание протонов происходит из изомерного состояния ядра  $^{53m}\text{Co}$  с энергией 3.19 МэВ с образованием конечного ядра  $^{52}\text{Fe}$  в основном состоянии.

Основной вид распада из изомерного состояния -  $\beta^+$ -распад.

# Испускание протонов из основного состояния ядра

- Начало восьмидесятых годов обогатило ядерную физику открытием нового вида радиоактивных превращений атомных ядер. К известным ранее четырем типам радиоактивности - альфа, бета, гамма-распадам и делению ядер добавился протонный распад, при котором родительское ядро, находясь в основном состоянии, самопроизвольно испускает протон с образованием определенного состояния (не обязательно основного) дочернего ядра.

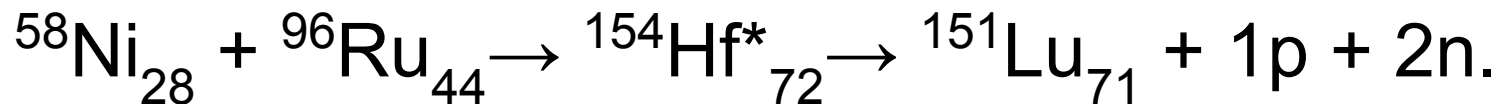
- Для осуществления протонного распада из основных состояний ядер необходимо было создать такие ядра, в которых протон не был бы связан с дочерним ядром, образующимся после вылета протона из родительского ядра, то - есть энергия относительного движения протона и дочернего ядра  $Q_p$  была бы положительной:  $Q_p > 0$ .
- Подобные ядра являются сильно - **нейтронодефицитными**, то - есть при данном числе протонов  $Z$  они имеют число нейтронов, заметно меньшее числа нейтронов в наиболее устойчивом при данном  $Z$  ядре.



- В земных условиях подобные ядра не образуются и их не удавалось получить при использовании всего спектра ядерных установок, начиная с атомных реакторов и кончая ускорителями различных типов. Поэтому для наблюдения протонной радиоактивности вначале необходимо было создать в необходимых количествах абсолютно новые по протон -нейтронному составу ядра.

Для получения таких ядер естественно было использовать реакцию слияния более легких стабильных ядер.

- Первое из протонораспадных ядер -  $^{151}\text{Lu}_{71}$  было синтезировано в ядерной реакции вида:

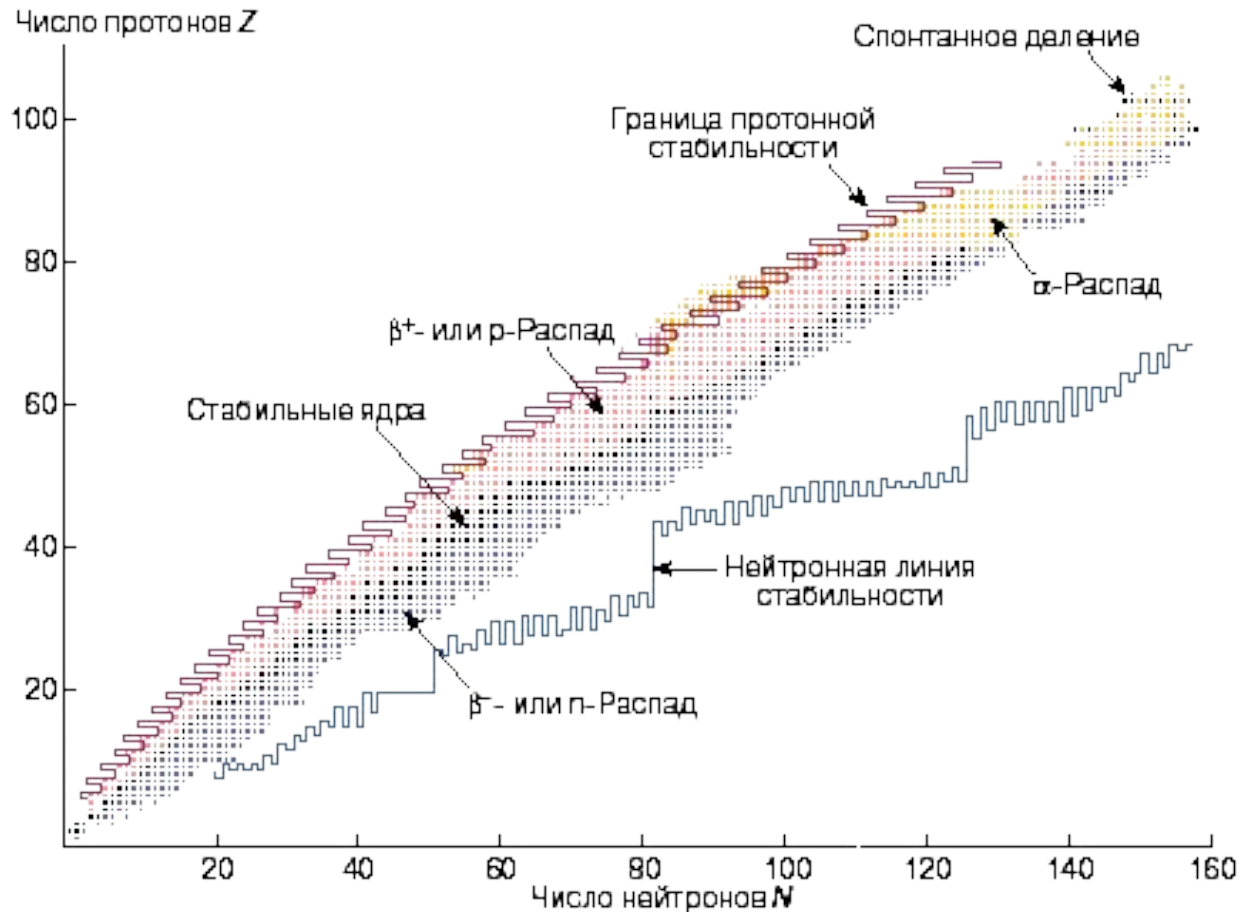


- Первое протонораспадное ядро  $^{151}\text{Lu}_{71}$  было получено в 1981 году на рекордном по своим параметрам ускорителе многозарядных ионов в Дармштадте (Германия).
- К настоящему времени исследовано более 30 ядер, испытывающих протонный распад из основных и изомерных состояний, которые заполняют довольно широкую по  $Z$  и  $A$  область от  $^{53}\text{Co}_{27}$  до  $^{185}\text{Bi}_{83}$ .
- Процесс получения новых подобных ядер интенсивно продолжается и в настоящее время.

# Границы нуклонной устойчивости ядер.

## “Дрип”-линии и протонный распад.

- Энергию отделения протона (нейтрона)  $S_p$  ( $S_n$ ) от ядра  $(Z, N)$  с образованием дочернего ядра  $(Z-1, N)$  ( $(Z, N-1)$ ) можно определить как:
- $S_p(Z, N) = E_{\text{св}}(Z, N) - E_{\text{св}}(Z-1, N)$        $S_n(Z, N) = E_{\text{св}}(Z, N) - E_{\text{св}}(Z, N-1)$ .
- Величины  $S_p(Z, N)$  и  $S_n(Z, N)$  имеют максимальные значения для данного  $Z$  при  $N = N_0^p$ . При уменьшении числа нейтронов  $N$  от  $N = N_0^p$ , то есть при переходе к нейтронодефицитным ядрам, величина  $S_p(Z, N)$  уменьшается и при некотором значении  $N = N_{\text{др}}^p$  становится равной нулю:  $S_p(Z, N_{\text{др}}^p) = 0$ . Атомные ядра с подобными значениями  $Z, N = N_{\text{др}}^p$  соответствуют так называемой протонной “дрип” - линии, на которой один из протонов ядра полностью теряет энергию связи с остальными нуклонами ядра. Английское слово “дрип” переводится как “капать”, “падать каплями”, что физически соответствует ситуации, когда от ядра, как маленькие капельки начинают отделяться несвязанные протоны.  
При увеличении величины  $N$  от  $N = N_0^p$ , то - есть при переходе к нейтроноизбыточным ядрам величина  $S_n(Z, N)$  начинает уменьшаться и при некотором значении  $N = N_{\text{др}}^n$  обращается в нуль:  $S_n(Z, N) = 0$ . Атомные ядра с подобными значениями  $Z, N = N_{\text{др}}^n$  соответствуют нейтронной “дрип”-линии, на которой один из нейтронов полностью теряет энергию связи с остальными нуклонами ядра.



Протонный распад атомных ядер из основных состояний можно наблюдать, если атомное ядро находится за пределами области, ограниченной протонной “дрип”-линией.

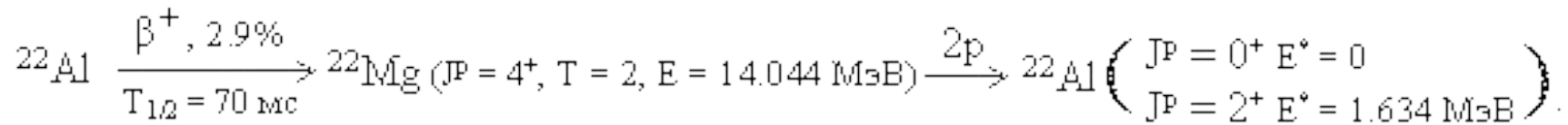
- Для всех исследованных протонораспадных ядер энергии вылетающего протона  $E_p$  меняются в интервале от 0.5 Мэв до 2 Мэв. В свою очередь доли протонного распада  $b_p$  лежат в интервале от 0.004 до 1, причем основную конкуренцию протонному распаду составляет бета-распад для ядер с  $A \leq 151$  и альфа-распад - для более тяжелых ядер. Наконец, парциальные протонные периоды полураспада изменяются в интервале от 1 микросекунды до 50 секунд.
- Наблюдение ядер с протонными периодами полураспада, заметно большими 100 секунд, затруднено из-за сильной конкуренции с бета и альфа - распадами, а с периодами полураспада, меньшими нескольких микросекунд, невозможно из-за ограничений, связанных с экспериментальным временем сепарации и накопления протонораспадных ядер.

