



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

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

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

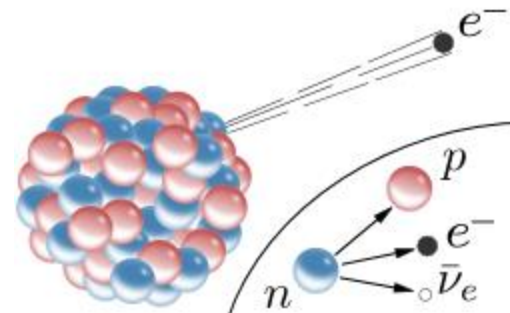
Лекция №9

Бета-распад

2016

Лекция №9

Бета-распад



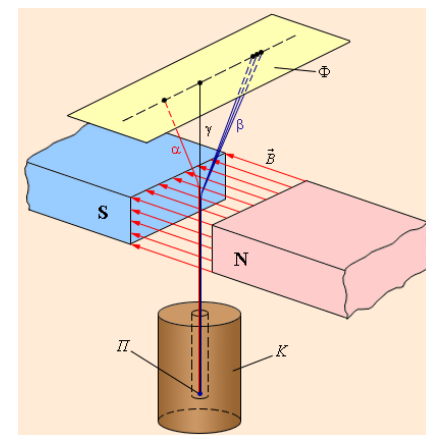
1. Введение
2. Три вида бета-распада
3. Энергетический спектр бета-распада
4. Нейтрино и лептонный заряд
5. Несохранение чётности в слабых взаимодействиях
6. Радиоактивные ряды
7. Двойной бета-распад
8. Внутренняя конверсия

1. Введение

Бéта-распа́д (β -распад) — тип радиоактивного распада ядра, обусловленный слабым взаимодействием и изменяющий заряд ядра на единицу

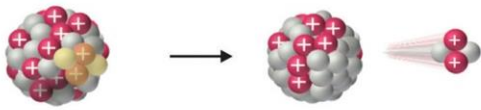
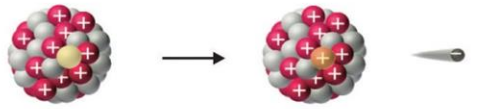
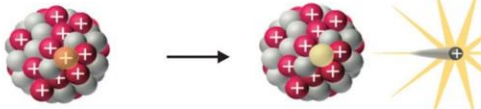


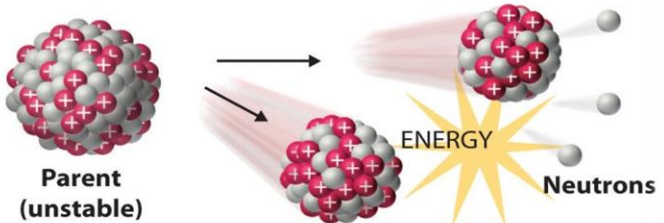
История открытия различных видов радиоактивности

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.



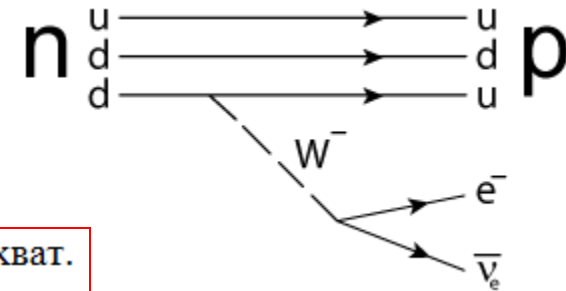
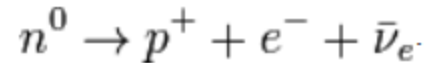
Характеристики радиоактивного распада

Тип распада	Испускаемая частица	ΔZ	ΔN	ΔA	Типичные энергии испускаемых частиц, МэВ	Пример	Последствия
α	${}^4\text{He}^{2+}$	-2	-2	-4	$4 \leq E_{\alpha} \leq 10$	${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$	$Z > 83$
β^-	$e^-, \bar{\nu}_e$	+1	-1	0	$0 \leq E_{\beta^-} \leq 2$	${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$	$N/Z > (N/Z)_{\text{стаб}}$
β^+	e^+, ν_e	-1	+1	0	$0 \leq E_{\beta^+} \leq 2$	${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{Ne} + \beta^+ + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{\text{стаб}}$; лёгкое ядро
$\beta^- \beta^+$	ν_e	-1	+1	0	$0 \leq E_{\nu} \leq 2$	$e^+ + {}^{207}\text{Bi} \rightarrow {}^{207}\text{Pb} + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{\text{стаб}}$; тяжёлое ядро
γ	Фотон	0	0	0	$0,1 \leq E_{\gamma} \leq 2$	${}^{60}\text{Ni} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \gamma$	Возбуждённое ядро
БК	Электрон	0	0	0	$0,1 \leq E_e \leq 2$	${}^{125}\text{Sb}^* \rightarrow {}^{125}\text{Sb} + e^-$	Случай, где γ -эмиссия подавлена

Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + {}^4_2\alpha$	 <p>Parent → Daughter + Alpha Particle</p>
Beta decay	${}^0_{-1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}X' + {}^0_{-1}\beta$	 <p>Parent → Daughter + Beta Particle</p>
Positron emission	${}^0_{+1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}X' + {}^0_{+1}\beta$	 <p>Parent → Daughter + Positron</p>
Electron capture	X rays	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \longrightarrow {}^A_{Z-1}X' + \text{X ray}$	 <p>Parent + Electron → Daughter + X ray</p>
Gamma emission	${}^0_0\gamma$	${}^A_ZX^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}^A_ZX' + {}^0_0\gamma$	 <p>Parent (excited nuclear state) → Daughter + Gamma ray</p>
Spontaneous fission	Neutrons	${}^A_{Z+Y}X \longrightarrow {}^A_ZX' + {}^B_YX' + C^1_0n$	 <p>Parent (unstable) → Daughters + Neutrons + ENERGY</p>

2. Три вида бета-распада

В β^- -распаде слабое взаимодействие превращает нейтрон в протон, при этом испускаются электрон и электронное антинейтрино:



Существуют три типа β -распада – β^- -распад, β^+ -распад и e-захват.

$$\beta^-: (A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^- + \bar{\nu}_e,$$

$$\beta^+: (A, Z) \rightarrow (A, Z-1) + e^+ + \nu_e,$$

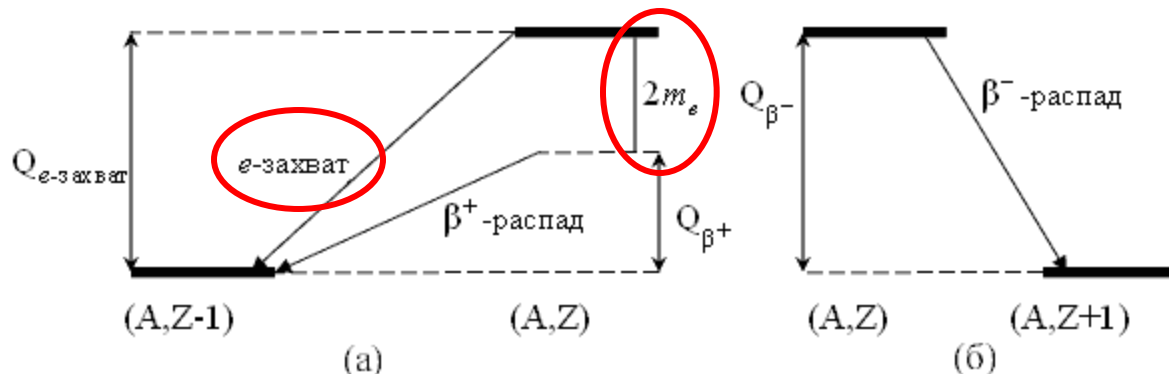
$$e: (A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z-1) + \nu_e.$$

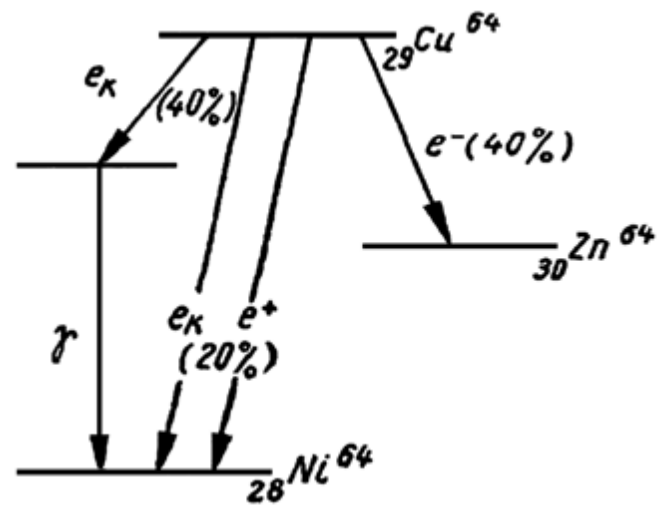
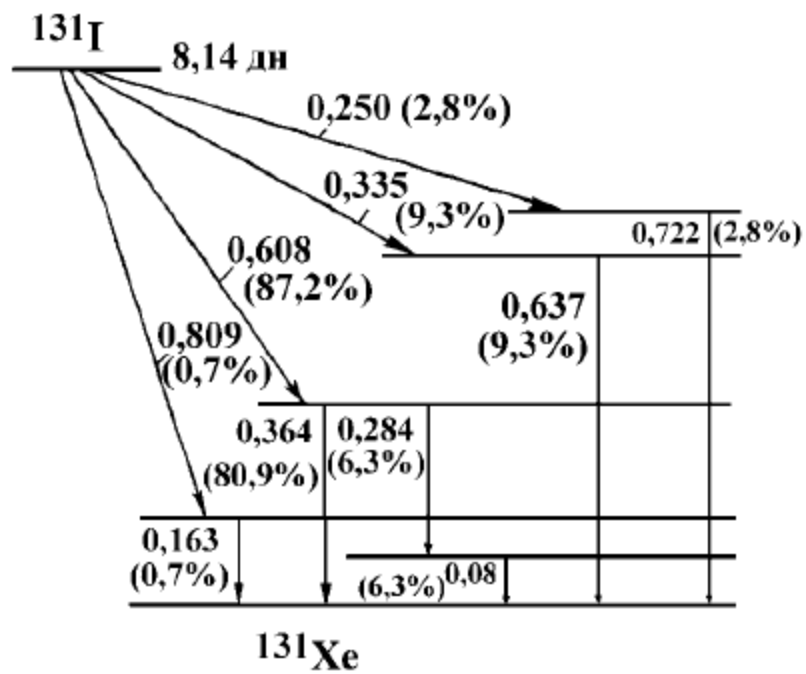
Происходящие при этом внутри ядра превращения нуклонов и энергетические условия β -распада имеют вид (массу нейтрино полагаем нулевой):