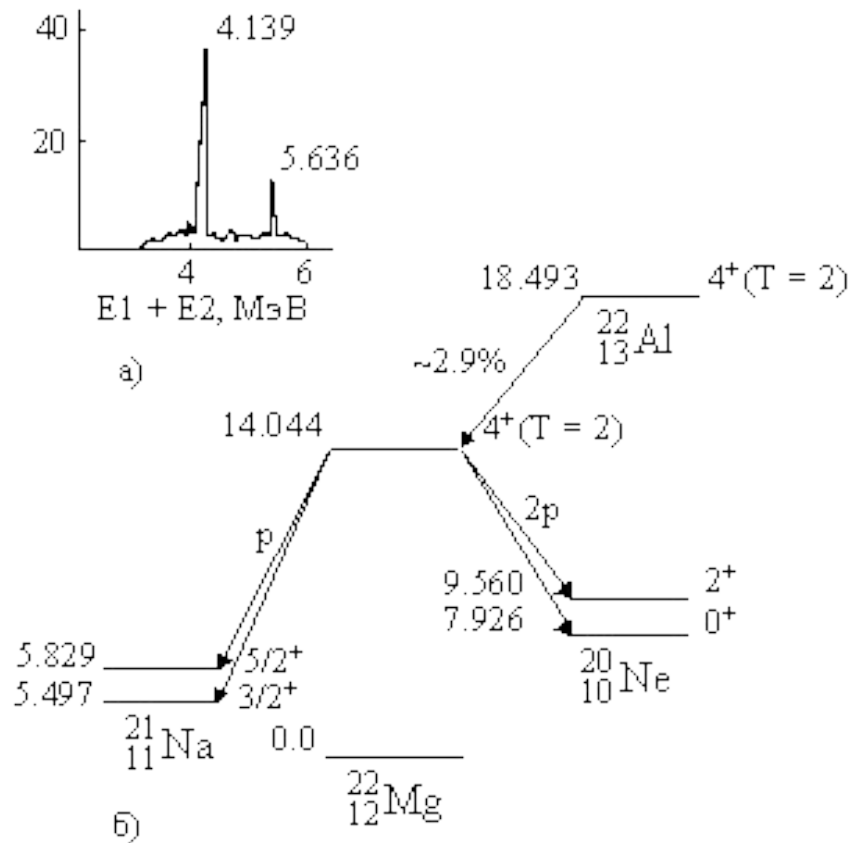
# Двухпротонная радиоактивность

- 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:



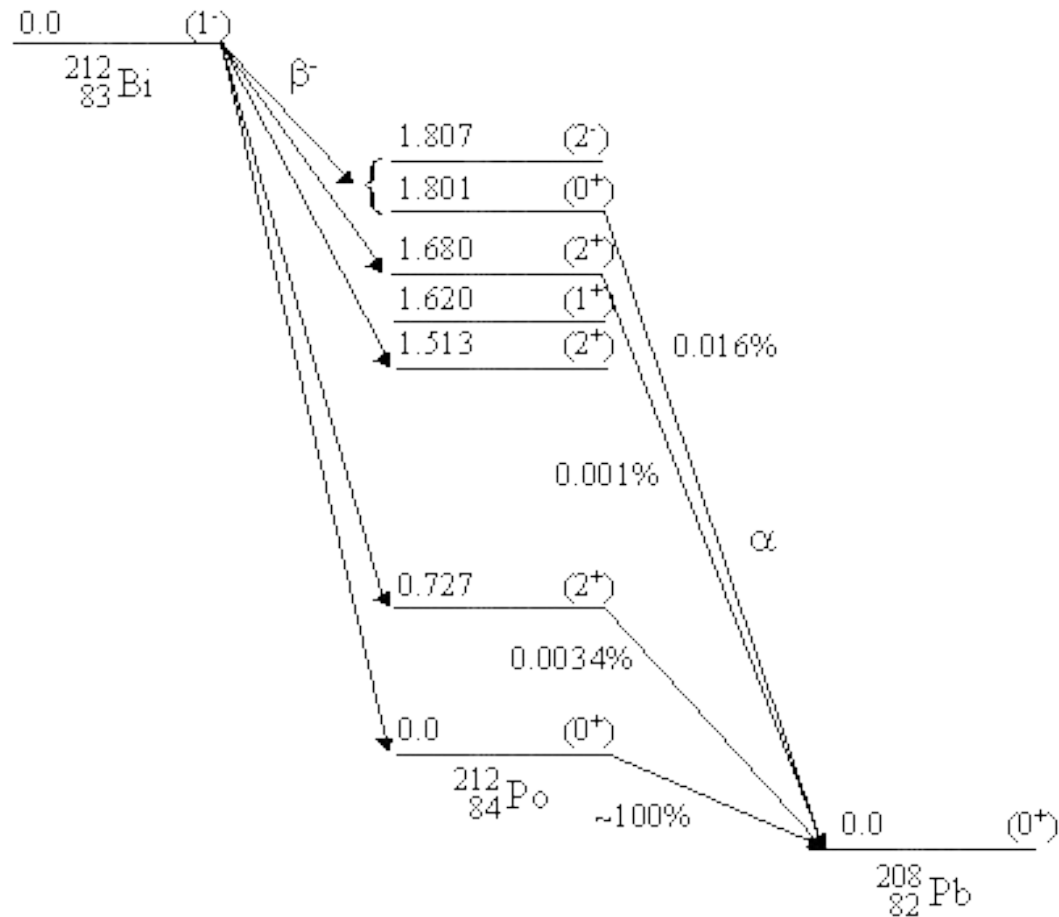
и далее распадался по цепочке





- Протоны регистрировались двумя телескопами из трех кремниевых счетчиков - системой  $\Delta E_1$ - $\Delta E_2$ -E детекторов. Измерялись двумерные спектры протонов в режиме совпадений с разрешающим временем 20 нс. В спектре наблюдались два максимума при энергиях  $E_1 + E_2 = 4.139$  и  $5.636$  МэВ, отвечающих двухпротонному распаду состояния  $14.044$  МэВ ядра  $^{22}\text{Mg}$  с заселением основного и возбужденного ( $E^* = 1.634$  МэВ) состояний конечного ядра  $^{20}\text{Ne}$ .

# Испускание запаздывающих альфа -частиц



- Для того, чтобы наблюдалось испускание запаздывающих  $\alpha$ -частиц, необходимо, чтобы собственная скорость  $\alpha$ -распада была существенно больше скорости предшествующего  $\beta$ -распада.



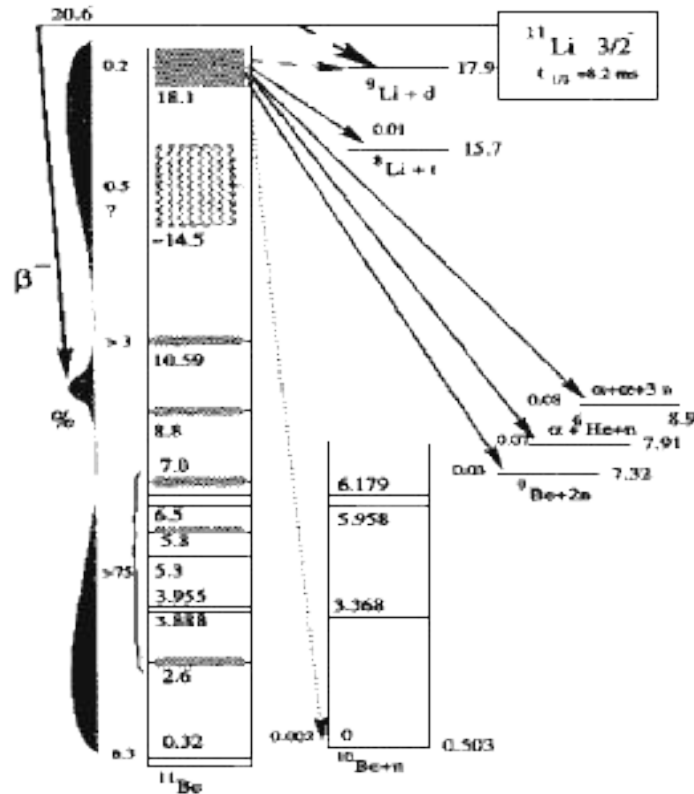
# Испускание запаздывающих нейтронов

- Бета-распад может приводить к образованию ядер в возбужденных состояниях с энергией больше энергии отделения нейтрона. Распад этих состояний может происходить с эмиссией нейтронов.
- В настоящее время известно свыше 150 ядер излучателей запаздывающих нейтронов.

# Излучатели запаздывающих нейтронов

Изотоп	$T_{1/2}$ , с	$Q_b - E_n$ , МэВ	$P_n$ , %	Реакция
$^{11}\text{Li}$	0.009	22.5	$82 \pm 7$	$p(600 \text{ МэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{13}\text{B}$	0.0174	8.5	$0.26 \pm 0.04$	$t + ^{11}\text{B} \rightarrow ^{13}\text{B} + p$
$^{17}\text{N}$	4.16	4.5	$95 \pm 1$	$d + (^{16}\text{O} + ^{37}\text{Cl})$
$^{27}\text{Na}$	0.295	1.6	$0.08 \pm 0.03$	$p(\text{ГэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{28}\text{Na}$	0.036	3	$0.58 \pm 0.12$	$p(\text{ГэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{29}\text{Na}$	0.048	4.8	$21 \pm 4$	$p(\text{ГэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{30}\text{Na}$	0.055	7.2	$26 \pm 4$	$p(\text{ГэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{31}\text{Na}$	0.018	11.3	$30 \pm 8$	$p(\text{ГэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{32}\text{Na}$	0.014	12.2	$20 \pm 8$	$p(\text{ГэВ}) + \text{U} \rightarrow \text{фрагментация}$
$^{141}\text{Cs}$	24.9	0.32	0.05	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$
$^{142}\text{Cs}$	1.7	1.04	0.28	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$
$^{143}\text{Cs}$	1.68	1.64	1.13	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$
$^{144}\text{Cs}$	1.06	1.89	1.1	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$
$^{145}\text{Cs}$	0.59	2.24	12.1	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$
$^{146}\text{Cs}$	0.35	2.09	14.2	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$
$^{147}\text{Cs}$	0.214	2.96	25.4	$n(\text{тепл.}) + ^{235}\text{U} \rightarrow \text{деление}$

# Испускание двух и трех запаздывающих нейтронов



- Испускание одного, двух и трех запаздывающих нейтронов наблюдалось при  $\beta$ -распаде ядра  $^{11}\text{Li}$ . Энергия  $\beta$ -распада этого ядра составляет 20.6 МэВ, что превышает пороги отделения одного (0.503 МэВ), двух (7.32 МэВ) и трех (8.9 МэВ) нейтронов из ядра  $^{11}\text{Be}$ .

# Кластерная радиоактивность

- Кластерная радиоактивность - явление самопроизвольного испускания ядрами ядерных фрагментов (кластеров) тяжелее, чем  $\alpha$ -частица.

## Экспериментальные результаты по кластерному распаду

Исходное ядро	Испускаемый кластер	Энергия распада, Q, МэВ	$\lambda_C/\lambda_\alpha$	$T_{1/2}$ , ГОДЫ
$^{221}\text{Fr}$	$^{14}\text{C}$	31.28	$< 5 \cdot 10^{-14}$	$> 2 \cdot 10^8$
$^{221}\text{Ra}$	$^{14}\text{C}$	32.39	$< 1.2 \cdot 10^{-13}$	$> 7.4 \cdot 10^6$
$^{222}\text{Ra}$	$^{14}\text{C}$	33.05	$(3.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-10}$ $(3.1 \pm 1.0) \cdot 10^{-10}$	
$^{223}\text{Ra}$	$^{14}\text{C}$	31.85	$(8.5 \pm 2.5) \cdot 10^{-10}$ $(7.6 \pm 3.0) \cdot 10^{-10}$ $(5.5 \pm 2.0) \cdot 10^{-10}$ $(4.7 \pm 1.3) \cdot 10^{-10}$ $(6.1 \pm 1.0) \cdot 10^{-10}$	
$^{224}\text{Ra}$	$^{14}\text{C}$	30.54	$(4.3 \pm 1.2) \cdot 10^{-11}$	$(2.3 \pm 0.6) \cdot 10^8$
$^{226}\text{Ra}$	$^{14}\text{C}$	28.21	$(3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-11}$ $(2.9 \pm 1.0) \cdot 10^{-11}$	

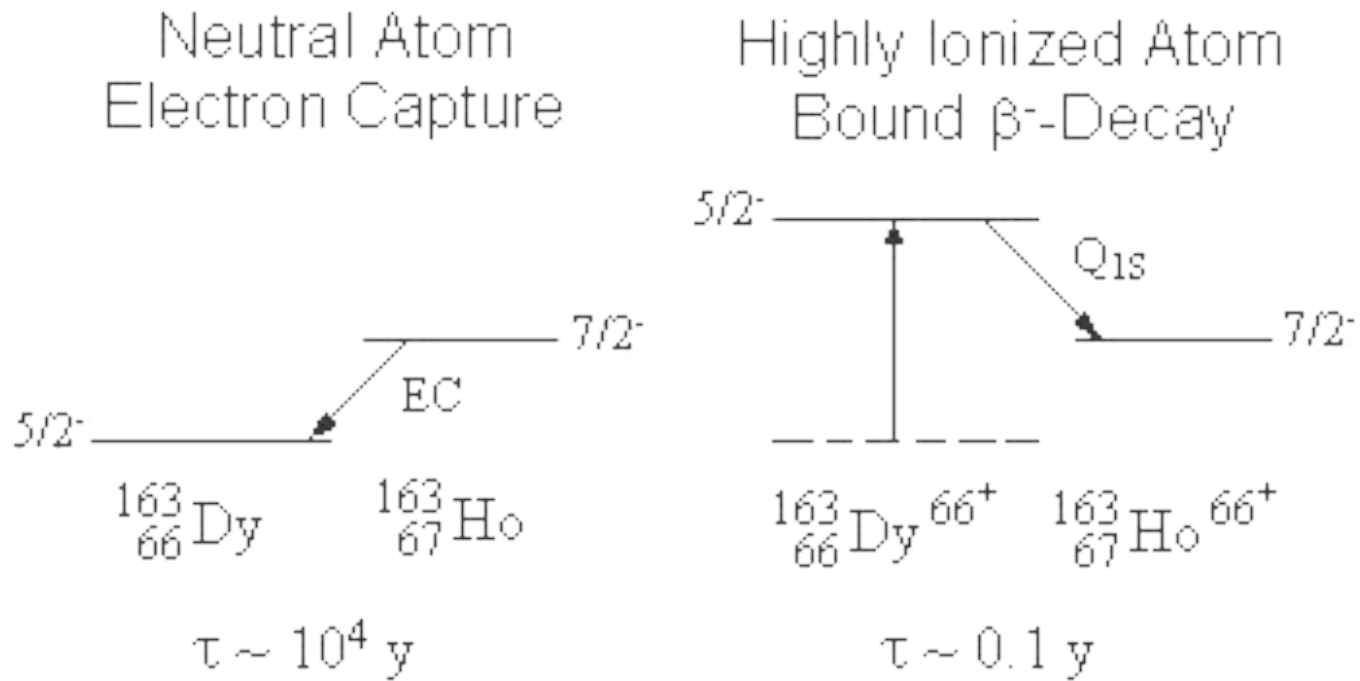
$^{225}\text{Ac}$	$^{14}\text{C}$	30,47	$< 4 \cdot 10^{-13}$	$> 7 \cdot 10^{10}$
$^{231}\text{Pa}$	$^{23}\text{F}$	51,84	$< 4 \cdot 10^{-14}$	$> 8 \cdot 10^{17}$
$^{230}\text{Th}$	$^{24}\text{Ne}$	57.78	$(5.6 \pm 1.0) \cdot 10^{-13}$	$(1.3 \pm 0.3) \cdot 10^{17}$
$^{232}\text{Th}$	$^{26}\text{Ne}$	55.97	$< 5 \cdot 10^{-11}$	$> 3 \cdot 10^{20}$
$^{231}\text{Pa}$	$^{24}\text{Ne}$	60.42	$(3.8 \pm 0.7) \cdot 10^{-12}$	$(8.6 \pm 1.6) \cdot 10^{15}$
$^{232}\text{U}$	$^{24}\text{Ne}$	62.31	$(2.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-12}$	$(3.4 \pm 0.8) \cdot 10^{13}$
$^{233}\text{U}$	$^{24}\text{Ne}$	60.5	$(7.5 \pm 2.5) \cdot 10^{-13}$	
	$^{25}\text{Ne}$	60.85	$(5.3 \pm 2.3) \cdot 10^{-13}$	
$^{234}\text{U}$	$^{24}\text{Ne}$	58.84	$(4.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-13}$	
	$^{26}\text{Ne}$	59.47	$(3.9 \pm 1.0) \cdot 10^{-13}$	
$^{235}\text{U}$	$^{24}\text{Ne}$	57.36		
	$^{25}\text{Ne}$	57.83		
	$^{26}\text{Ne}$	58.11	$< 5 \cdot 10^{-12}$	$> 1.4 \cdot 10^{20}$
$^{236}\text{U}$	$^{24}\text{Ne}$	55.96		
	$^{26}\text{Ne}$	56.75	$< 4 \cdot 10^{-12}$	$> 6 \cdot 10^{18}$
$^{234}\text{U}$	$^{28}\text{Mg}$	74.13	$(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-13}$ $(2.3 \pm 0.7) \cdot 10^{-13}$	

$^{235}\text{U}$	$^{28}\text{Mg}$	72.2	$< 8 \cdot 10^{-13}$	$> 9 \cdot 10^{20}$
$^{236}\text{U}$	$^{30}\text{Mg}$	72.51	$< 4 \cdot 10^{-12}$	$> 6 \cdot 10^{18}$
$^{237}\text{Np}$	$^{30}\text{Mg}$	75.02	$< 4 \cdot 10^{-14}$	$> 5 \cdot 10^{19}$
$^{236}\text{Pu}$	$^{28}\text{Mg}$	79.67	$\sim 2 \cdot 10^{-14}$	$\sim 1.5 \cdot 10^{14}$
$^{238}\text{Pu}$	$^{28}\text{Mg}$	75.93	$(5.6^{+4.4}_{-2.5}) \cdot 10^{-17}$	$\sim 1.5 \cdot 10^{18}$
	$^{30}\text{Mg}$	77.03		
	$^{32}\text{Si}$	91.21	$(1.4^{+0.6}_{-0.4}) \cdot 10^{-16}$	$\sim 6.5 \cdot 10^{17}$
$^{240}\text{Pu}$	$^{34}\text{Si}$	90.95	$< 1.3 \cdot 10^{-13}$	$> 5 \cdot 10^{16}$
$^{241}\text{Am}$	$^{34}\text{Si}$	93.84	$< 5 \cdot 10^{-15}$	$> 9 \cdot 10^{16}$
			$< 3 \cdot 10^{-12}$	$> 1.4 \cdot 10^{14}$
			$< 4.2 \cdot 10^{-13}$	$> 1.0 \cdot 10^{15}$
			$< 7.4 \cdot 10^{-16}$	$> 5.8 \cdot 10^{17}$

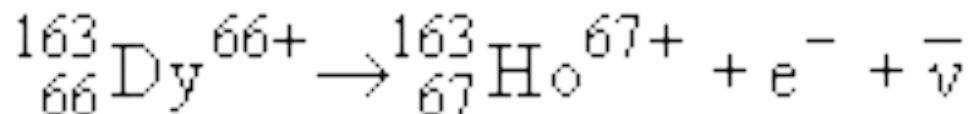
# Бета распад на связанные состояния атома

- Необычный распад был впервые обнаружен в 1992 году. Речь идет о  $\beta^-$ -распаде полностью ионизированного атома на связанные атомные состояния.
- Ядро  $^{163}\text{Dy}$  на N-Z диаграмме атомных ядер помечено черным цветом. Это означает, что оно является стабильным ядром. Действительно, входя в состав нейтрального атома, ядро  $^{163}\text{Dy}$  стабильно. Его основное состояние ( $5/2^+$ ) может заселяться в результате E-захвата из основного состояния ( $7/2^+$ ) ядра  $^{163}\text{Ho}$ . Ядро  $^{163}\text{Ho}$ , окруженное электронной оболочкой,  $\beta$ -радиоактивно и его период полураспада составляет  $\sim 10^4$  лет.