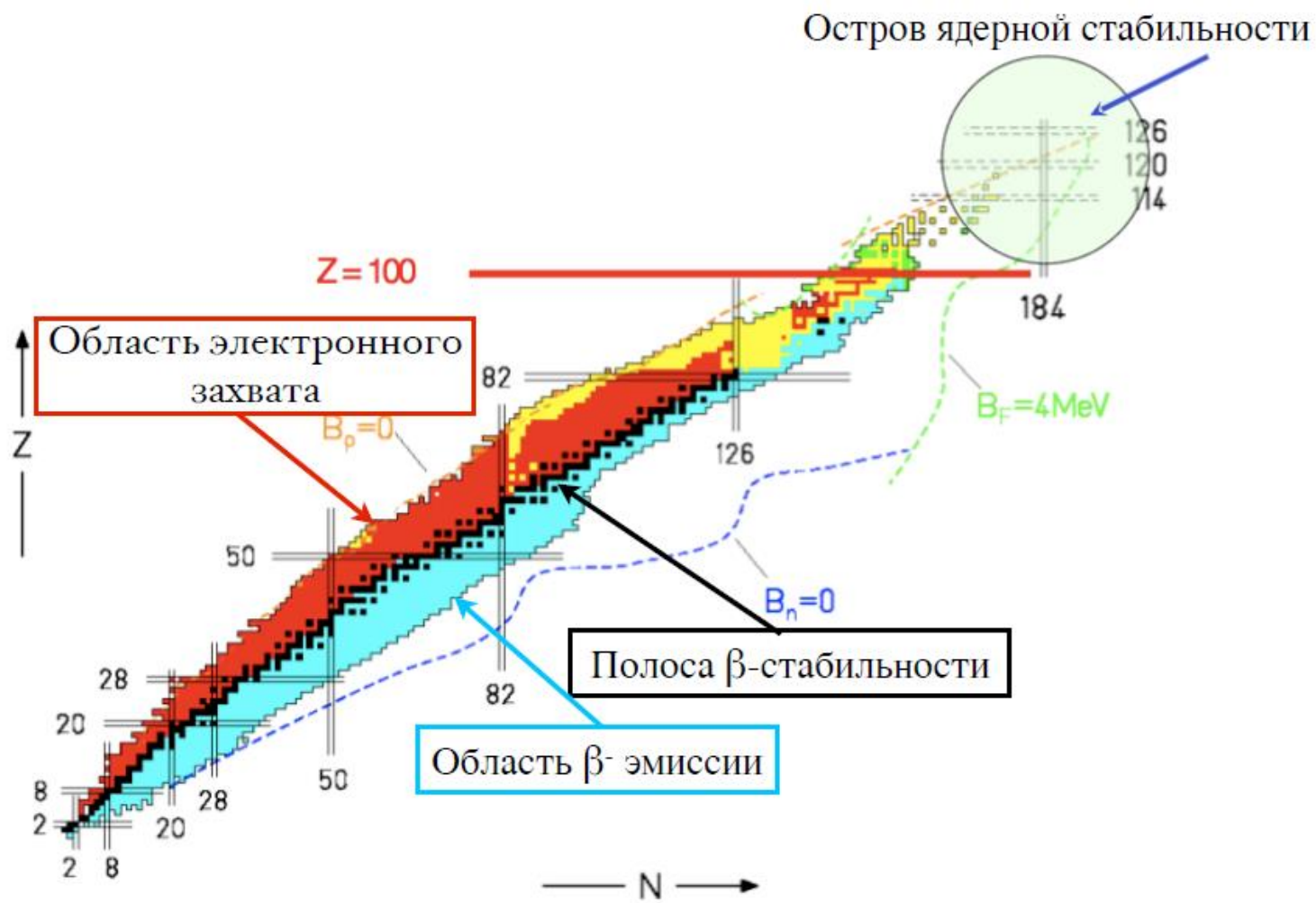
$$\beta^- (n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e), \quad M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e,$$

$$\beta^+ (p \rightarrow n + e^+ + \nu_e), \quad M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e,$$

$$e\text{-захват} (p + e^- \rightarrow n + \nu_e), \quad M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1).$$

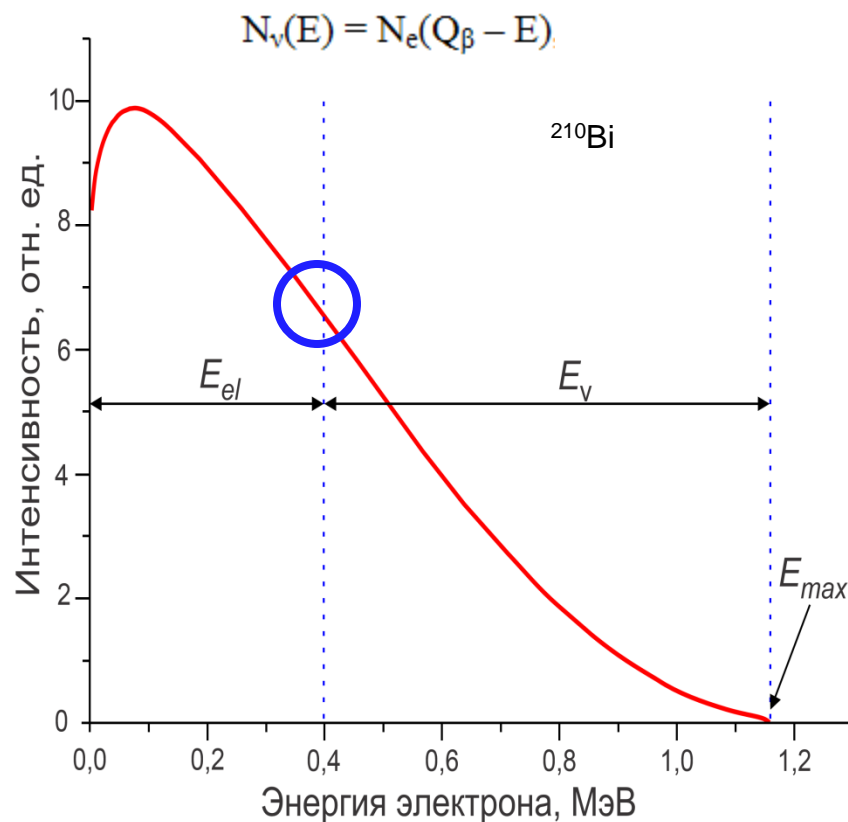
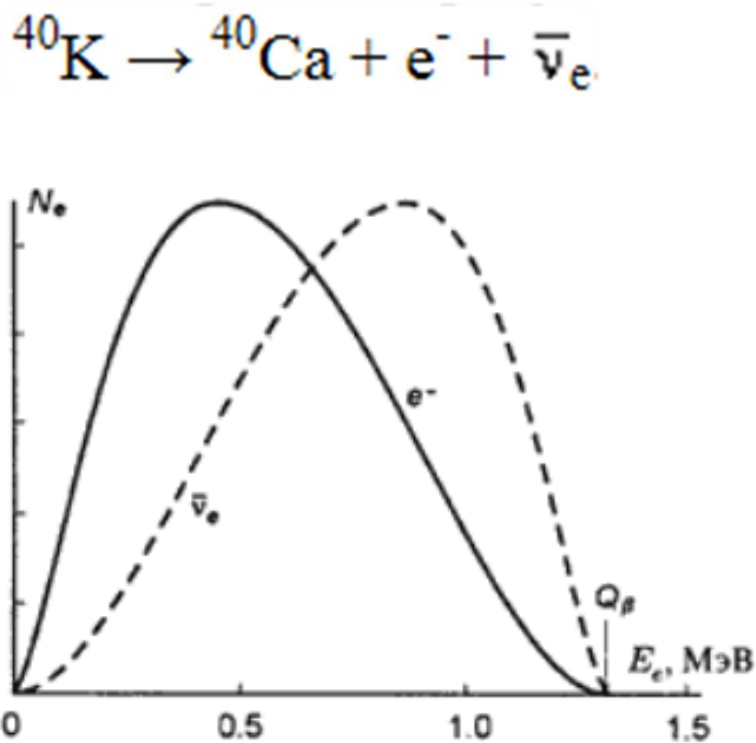




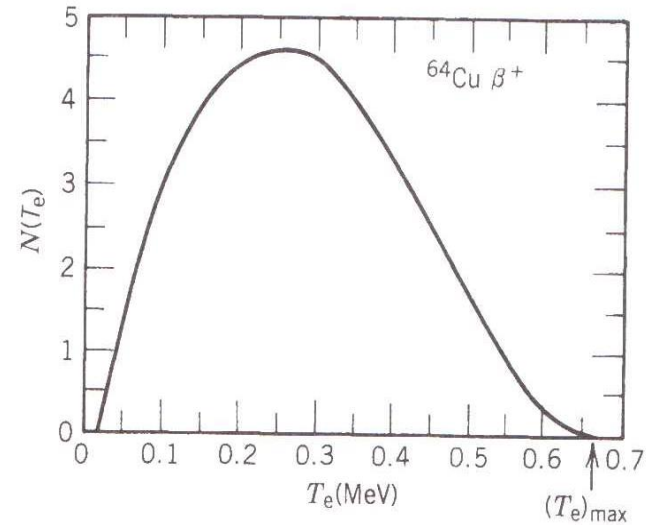
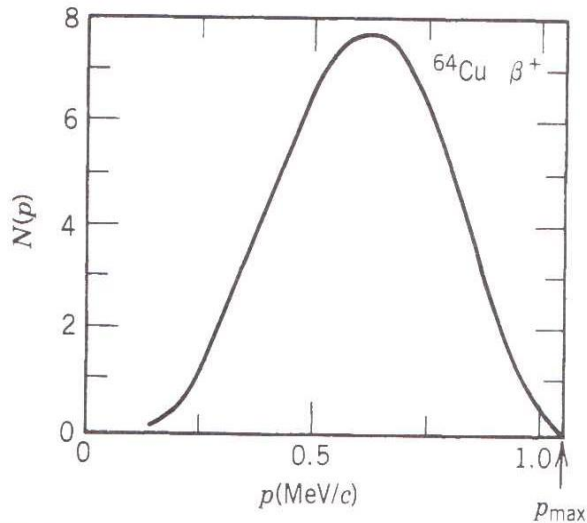
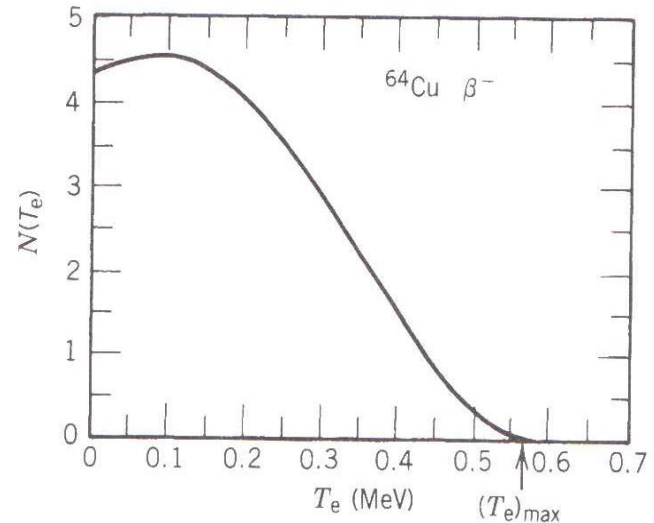
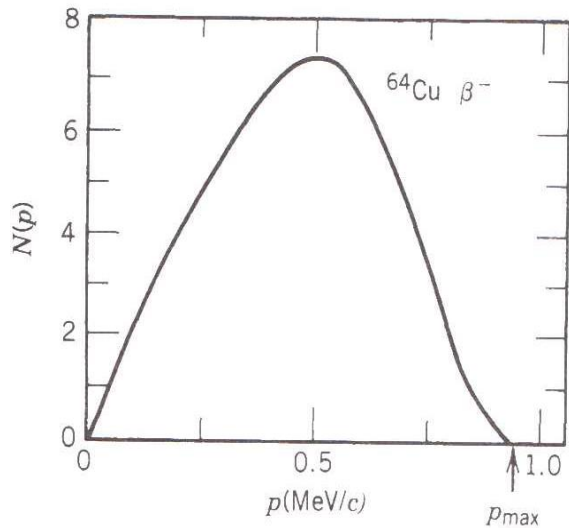
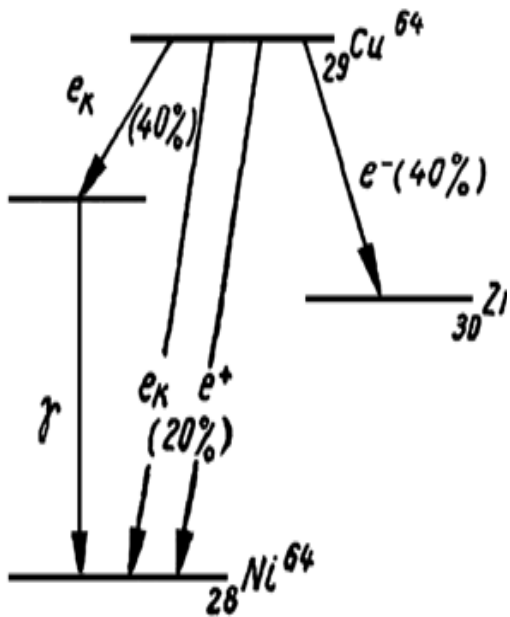


3. Энергетический спектр бета-распада

Спектр электронов, образующихся при β -распаде в отличие от дискретного спектра α -частиц имеет непрерывный характер, т.е. их ядра вылетают электроны различных энергий вплоть до энергии β -распада. Непрерывный спектр электронов некоторыми физиками интерпретировался как невыполнение закона сохранения энергии в β -распаде.