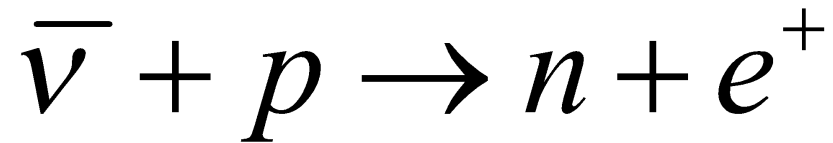


- Схема -распада полностью ионизованного  $^{163}\text{Dy}$ .  
 Процесс эквивалентен электронному захвату

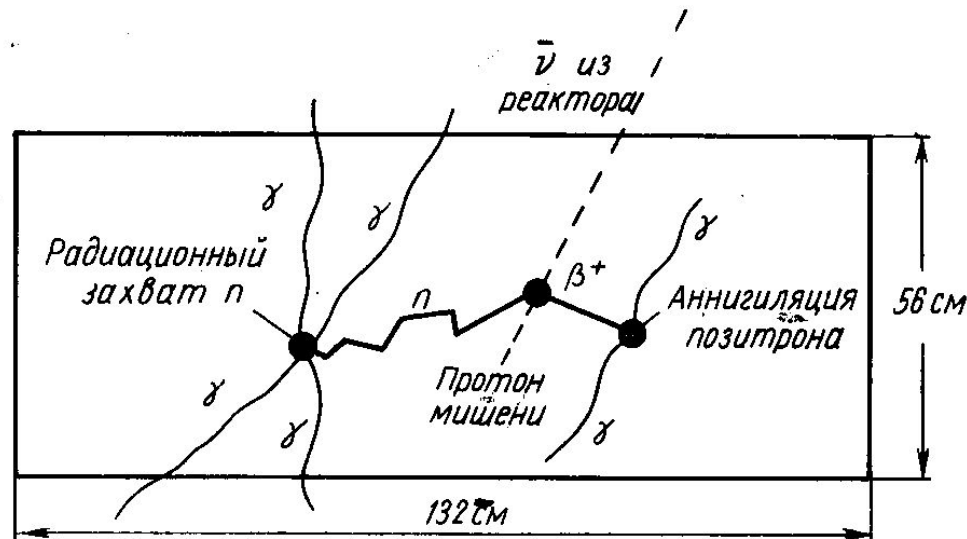


# Обратные $\beta$ -процессы

- Захват антинейтрино протонами

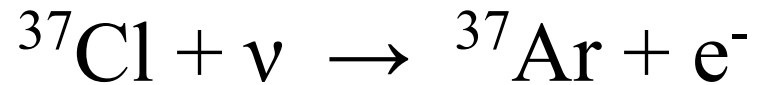


- 1959 г. Опыт Коуэна и Райнеса



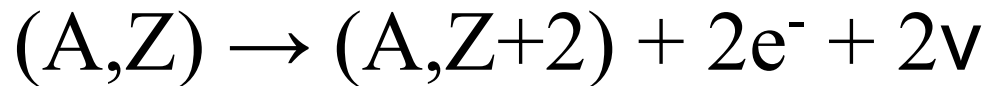
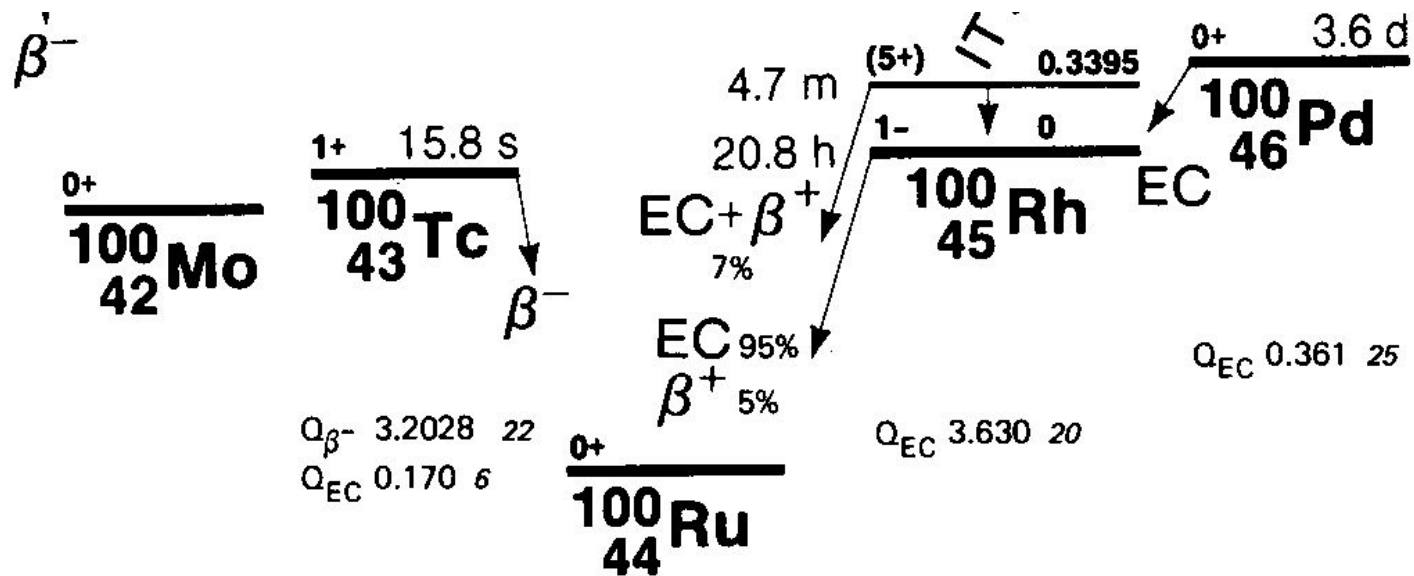
- **Захват нейтрино**

- 1956 г. Эксперимент Дэвиса



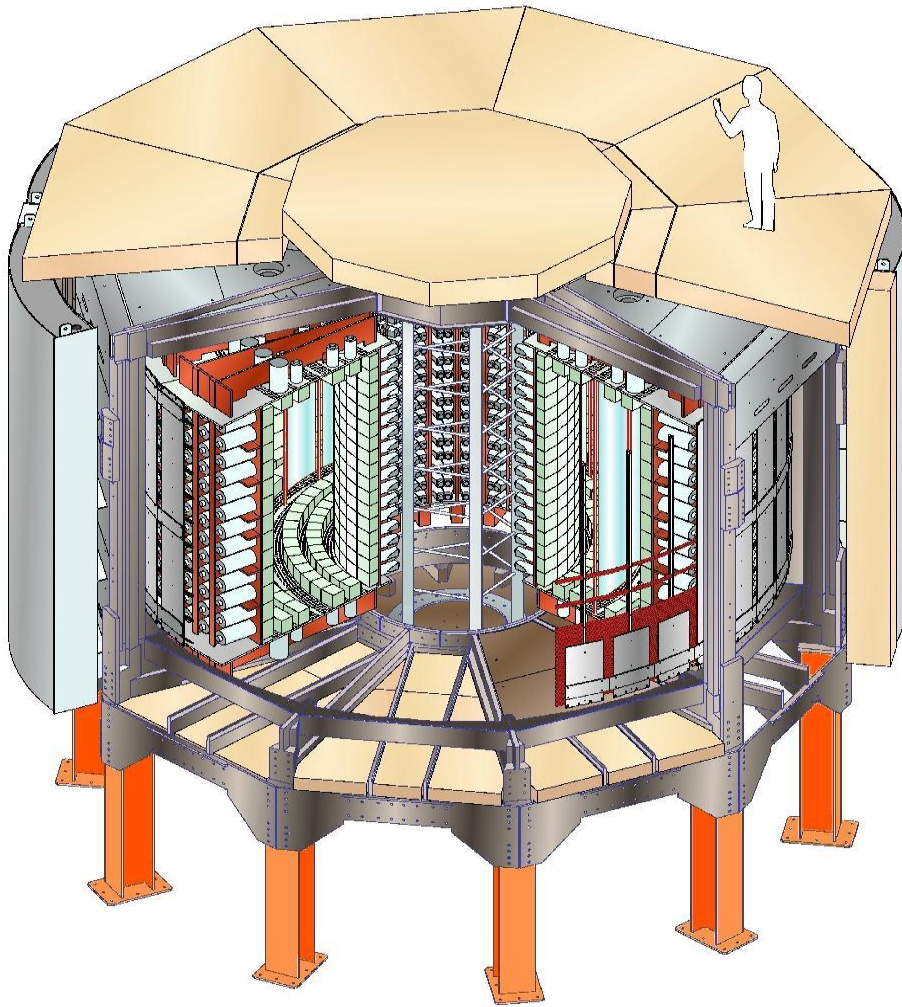
Количество  $^{37}\text{Ar}$  было определено счетчиком Гейгера по интенсивности рентгеновского излучения, испускаемого при электронном захвате

# Двойной бета-распад



# The NEMO3 detector

Fréjus Underground Laboratory : 4800 m.w.e.



**Source:** 10 kg of  $\beta\beta$  isotopes  
cylindrical,  $S = 20 \text{ m}^2$ ,  $60 \text{ mg/cm}^2$

**Tracking detector:**

drift wire chamber operating  
in Geiger mode (6180 cells)

Gas: He + 4% ethyl alcohol + 1% Ar + 0.1% H<sub>2</sub>O

**Calorimeter:**

1940 plastic scintillators  
coupled to low radioactivity PMTs

**Magnetic field:** 25 Gauss

**Gamma shield:** Pure Iron (18 cm)

**Neutron shield:** borated water  
+ Wood

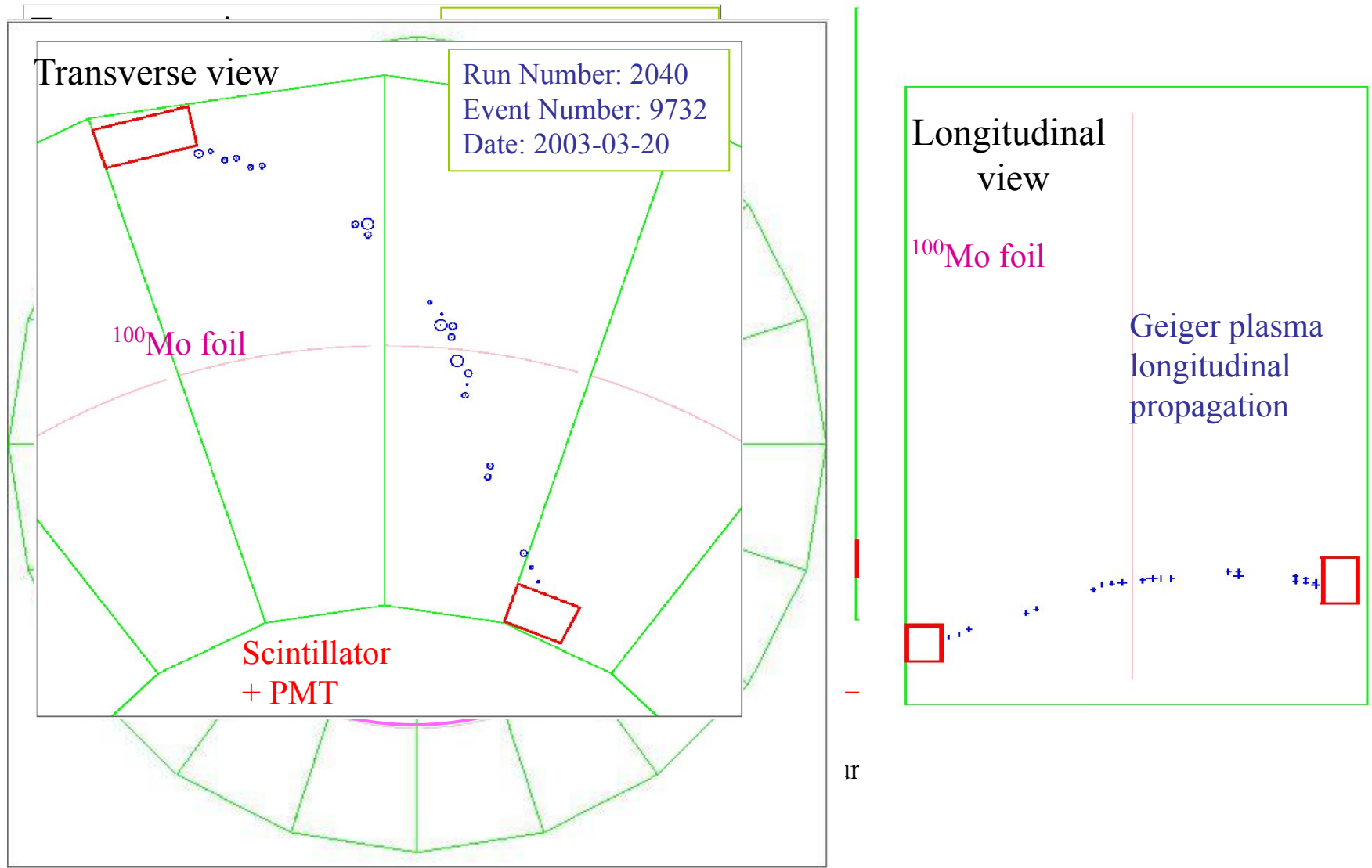
**Background:** natural radioactivity, mainly  $^{214}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Tl}$  ( $\alpha$  2.6 MeV)