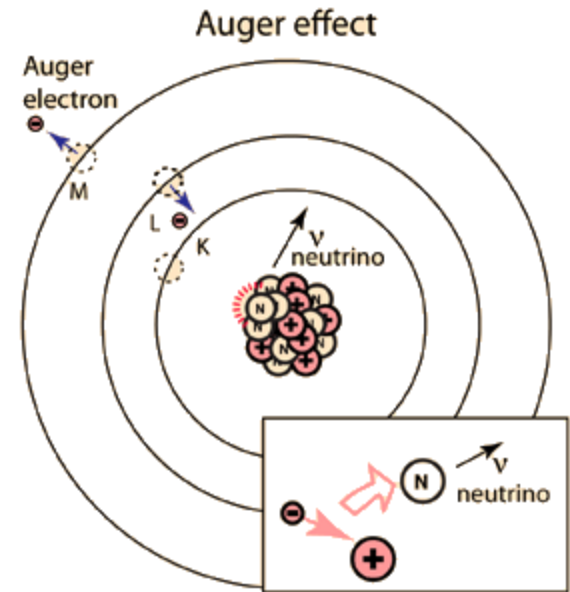
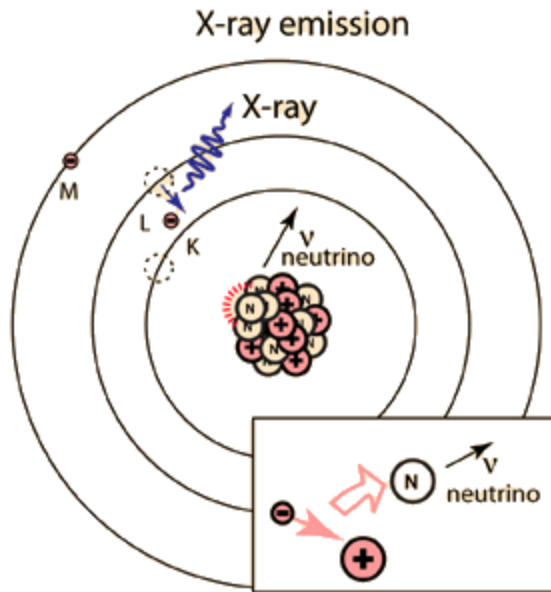
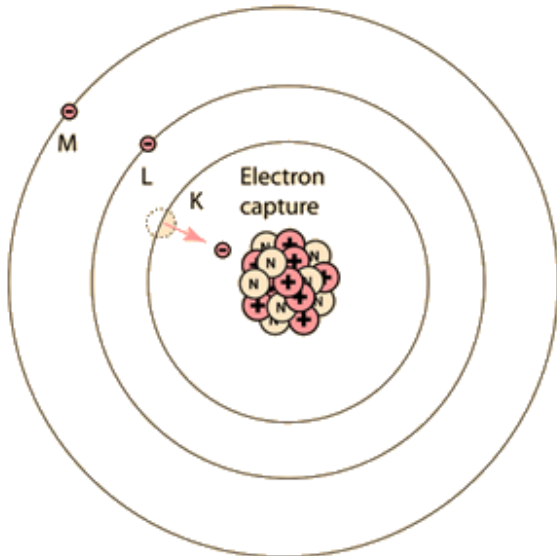
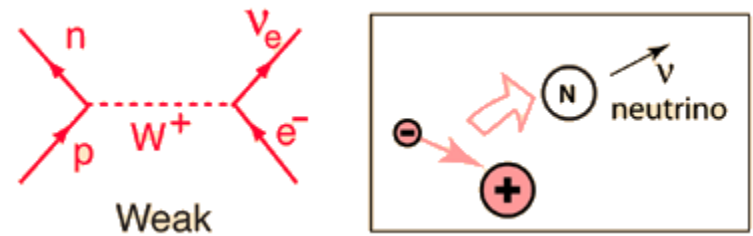
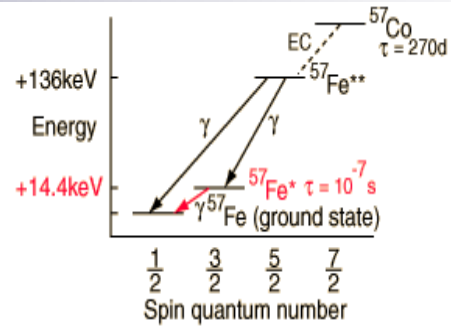


^{64}Cu



При **e-захвате** спектры нейтрино и ядра отдачи являются дискретными, так как e-захват – двухчастичный процесс, нейтрино вылетает из ядра

Наблюдение дискретного спектра ядер отдачи, образующихся при e-захвате, было первым подтверждением правильности гипотезы Паули о существовании нейтрино (см.п.4).



Спектр электронов при распаде ^{137}Cs

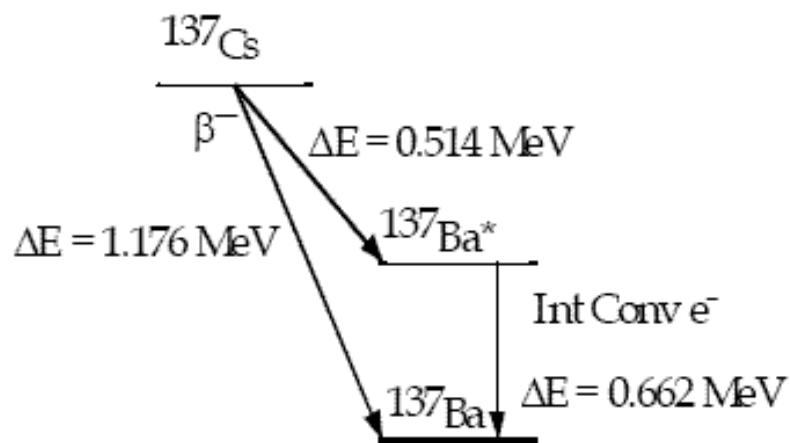
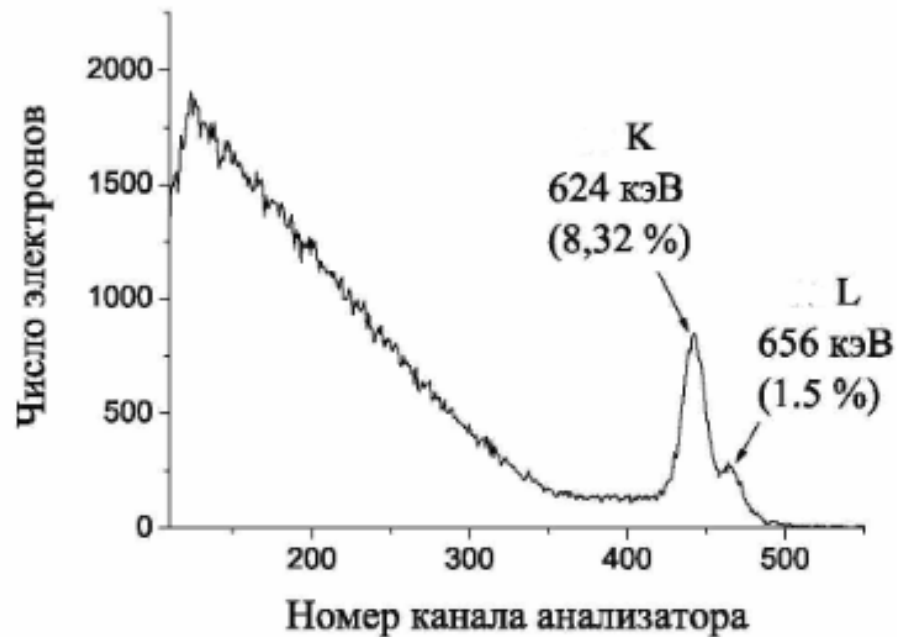
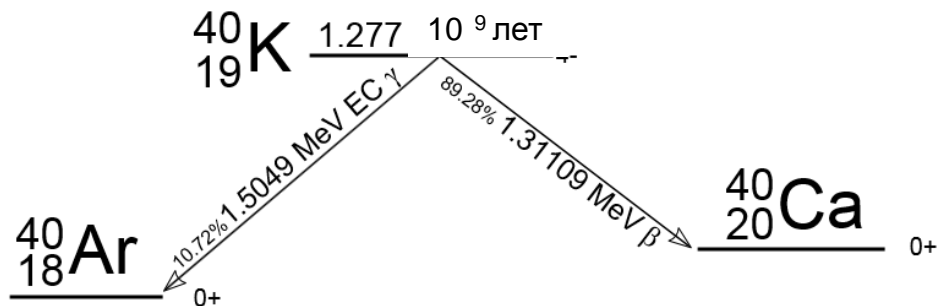


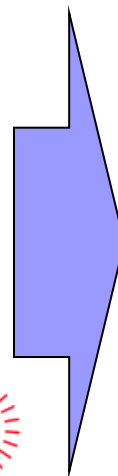
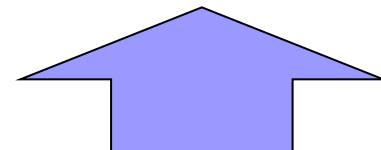
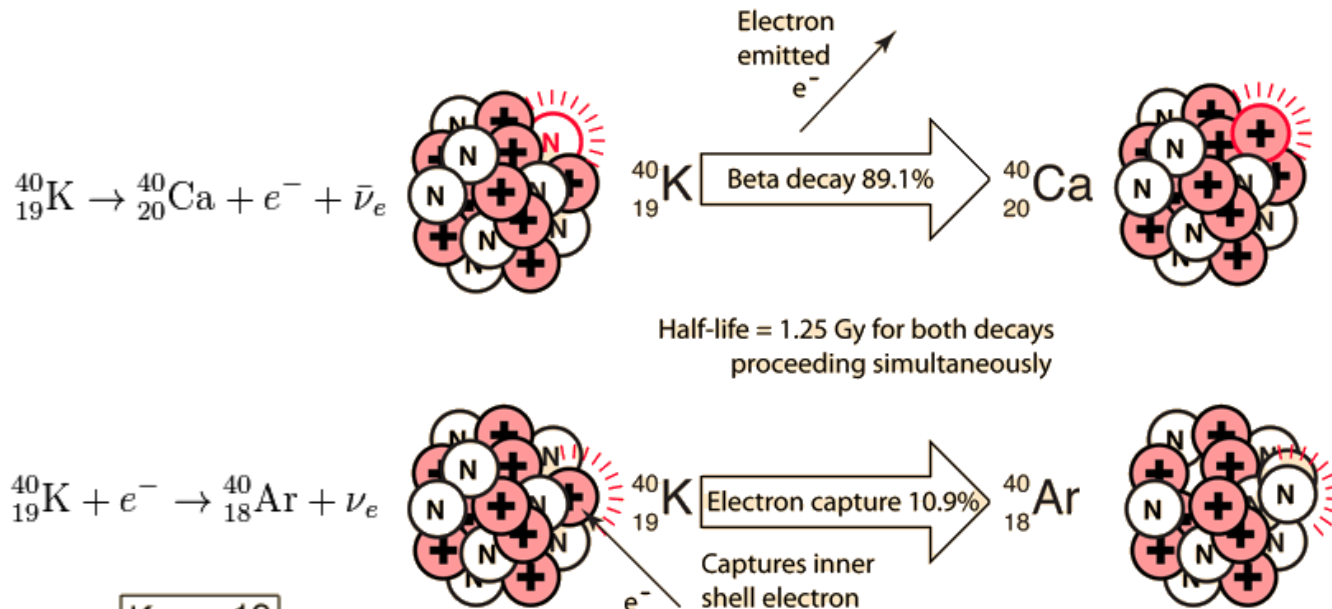
Fig 1: ^{137}Cs Decay



Пример применения бета-распада



$$t = \frac{\ln\left[1 + \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_b}{\lambda_e}\right)\right]}{\lambda_e + \lambda_b}$$



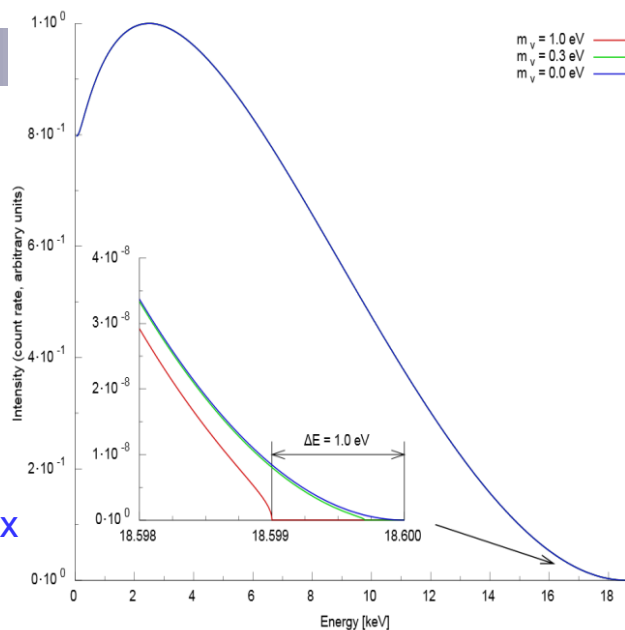
Определение
возраста геол.
пород по
соотношению
ИЗОТОПОВ



(Ar)4s

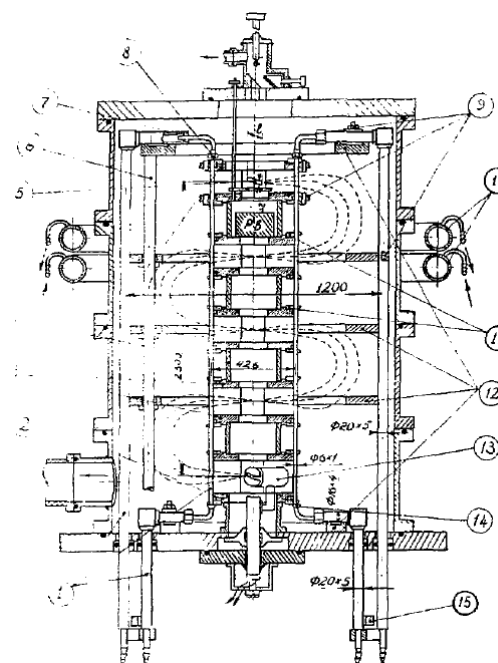
Масса нейтрино

Экспериментальный подход к этой проблеме включает в себя как непрямые методы (поиск нейтринных осцилляций, двойной β -распад) так и методы основанные на изучении кинематики распада. К последним относится исследование формы бета-спектра вблизи его верхней границы. Этот подход был впервые развит в ИТЭФ в лаборатории В.А.Любимова в экспериментах 70-80х годов на β -спектрометре Е.Ф.Третьякова



В.А. Любимов
(1929 – 2012)

Место проведения эксперимента	m_{ν}^2, eV^2	m_{ν}, eV
ИТЭФ (Любимов), 1980		$11 < m_{\nu} < 30$
Цюрих, 1992	-24	< 11
Токио, 1991	-65	< 13
Ливермор, 1992	-72	< 8
Майнц, 1992	-22	< 6
Троицк, 1994	-22	< 1.7
Троицк, 1996	3.8	< 4.4
Троицк, 1994-1996	1.5	< 3.9

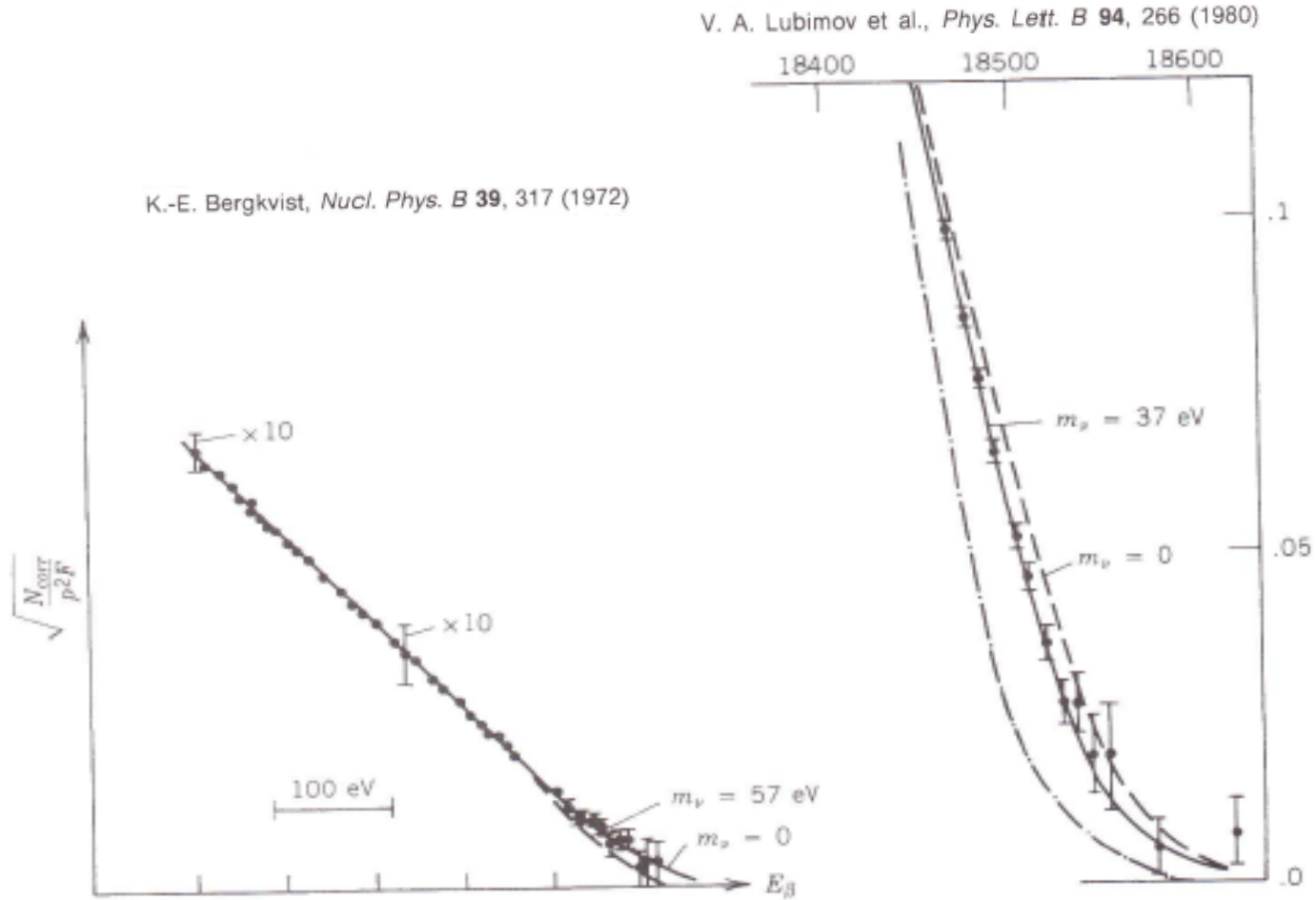


Безжелезный тороидальный β -спектрометр Е.Ф.Третьякова
(идея В.В.Владимирского, 1956 г.)



Институт Теоретической
и Экспериментальной
Физики (ИТЭФ)
им. А.И. Алиханова

Эксперименты по определению массы нейтрино из формы бета-спектра трития



Пример «борьбы» экспериментаторов за результат

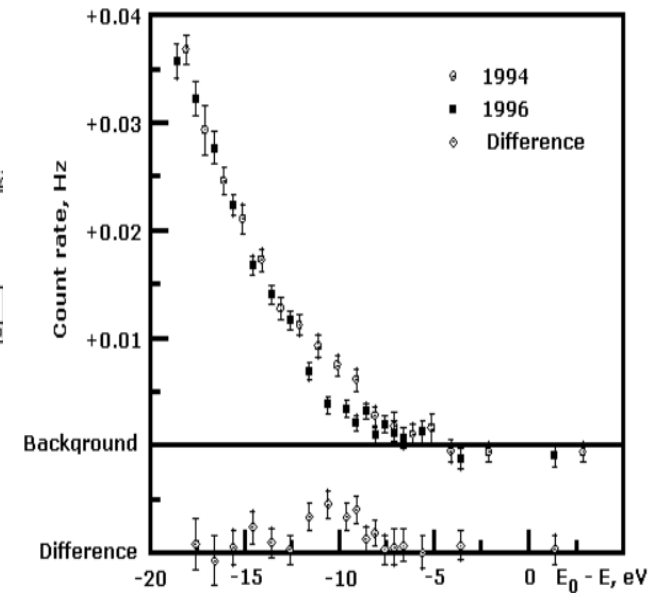
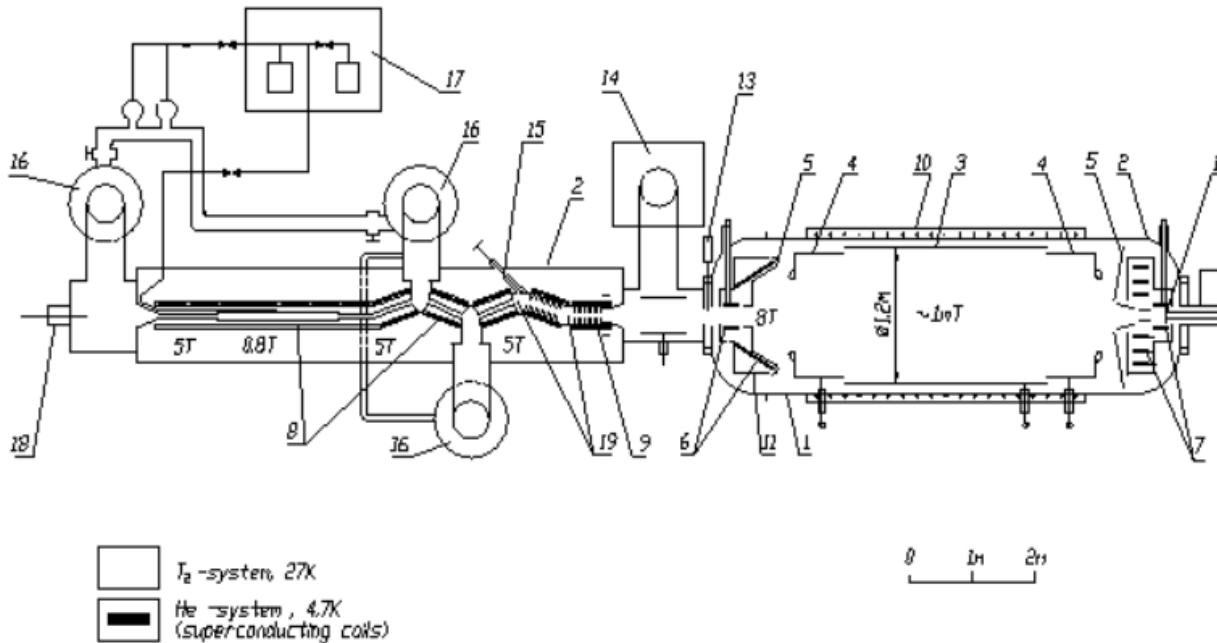
Троицкий эксперимент (ИЯИ РАН)

1994 -1996 гг.