**Able to identify  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\gamma$  and  $\alpha$**

# $\beta\beta$ events selection in NEMO-3

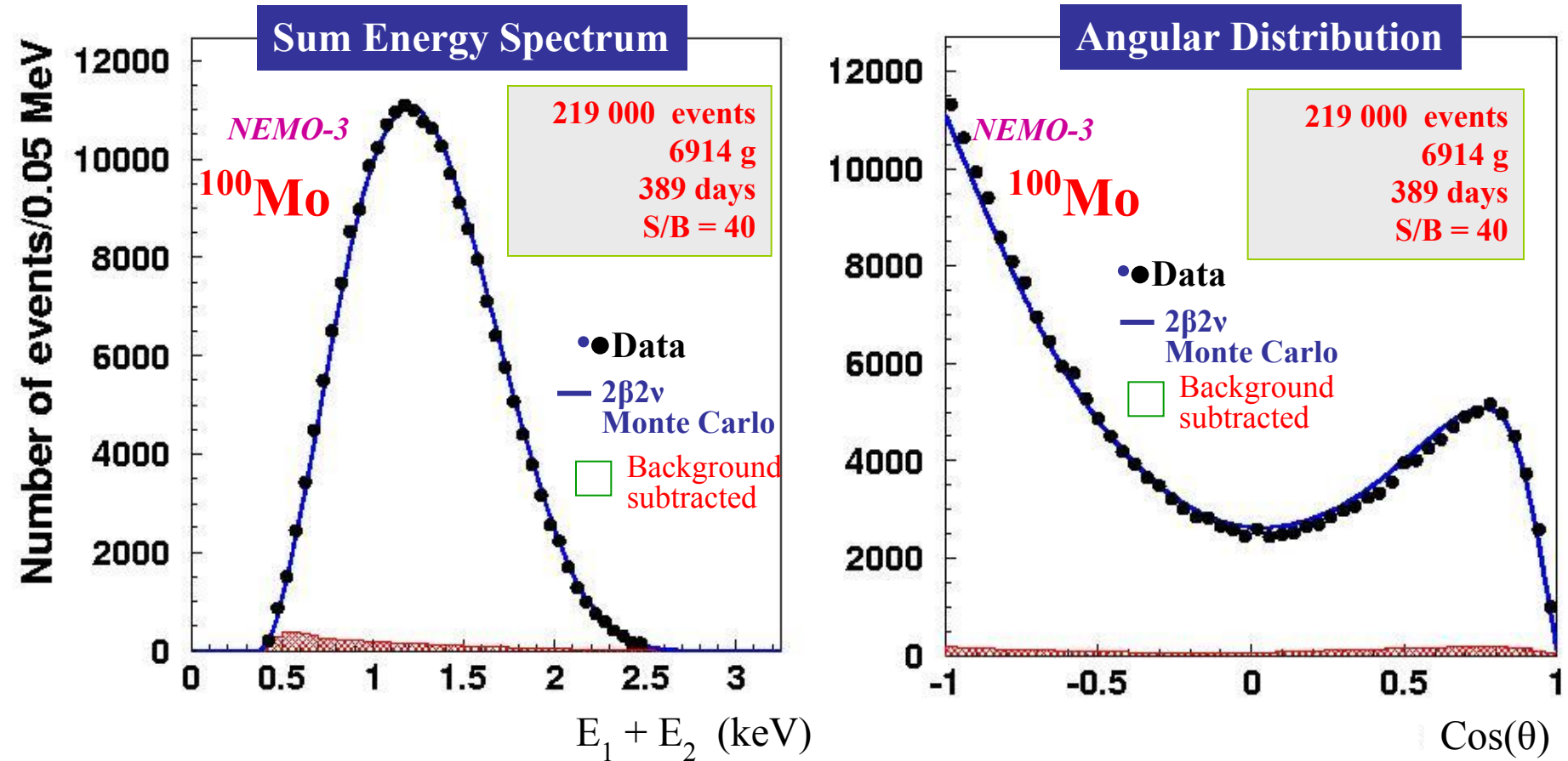
Typical  $\beta\beta 2\nu$  event observed from  $^{100}\text{Mo}$



Top view

# $^{100}\text{Mo}$ $2\beta 2\nu$ preliminary results

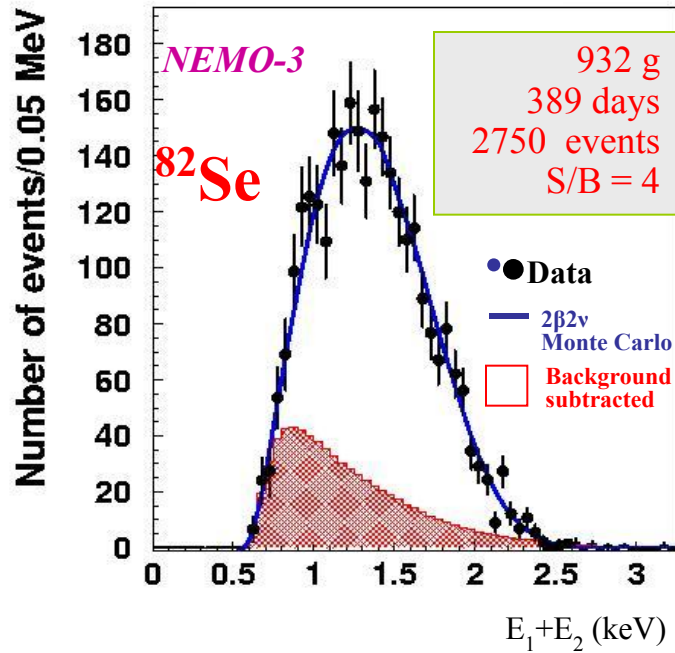
(Data Feb. 2003 – Dec. 2004)



7.37 kg.y

$$T_{1/2} = 7.14 \pm 0.02 \text{ (stat)} \pm 0.54 \text{ (syst)} \times 10^{18} \text{ y}$$

# 2 $\beta$ 2 $\nu$ preliminary results for other nuclei



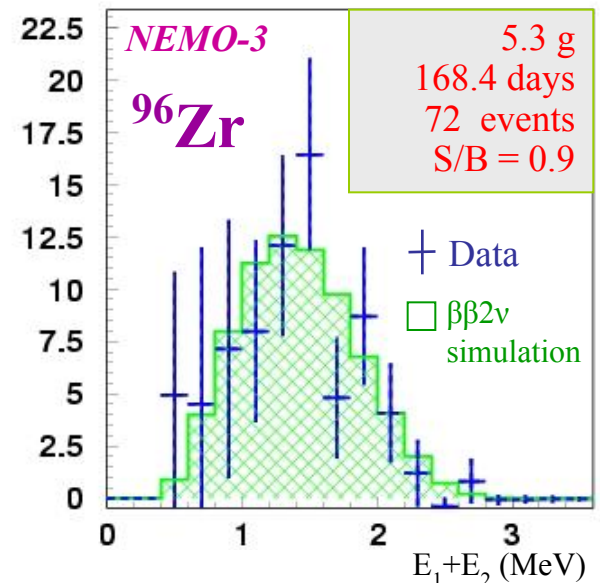
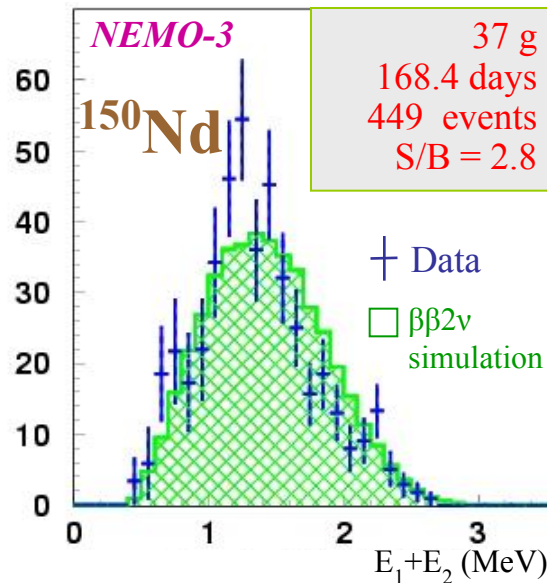
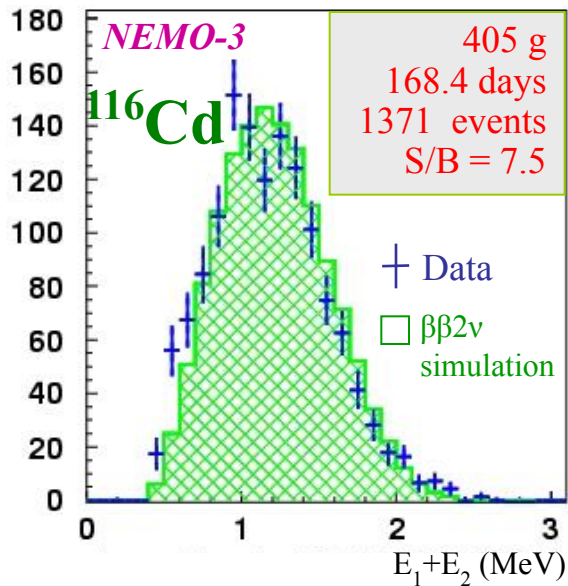
$$^{82}\text{Se} \quad T_{1/2} = 0.98 \pm 0.2 \text{ (stat)} \pm 0.1 \text{ (syst)} \times 10^{20} \text{ y}$$

$$^{116}\text{Cd} \quad T_{1/2} = 2.8 \pm 0.1 \text{ (stat)} \pm 0.3 \text{ (syst)} \times 10^{19} \text{ y}$$

$$^{150}\text{Nd} \quad T_{1/2} = 9.7 \pm 0.7 \text{ (stat)} \pm 1.0 \text{ (syst)} \times 10^{18} \text{ y}$$

$$^{96}\text{Zr} \quad T_{1/2} = 2.0 \pm 0.3 \text{ (stat)} \pm 0.2 \text{ (syst)} \times 10^{19} \text{ y}$$

Background subtracted





# Излучения, сопровождающие радиоактивный распад

- Процессы электронного захвата и внутренней конверсии приводят к образованию вакансии на одной из атомных оболочек.
- Релаксационный процесс заполнения свободной вакансии сопровождается излучением рентгеновского кванта или испусканием Оже-электрона.