$$m_\nu < 2.2 \text{ eV}/c^2$$



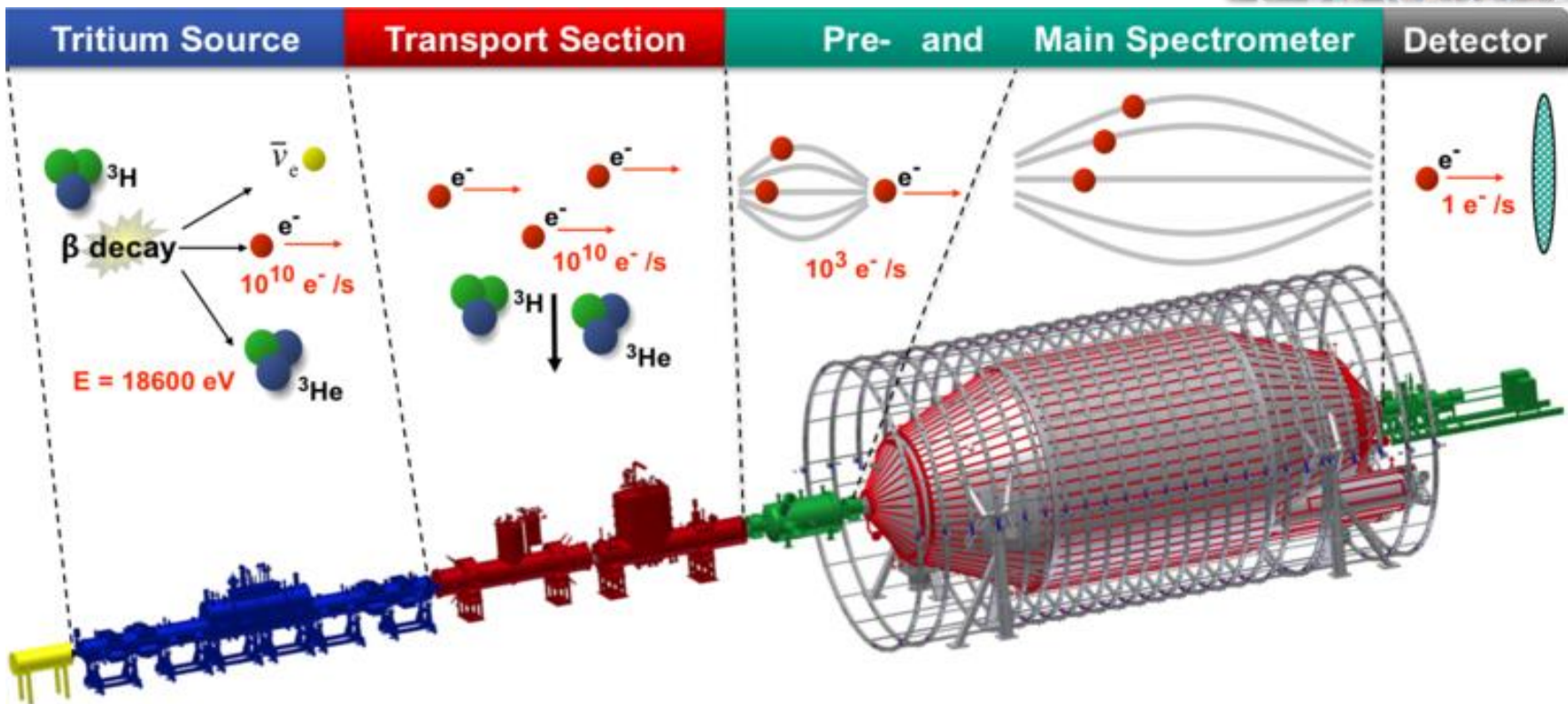
ЛОБАШЕВ
Владимир Михайлович
(1934-2011)



Экспериментальная установка 1,2-вакуумный баллон; 3,4 электростатический анализатор; 5-заземленный электрод; 6,7,8,9 сверхпроводящие катушки; 10 нагревательный элемент; 12 Si(Li) детектор; 14 насос; 16-Hg диффузионный насос; 17 T2 система очистки; 18 электронная пушка.



The **KARlsruhe TRITium Neutrino (KATRIN)** experiment (2014 – now)



Tritium decays, releasing an electron and an anti-electron-neutrino. While the neutrino escapes undetected, the electron starts its journey to the detector.

Electrons are guided towards the spectrometer by magnetic fields. Tritium has to be pumped out to provide tritium free spectrometers.

The electron energy is analyzed by applying an electrostatic retarding potential. Electrons are only transmitted if their kinetic energy is sufficiently high.

At the end of their journey, the electrons are counted at the detector. Their rate varies with the spectrometer potential and hence gives an integrated β -spectrum.

4. Нейтрино и лептонный заряд

Как мы видели, спектр электронов, образующихся при β -распаде в отличие от дискретного спектра α -частиц, имеет непрерывный характер.

Непрерывный спектр электронов некоторыми физиками интерпретировался как невыполнение закона сохранения энергии в β -распаде.

Впервые гипотеза о ещё одной частице, которая образуется при β -распаде высказал В. Паули в 1930 г. в письме участникам физической конференции в г. Тюбингене.



Вольфганг Паули
(1900-1958) Н.п.1945

«Дорогие радиоактивные дамы и господа.

Имея в виду... непрерывный β -спектр, я предпринял отчаянную попытку спасти обменную статистику и закон сохранения энергии. Именно имеется возможность того, что в ядрах существуют электрически нейтральные частицы, которые я буду называть «нейтронами» и которые обладают спином $1/2$. Масса «нейтрона» по порядку величины должна быть сравнимой с массой электрона и во всяком случае не более 0.01 массы протона. Непрерывный β -спектр тогда стал бы понятным, если предположить, что при распаде вместе с электроном испускается ещё и «нейтрон» таким образом, что сумма энергий «нейтрона» и электрона остаётся постоянной».

После открытия в 1932 г. нейтрона Э.Ферми предложил называть частицу В.Паули «нейтрино». В 1933 г. на Сольвеевском конгрессе В. Паули выступил с докладом о механизме β -распада с участием нейтральной частицы со спином $J = 1/2$.

Наблюдение дискретного спектра ядер отдачи, образующихся при e -захвате, было первым подтверждением правильности гипотезы Паули.

Антинейтрино было экспериментально обнаружено в 1956 г. в экспериментах Ф. Райнеса и К. Козна.



SOLVAY CONFERENCE 1927

colorized by pastincolour.com

	A. PICARD	E. HENRIOT	P. EHRENFEST	Ed. HERSEN	Th. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	E. VERSCHAFFELT	W. PAULI	W. HEISENBERG	R.H FOWLER	L. BRILLOUIN
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W.L. BRAGG	H.A. KRAMERS	P.A.M. DIRAC	A.H. COMPTON	L. de BROGLIE	M. BORN	N. BOHR			
I. LANGMUIR	M. PLANCK	Mme CURIE	H.A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	Ch.E. GUYE	C.T.R. WILSON	O.W. RICHARDSON			

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL

Эффект Паули

The Pauli Effect, a mysterious phenomenon which is not, and probably never will, be understood on a purely materialistic basis.

Однажды в лаборатории Джеймса Франка в Гёттингене сложный экспериментальный прибор для изучения атомных явлений по совершенно необъяснимой причине вышел из строя. Франк написал о случившемся Паули в Цюрих. В ответ пришло письмо с датской маркой, в котором Паули писал, что он ездил проведать Нильса Бора, и во время загадочного происшествия в лаборатории Франка поезд, в котором ехал Паули, как раз совершал остановку в Гёттингене.

George Gamow. Thirty Years that Shook Physics: The Story of Quantum Theory, Garden City, N. Y.: Doubleday, 1966. P. 64.

Однажды Паули решили разыграть, соединив настенные часы в зале, где он должен был читать лекцию, с входной дверью с помощью реле, чтобы при открытии двери часы остановились. Однако этого не произошло — когда Паули вошёл, неожиданно отказало реле.

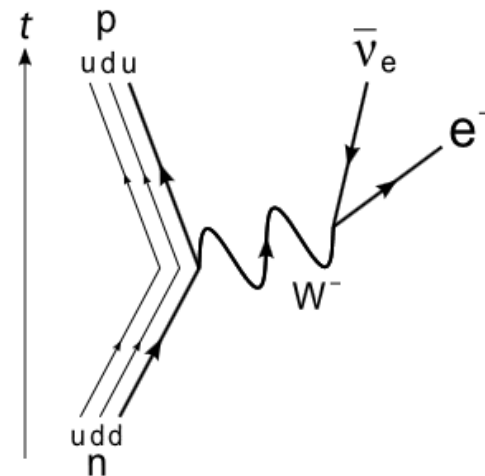
Анекдоты

После смерти Паули удостоивается аудиенции у Бога. Паули спрашивает Бога, почему постоянная тонкой структуры равна $1/137$. Бог кивает, идёт к доске и начинает со страшной скоростью писать уравнение за уравнением. Паули смотрит сначала с большой удовлетворённостью, но вскоре начинает сильно и решительно отрицательно качать головой.

Гейзенберг представил Паули свою новую теорию. В качестве ответа он получил письмо, в котором был нарисован квадрат с пометкой «Я могу рисовать как Тициан». Внизу мелким почерком было приписано: «Не хватает только деталей».

Законы сохранения при бета-распаде

$$\beta^- - \text{распад} \begin{cases} Z \rightarrow Z+1 \\ A \rightarrow A \end{cases} \quad {}^A Z_N \rightarrow {}^A (Z+1)_{N-1}^+ + e^- + \bar{\nu}_e + Q_{\beta^-}$$



Наряду с законами сохранения энергии, импульса, момента количества движения в процессе β -распада выполняются законы сохранения барионного B и электронного лептонного L_e квантовых чисел.

- Электроны, нейтрино имеют $B = 0$, $L_e = +1$.
- Позитроны, антинейтрино имеют $B = 0$, $L_e = -1$.
- Каждый нуклон, входящий в состав ядра, имеет $B = +1$, $L_e = 0$.

Разрешенные и запрещенные β -распады

Бета-распады разделяются на разрешенные и запрещенные, различающиеся вероятностями переходов. К разрешенным переходам относятся переходы, при которых суммарный орбитальный момент l , уносимый электроном и нейтрино, равен нулю. Запрещенные переходы подразделяются по порядку запрета, который определяется орбитальным моментом l .

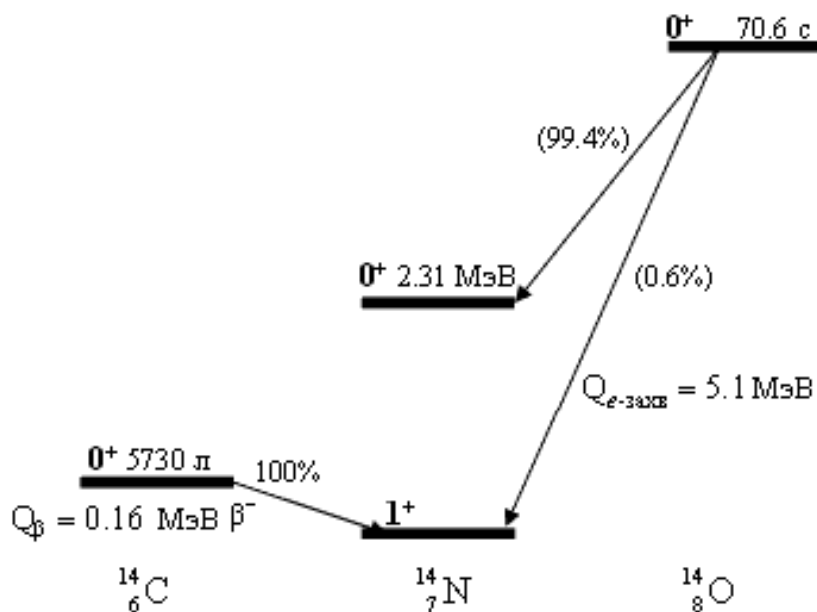
$l = 1$ – запрещенный переход первого порядка,

$l = 2$ – второго порядка и т. д.

Отношения вероятностей вылета частицы с орбитальными моментами $l = 0$ (w_0) и $l \neq 0$ (w_l)

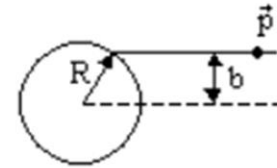
$$w_l/w_0 \simeq (R/\lambda)^{2l},$$

R – радиус ядра, λ – длина волны.



Бета-распады также делятся на переходы типа Ферми, при которых спины вылетающих лептонов антипараллельны, и переходы типа Гамова-Теллера, при которых спины вылетающих лептонов параллельны.