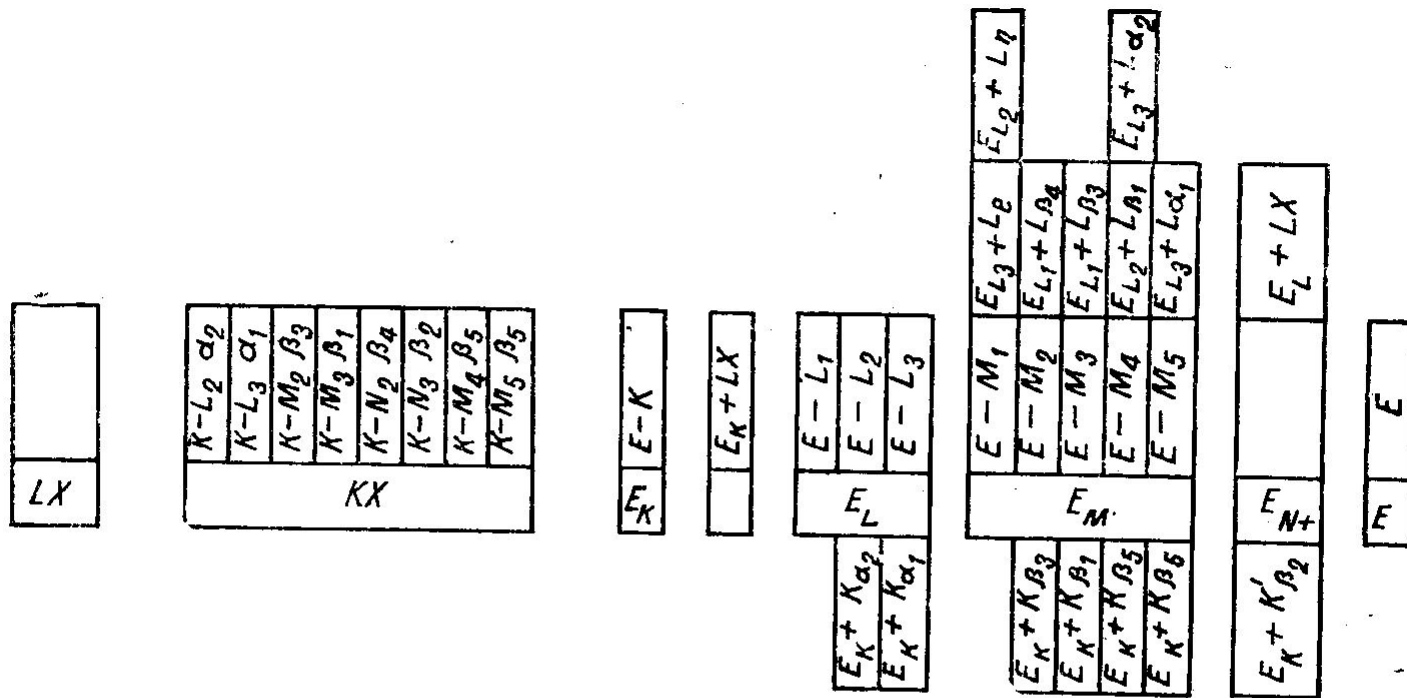
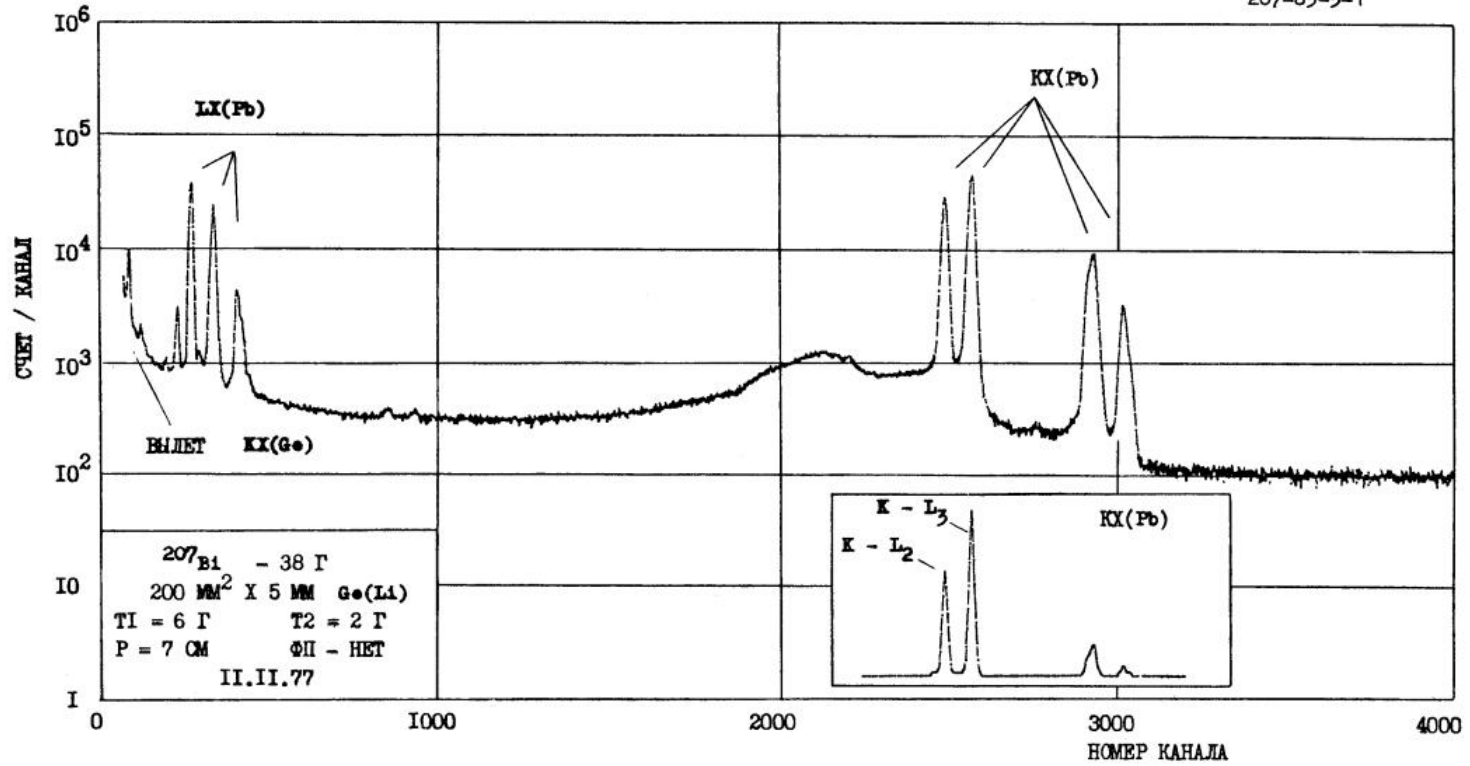


Рис. 39. Схема искажений аппаратного спектра вследствие истинных совпадений  $KX$ -и  $LX$ -лучей с  $K$ -,  $L$ -,  $M$ - и  $N$ -ЭВК для перехода с энергией  $E$ . Прямоугольники средней полосы — энергетическое распределение излучений, нижней и верхней — искажения интенсивностей ЭВК в результате совпадений с  $KX$ - и  $LX$ -лучами соответственно. Обозначения Зигбана для  $LX$ -лучей:

$$\begin{aligned}
 L_{\eta} &= L_2 - M_1; & L_{\alpha_1} &= L_3 - M_5; & L_{\beta_1} &= L_2 - M_4 \\
 L_e &= L_3 - M_1; & L_{\alpha_2} &= L_3 - M_4; & L_{\beta_3} &= L_1 - M_3 \\
 & & & & L_{\beta_4} &= L_1 - M_2 \\
 & & & & L_{\beta_6} &= L_3 - N_1
 \end{aligned}$$