Сильную зависимость вероятности бета-переходов от орбитального момента вылетающих лептонов можно понять из следующего качественного рассмотрения. На ядро с радиусом R налетает частица с импульсом p и прицельным параметром b . Классический момент импульса pb равен величине орбитального момента



$$pb = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

Для прицельного параметра b в классическом приближении должно выполняться условие

$$b = \hbar \sqrt{l(l+1)} / p < R ..$$

Для лептонов в релятивистском случае

$$\hbar c \sqrt{l(l+1)} / T < R,$$

T – кинетическая энергия вылетающего лептона.

Радиусы даже самых тяжелых ядер меньше 10 Фм. Положив радиус равным 10 Фм, а энергию β -распада 20 МэВ, получим

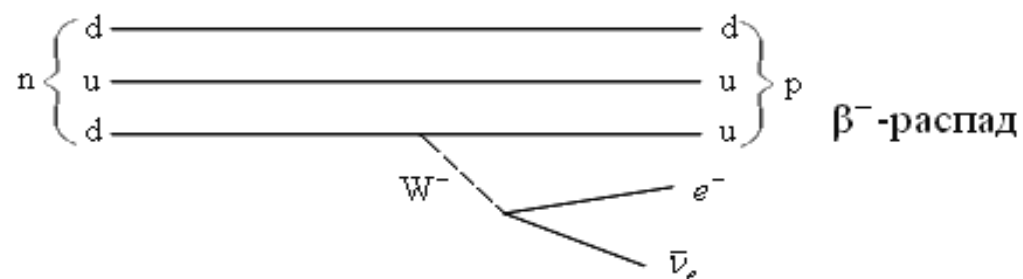
$$200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм} \sqrt{l(l+1)} / 20 \text{ МэВ} < 10 \text{ Фм}.$$

Видно, что орбитальный момент вылетающих при бета-распаде лептонов при квазиклассическом рассмотрении может быть только нулевой, а переходы с $l \neq 0$ запрещены. Однако квантовые свойства частиц приводят к тому, что такие запрещенные переходы происходят, хотя они и сильно подавлены.

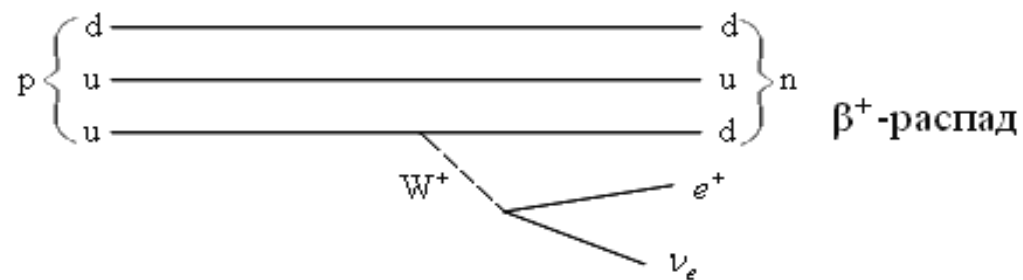
$$w_l/w_0 \simeq (R/\lambda)^{2l}.$$

Переносчиками слабого взаимодействия являются W^+ , W^- и Z -бозоны. На кварковом уровне внутриядерные превращения в процессах β -распада имеют вид.

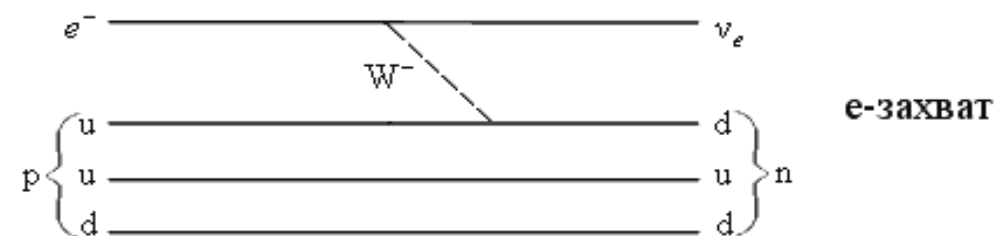
При β^- -распаде один из нейтронов ядра превращается в протон. При этом испускается электрон e^- и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$.



При β^+ -распаде один из протонов ядра превращается в нейтрон. При этом испускается позитрон e^+ и электронное нейтрино ν_e .

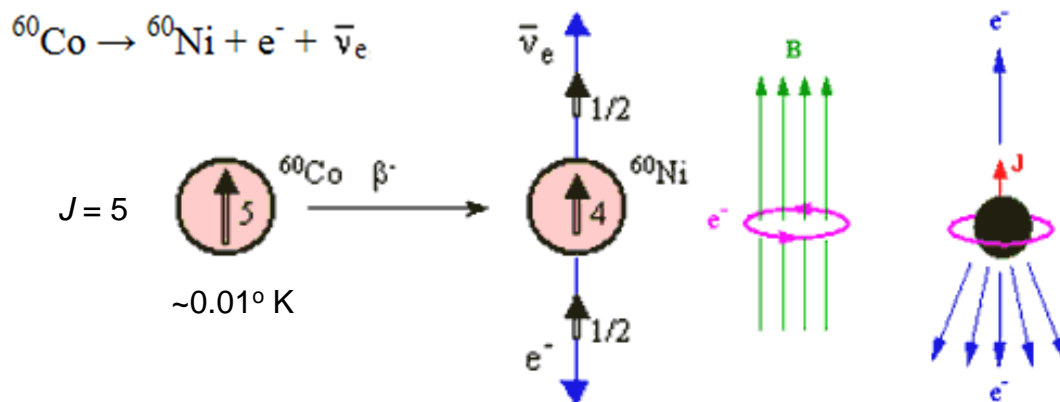


При e -захвате в результате взаимодействия протона с электроном атомной оболочки происходит превращение протона в нейтрон с испусканием из ядра электронного нейтрино ν_e .



5. Несохранение чётности в слабых взаимодействиях

Впервые несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях было обнаружено в эксперименте Ву и др. в 1957 г.



Из закона сохранения

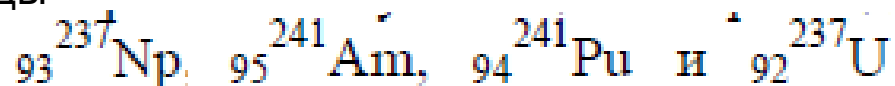
пространственной четности в сферических координатах для квадрата модуля волновой функции

$$\psi |(r, \theta, j)|^2 = \psi |(r, \pi - \theta, j)|^2,$$

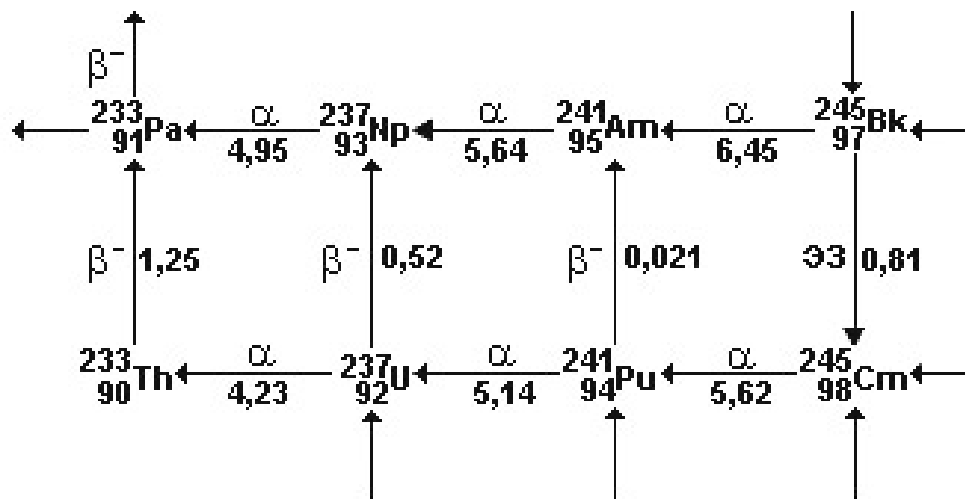
следует, что вероятности испускания частиц под углами θ и $\pi - \theta$ равны. Если бы пространственная четность сохранялась, что эквивалентно зеркальному отражению, должно было бы регистрироваться одинаковое количество электронов, как по направлению магнитного поля, так и в противоположном направлении. Оказалось, что электроны испускаются преимущественно в направлении противоположном направлению спинов ядер (магнитного поля), т.е. тем самым было доказано, что в слабых распадах четность не сохраняется. Спин антинейтрино всегда направлен по импульсу (положительная или правая спиральность), спин нейтрино – против импульса (отрицательная или левая спиральность).

6. Циклы распадов

β^- -распады, совместно с α -распадами тяжёлых ядер, образуют некоторые замкнутые циклы распадов, например, распады



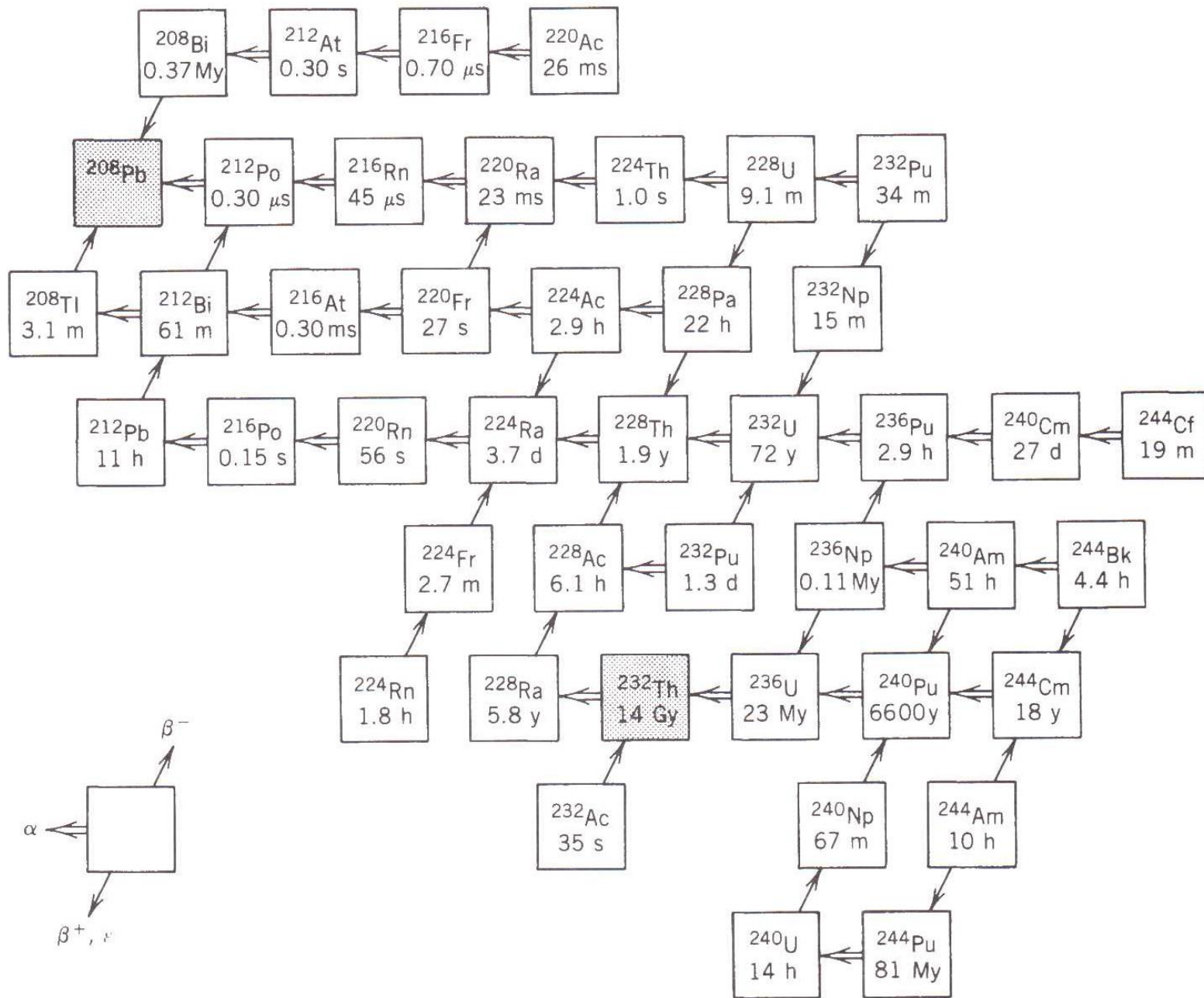
Согласно закону сохранения энергии, в пределах цикла сумма энергий распадов нуклидов, входящих в цикл равна нулю. Зная энергетический баланс трёх нуклидов в цикле, можно найти массу четвёртого, ещё неизвестного нуклида.