# $^{207}\text{Bi}$

207-83-3-1



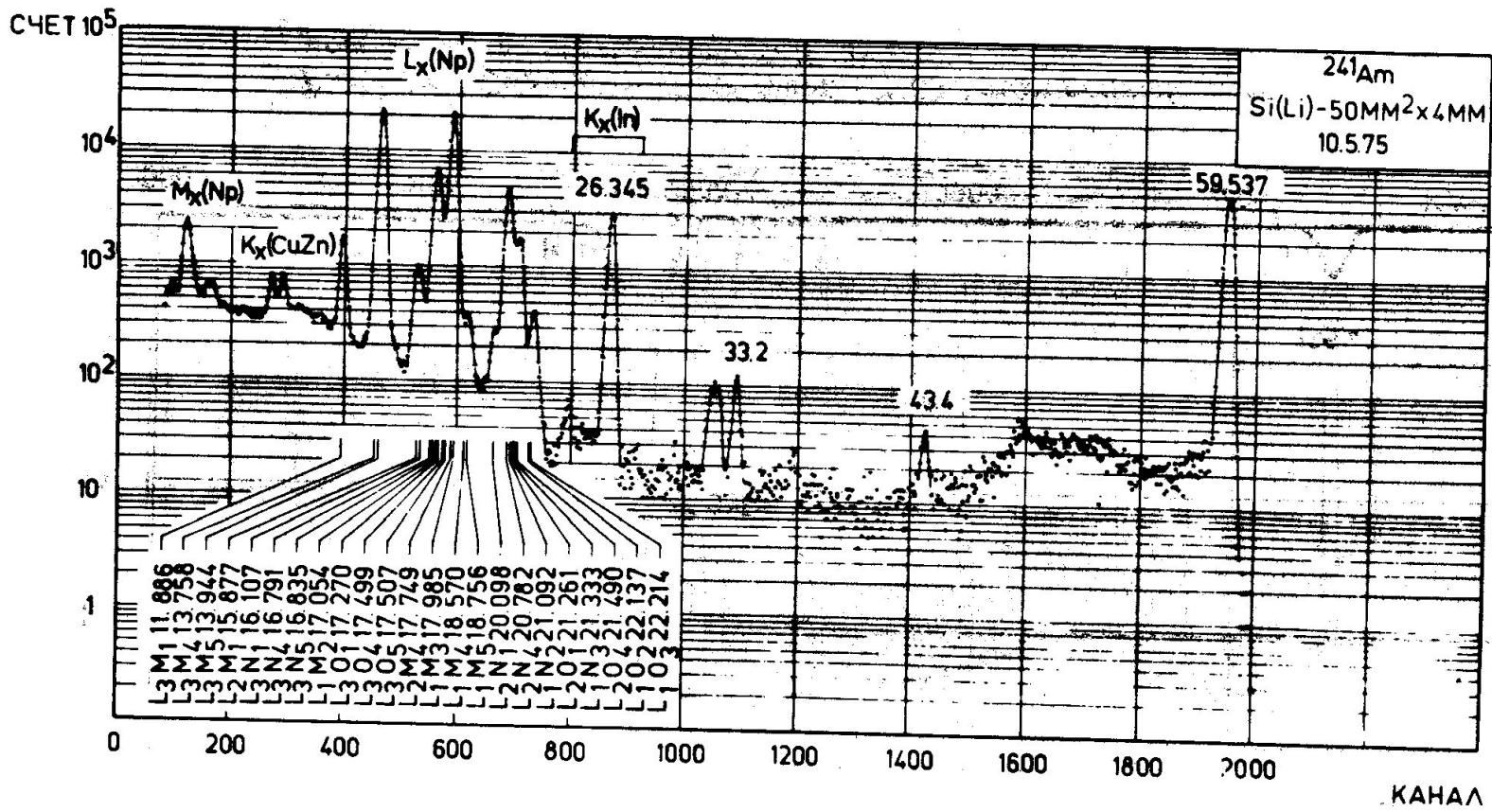
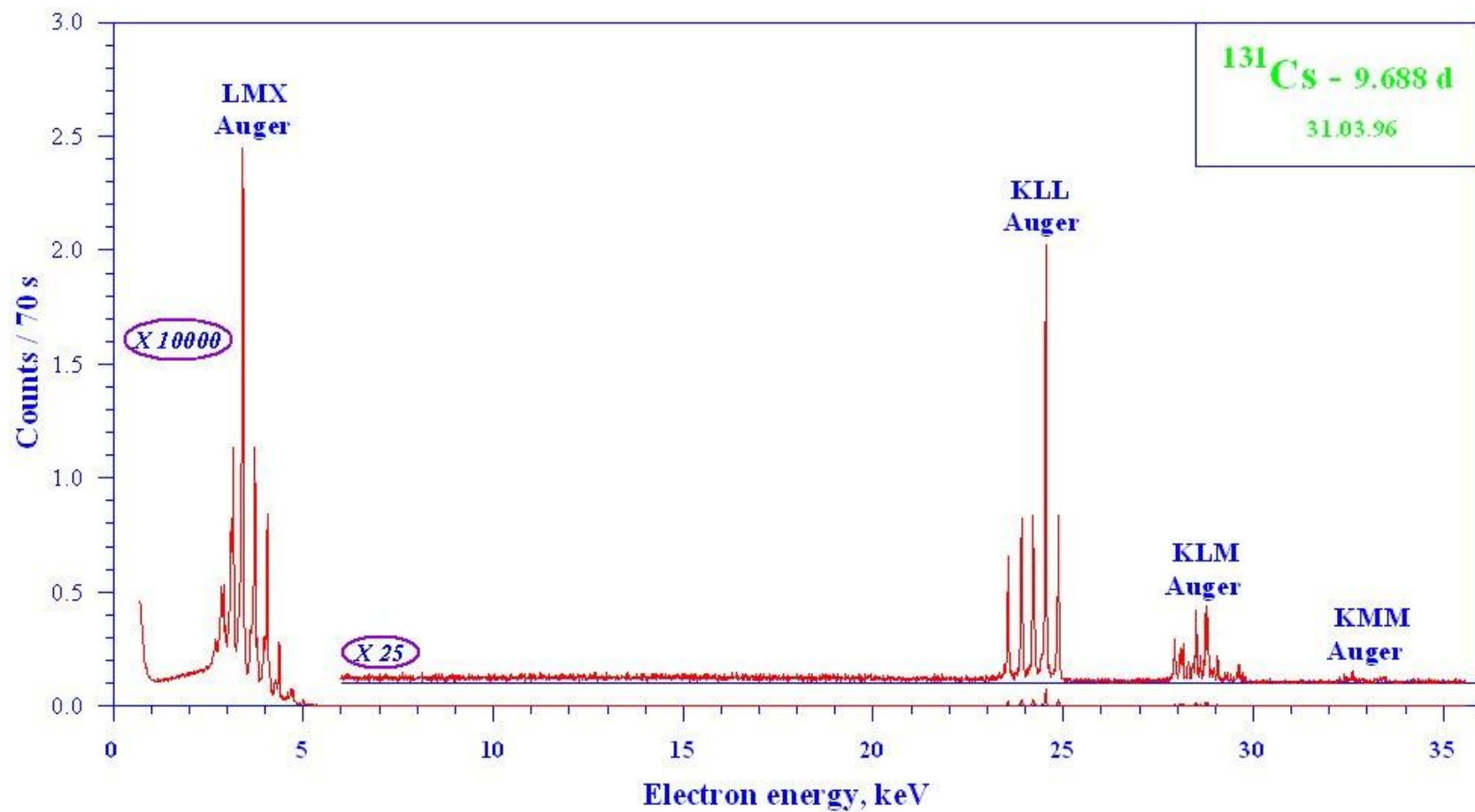
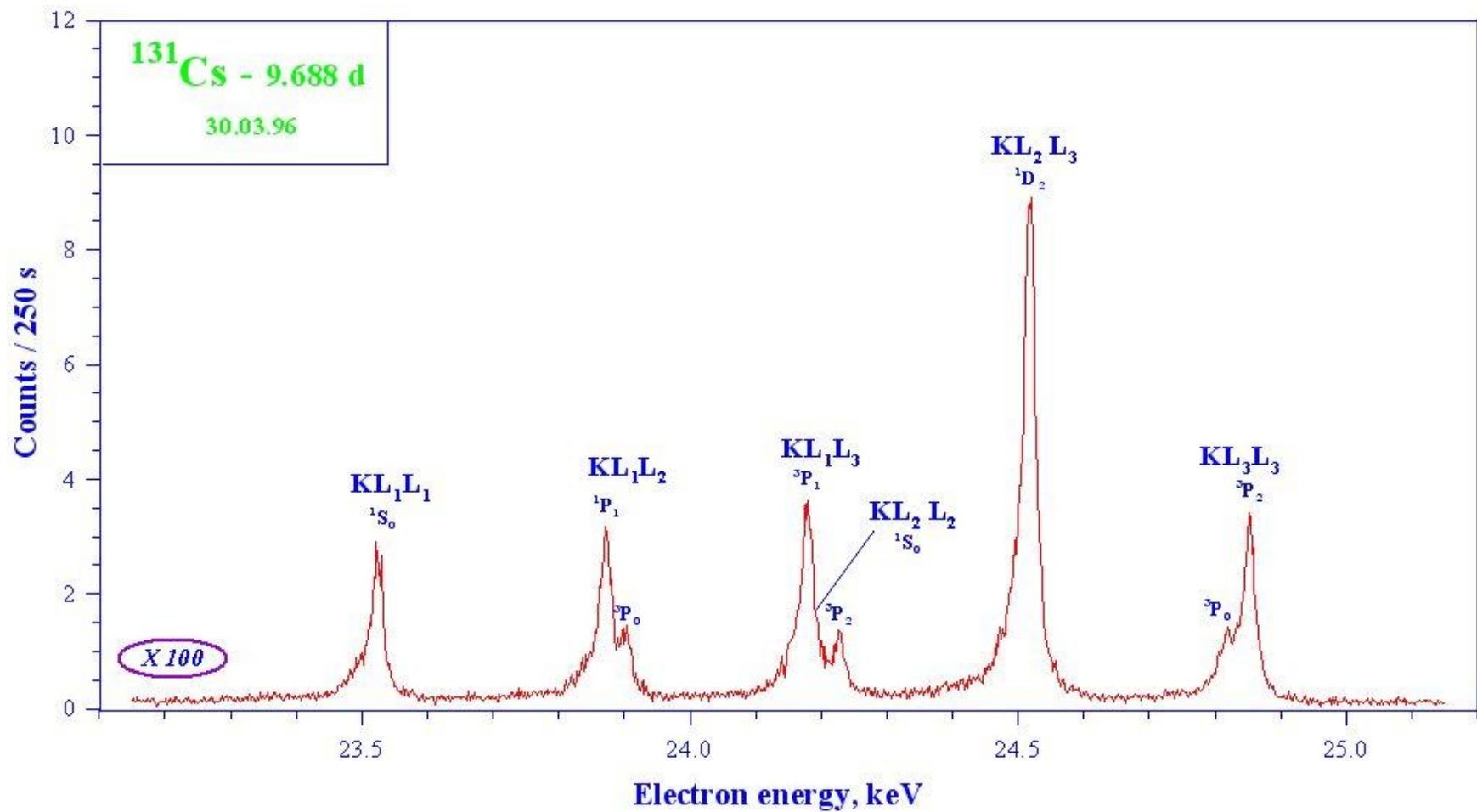