Циклы распада для части $4n+1$ семейства.

Типы распада показаны стрелками.

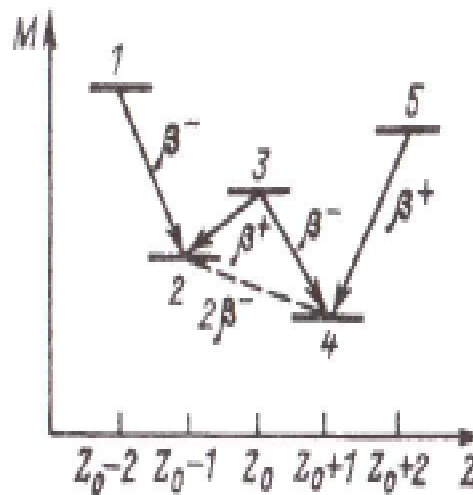
Числа показывают общие энергии распада в МэВ.



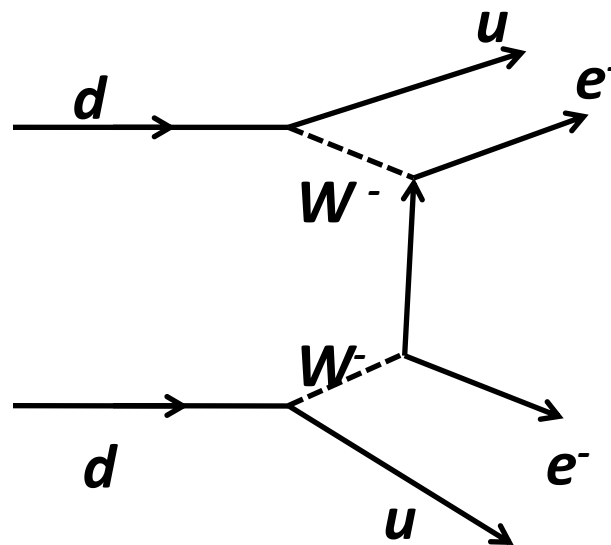
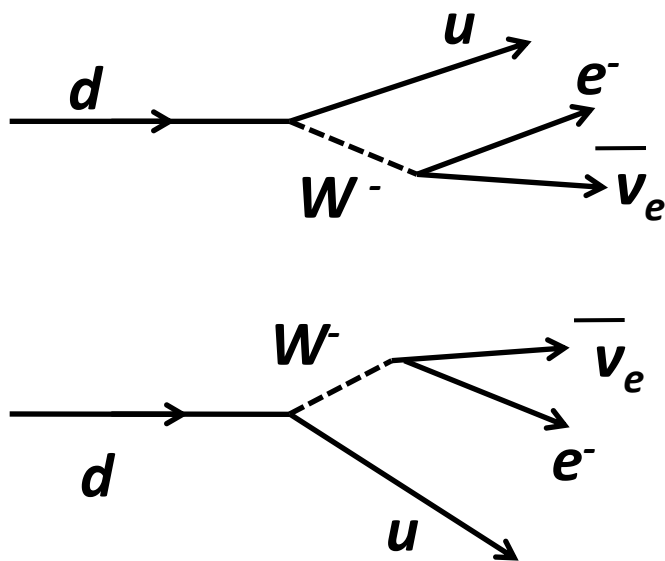
Ториевая 4n серия распадов. Окончательное стабильное ядро - ^{208}Pb

7. Двойной бета-распад

В природе существует большое число стабильных четно-четных ядер-изобар с зарядом отличающимся на две единицы: (A, Z) и $(A, Z \pm 2)$. В этих случаях превращение ядра (A, Z) в ядро-изобар $(A, Z \pm 2)$ может происходить с одновременным испусканием двух электронов или двух позитронов. Впервые на это обратила внимание М. Гепперт-Майер в 1935 г. [Phys. Rev. 48 (1935) 512].



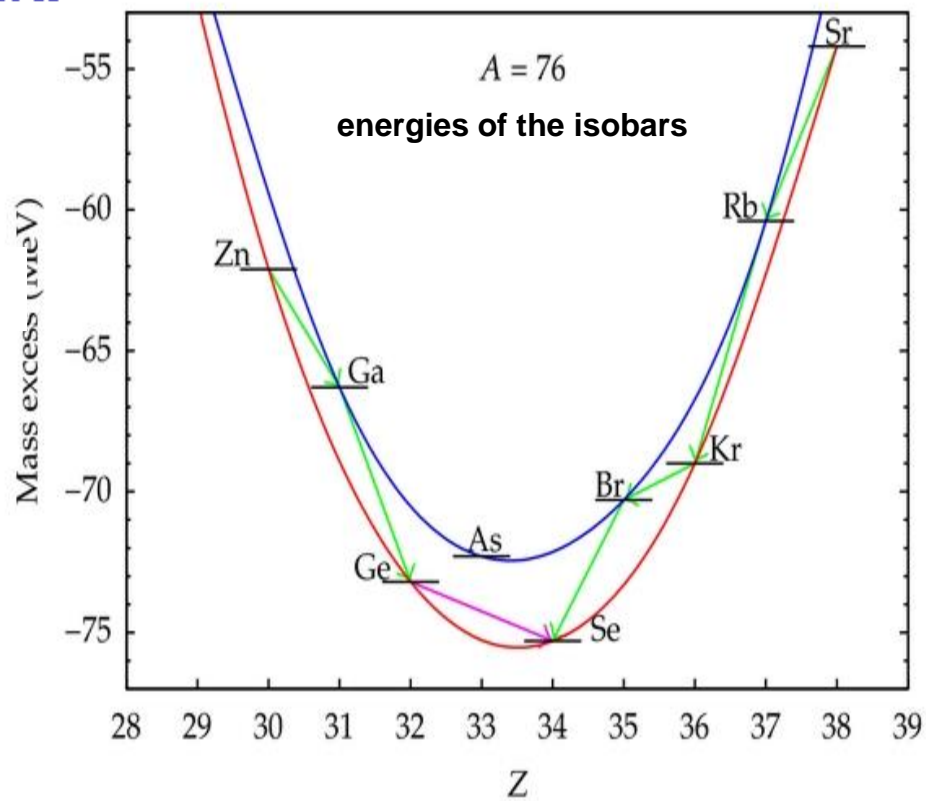
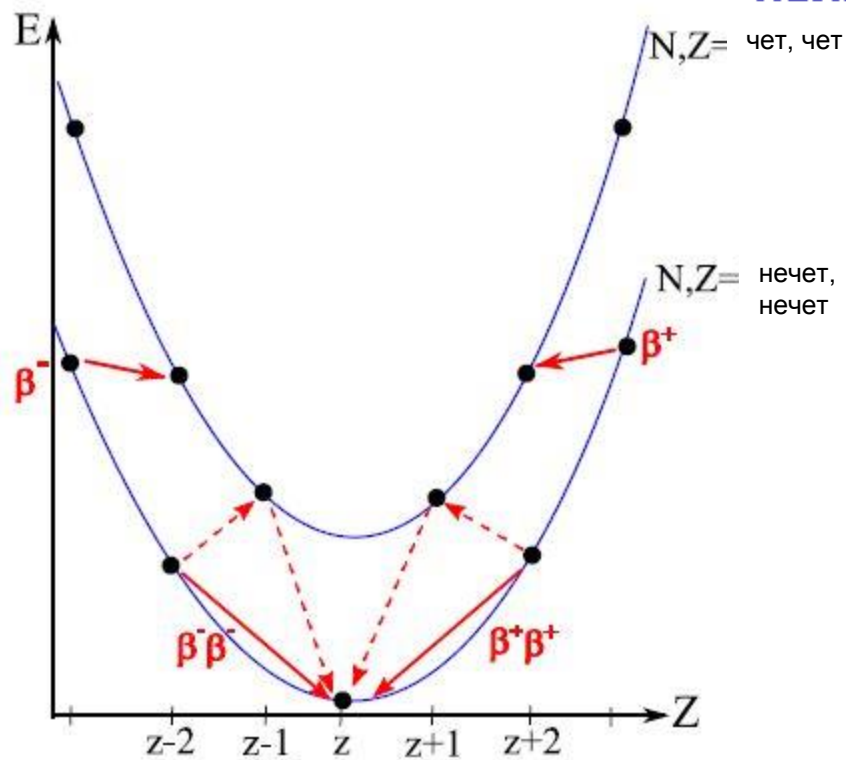
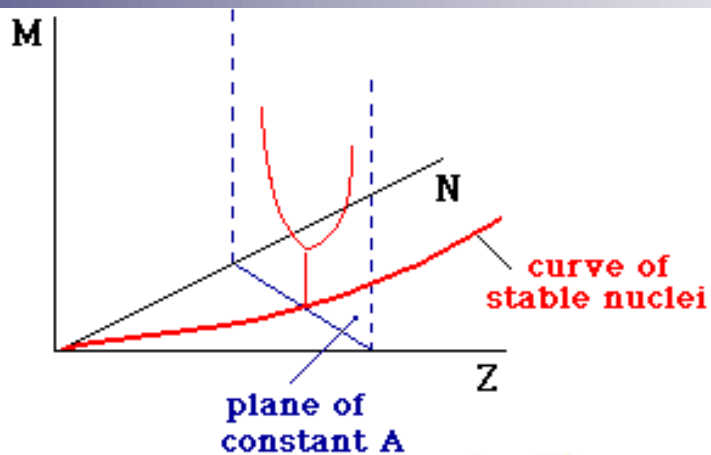
Maria Goeppert Mayer
(1906 – 1972)



Nuovo Cimento 14(1937)171



Ettore Majorana
(1906-1938)

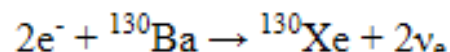


№	Переход	Изотопная распростран. %	Разность масс, кэВ	№	Переход	Изотопная распростран. %	Разность масс, кэВ
1	$^{46}\text{Ca} \rightarrow ^{46}\text{Ti}$	0,0033	985 \pm 5	17	$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	5,98	2278 \pm 8
2	$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	0,185	4271 \pm 5	18	$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	31,79	869 \pm 5
3	$^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{70}\text{Ge}$	0,62	1001 \pm 5	19	$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	34,49	2533 \pm 6
4	$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	7,67	2038 \pm 1	20	$^{134}\text{Xe} \rightarrow ^{134}\text{Ba}$	10,44	843 \pm 15
5	$^{80}\text{Se} \rightarrow ^{80}\text{Kr}$	49,82	135 \pm 15	21	$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	8,87	2481 \pm 10
6	$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	9,19	3005 \pm 15	22	$^{142}\text{Ce} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$	11,07	1414 \pm 11
7	$^{86}\text{Kr} \rightarrow ^{86}\text{Sr}$	17,37	1249 \pm 8	23	$^{148}\text{Nd} \rightarrow ^{148}\text{Sm}$	5,71	1928 \pm 10
8	$^{94}\text{Zr} \rightarrow ^{94}\text{Mo}$	2,80	1148 \pm 7	24	$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	5,60	3367 \pm 11
9	$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	17,40	3350 \pm 6	25	$^{154}\text{Sm} \rightarrow ^{154}\text{Gd}$	22,61	1250 \pm 10
10	$^{98}\text{Mo} \rightarrow ^{98}\text{Ru}$	23,75	110 \pm 8	26	$^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{160}\text{Dy}$	21,75	1731 \pm 11
11	$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	9,62	3032 \pm 9	27	$^{176}\text{Yb} \rightarrow ^{176}\text{Hf}$	12,23	1077 \pm 12
12	$^{104}\text{Ru} \rightarrow ^{104}\text{Pd}$	18,50	1301 \pm 9	28	$^{186}\text{W} \rightarrow ^{186}\text{Os}$	28,41	489 \pm 14
13	$^{100}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	12,70	2014 \pm 24	29	$^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{198}\text{Hg}$	7,23	1043 \pm 26
14	$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Sn}$	28,86	540 \pm 7	30	$^{204}\text{Hg} \rightarrow ^{204}\text{Pb}$	6,85	414 \pm 12
15	$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	7,58	2808 \pm 7	31	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{238}\text{Pu}$	99,275	1146 \pm 5
16	$^{122}\text{Sn} \rightarrow ^{122}\text{Te}$	4,71	358 \pm 8				