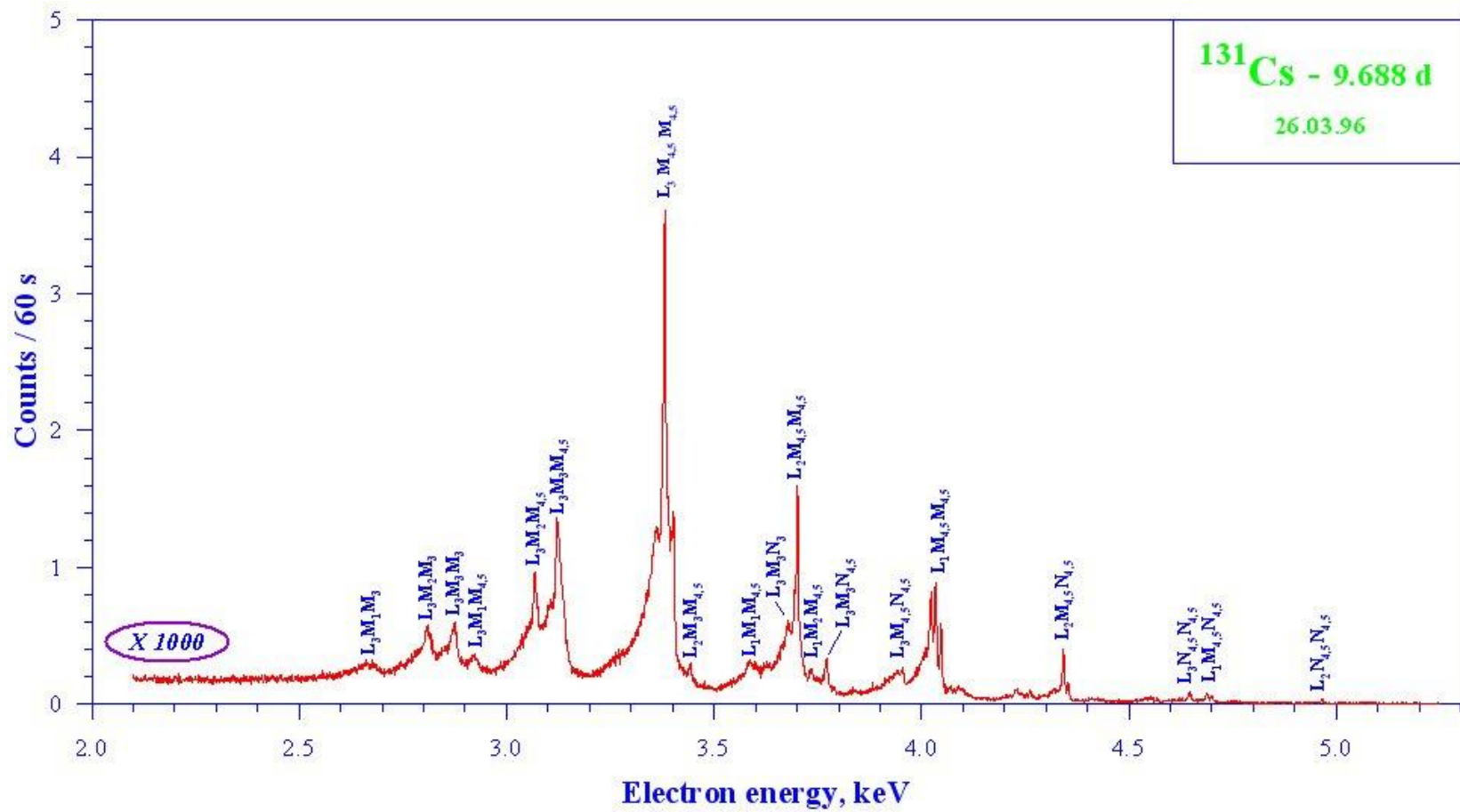
Рис. 17. Спектр гамма-лучей  $^{241}\text{Am}$ , измеренный с помощью  $\text{Si(Li) } /50 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}/$ -детектора /энергетическое разрешение 280 эВ для  $E_\gamma \approx 5,6 \text{ кэВ}/$ .

# Auger – электроны

- Оже процесс является конкурирующим испусканию рентгеновского излучения.







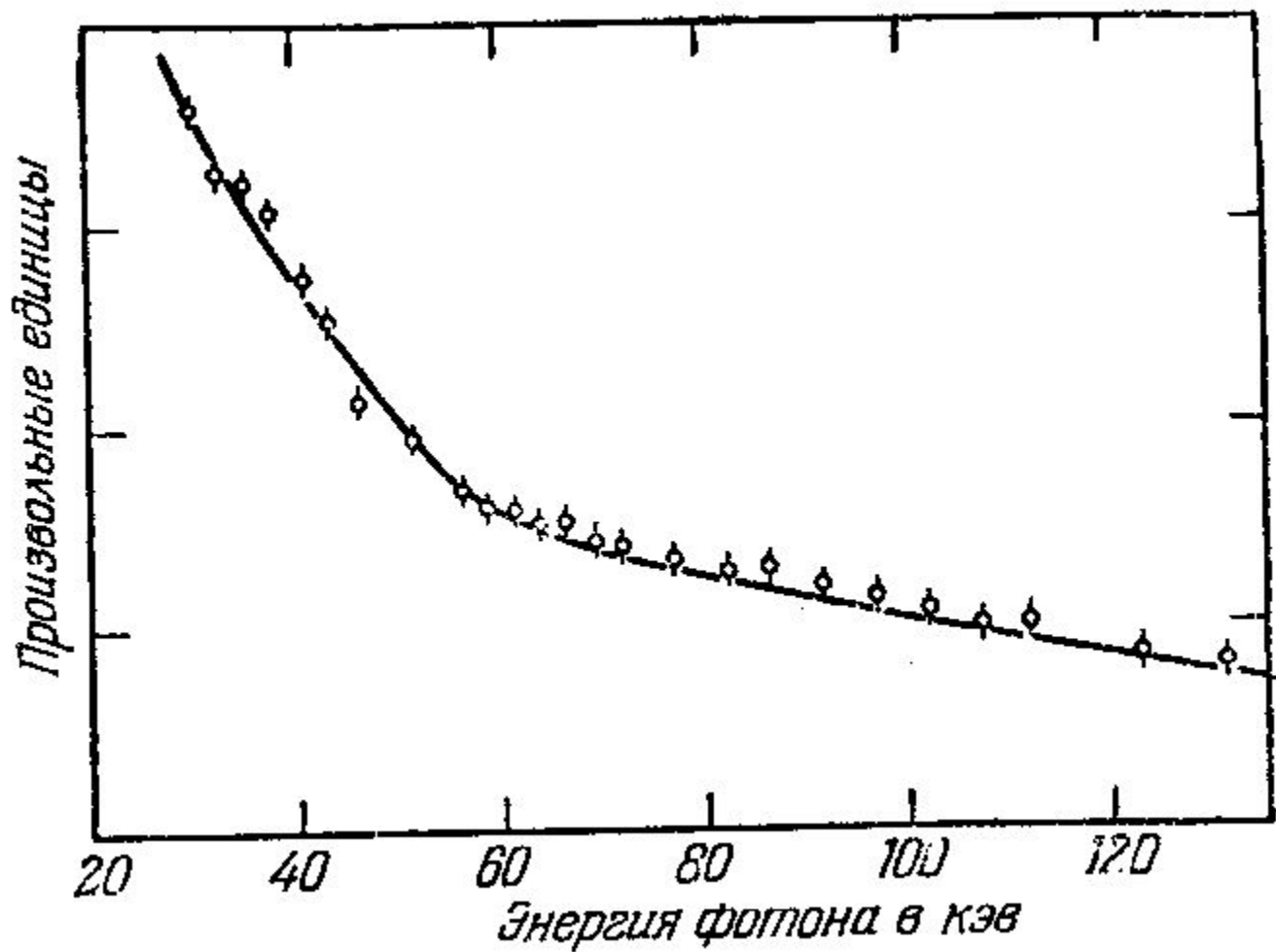


# Внутреннее тормозное излучение

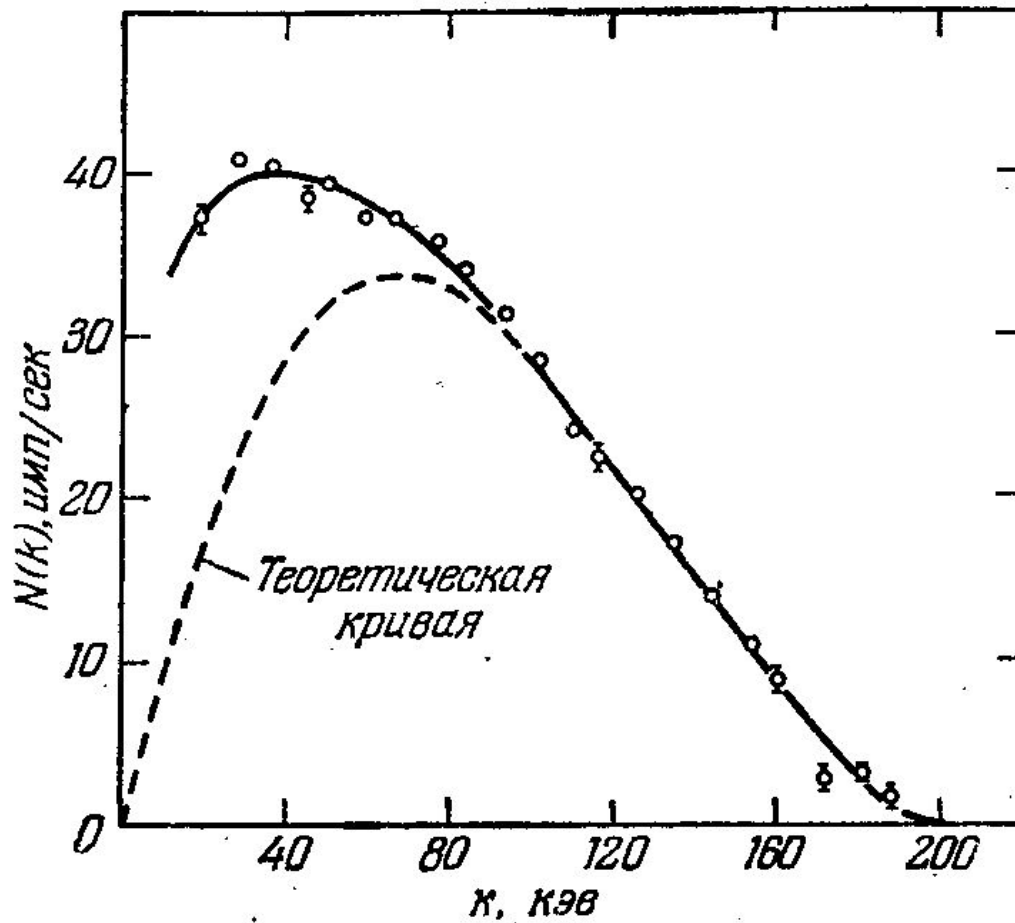
- Взаимодействие испускаемой ядром заряженной частицы (электрона или  $\alpha$ -частицы) с кулоновским полем ядра приводит к рождению тормозных квантов, получивших название **внутреннего тормозного излучения (ВТИ)**.

Спектр ВТИ носит непрерывный характер и простирается до граничной энергии  $\beta$ -спектра или энергии  $\alpha$ -частицы.

Энергетическое распределение ВТИ за исключением мягкой области ведет себя как плавно падающая функция.



Спектр внутреннего тормозного излучения  $^{91}\text{Y}$   
(непрерывная линия – теоретический спектр)



Спектр внутреннего тормозного излучения  $^{55}\text{Fe}$