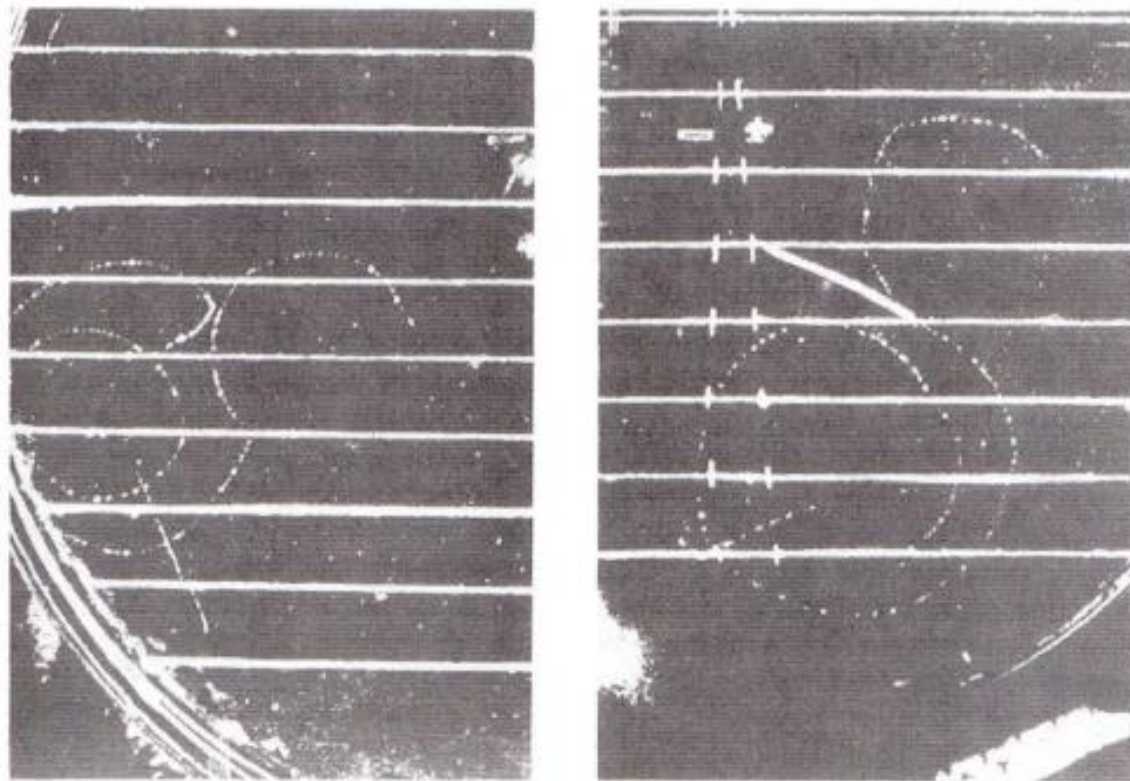
Изотопы, в которых экспериментально обнаружен $2\beta^{-2}\bar{\nu}_e$ -распад

Изотоп	Период полураспада, лет
$^{48}_{20}\text{Ca}$	$(4.4^{+0.6}_{-0.5}) \cdot 10^{19}$
$^{76}_{32}\text{Ge}$	$(1.5 \pm 0.1) \cdot 10^{21}$
$^{82}_{34}\text{Se}$	$(9.2 \pm 1.0) \cdot 10^{19}$
$^{96}_{40}\text{Zr}$	$(2.3 \pm 0.2) \cdot 10^{19}$
$^{100}_{42}\text{Mo}$	$(7.6 \pm 0.4) \cdot 10^{18}$
$^{116}_{48}\text{Cd}$	$(2.8 \pm 0.2) \cdot 10^{19}$
$^{128}_{52}\text{Te}$	$(1.9 \pm 0.4) \cdot 10^{24}$
$^{130}_{52}\text{Te}$	$(6.8^{+1.2}_{-1.1}) \cdot 10^{20}$
$^{150}_{60}\text{Nd}$	$(8.2 \pm 0.9) \cdot 10^{18}$
$^{238}_{92}\text{U}$	$(2.0 \pm 0.6) \cdot 10^{21}$

Двойной e -захват был обнаружен на изотопе ^{130}Ba .



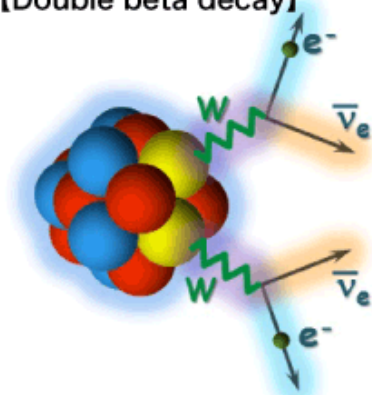
Изотоп	Период полураспада, лет
^{130}Ba	$(2.2 \pm 0.5) \cdot 10^{21}$



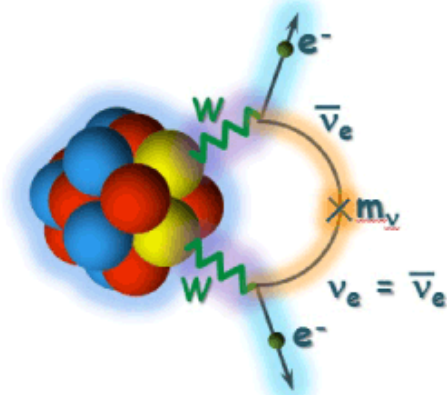
Фотография, сделанная с помощью камеры Вильсона в магнитном поле, перпендикулярном плоскости рисунка, возможного двойного бета распада ^{82}Se (слева) и сложного распада, включая эмиссию альфа-частицы (справа)

M. K. Moe and D. D. Lowenthal, *Phys. Rev. C* **22**, 2186 (1980)

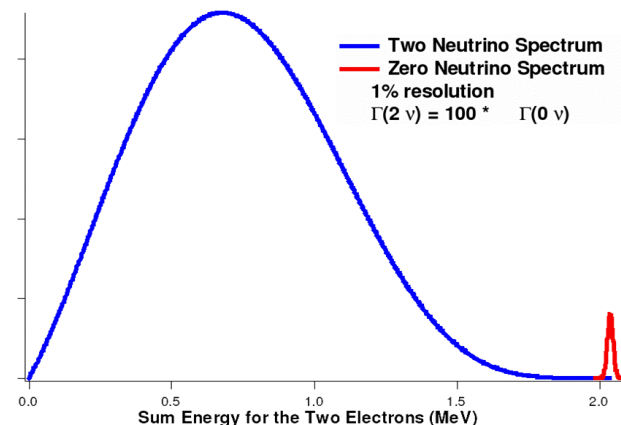
[Double beta decay]



Double beta decay which emits anti-neutrinos



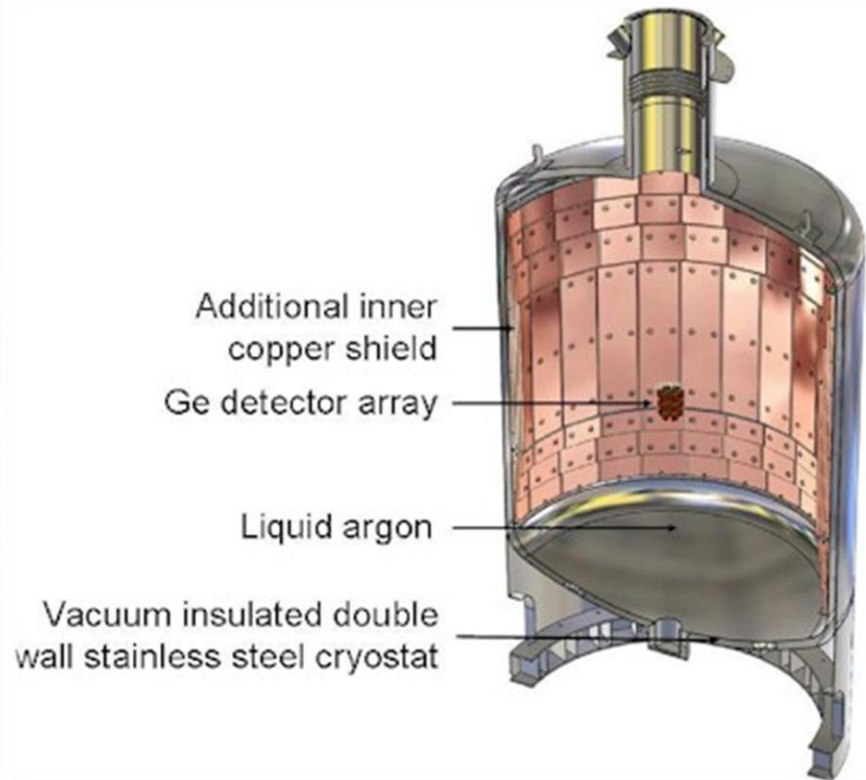
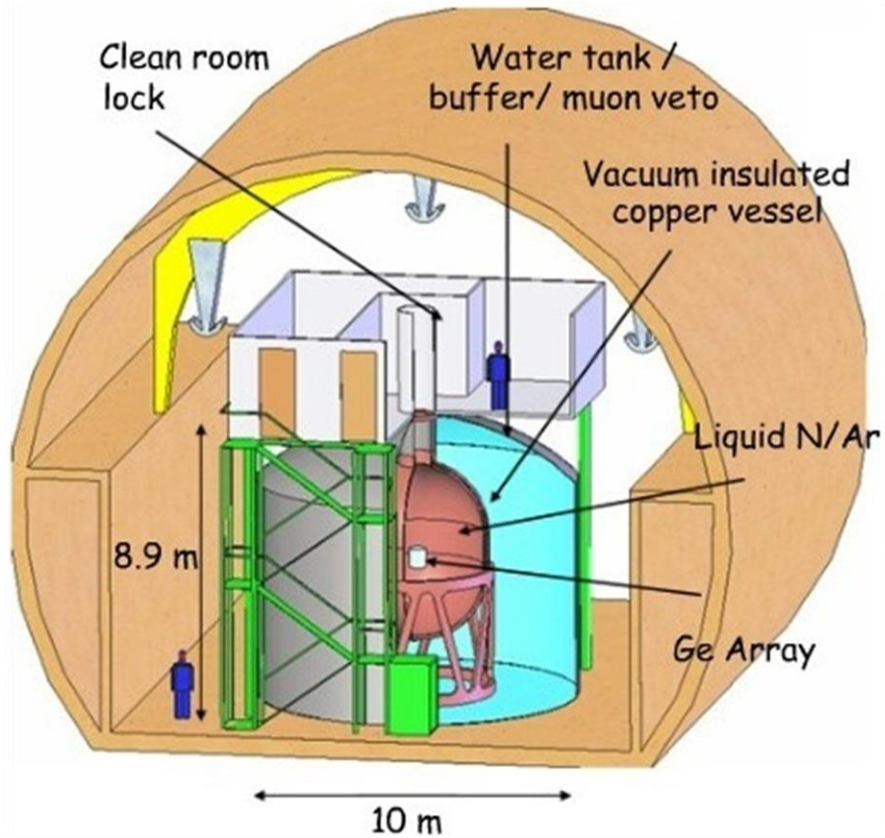
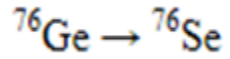
Neutrinoless double beta decay



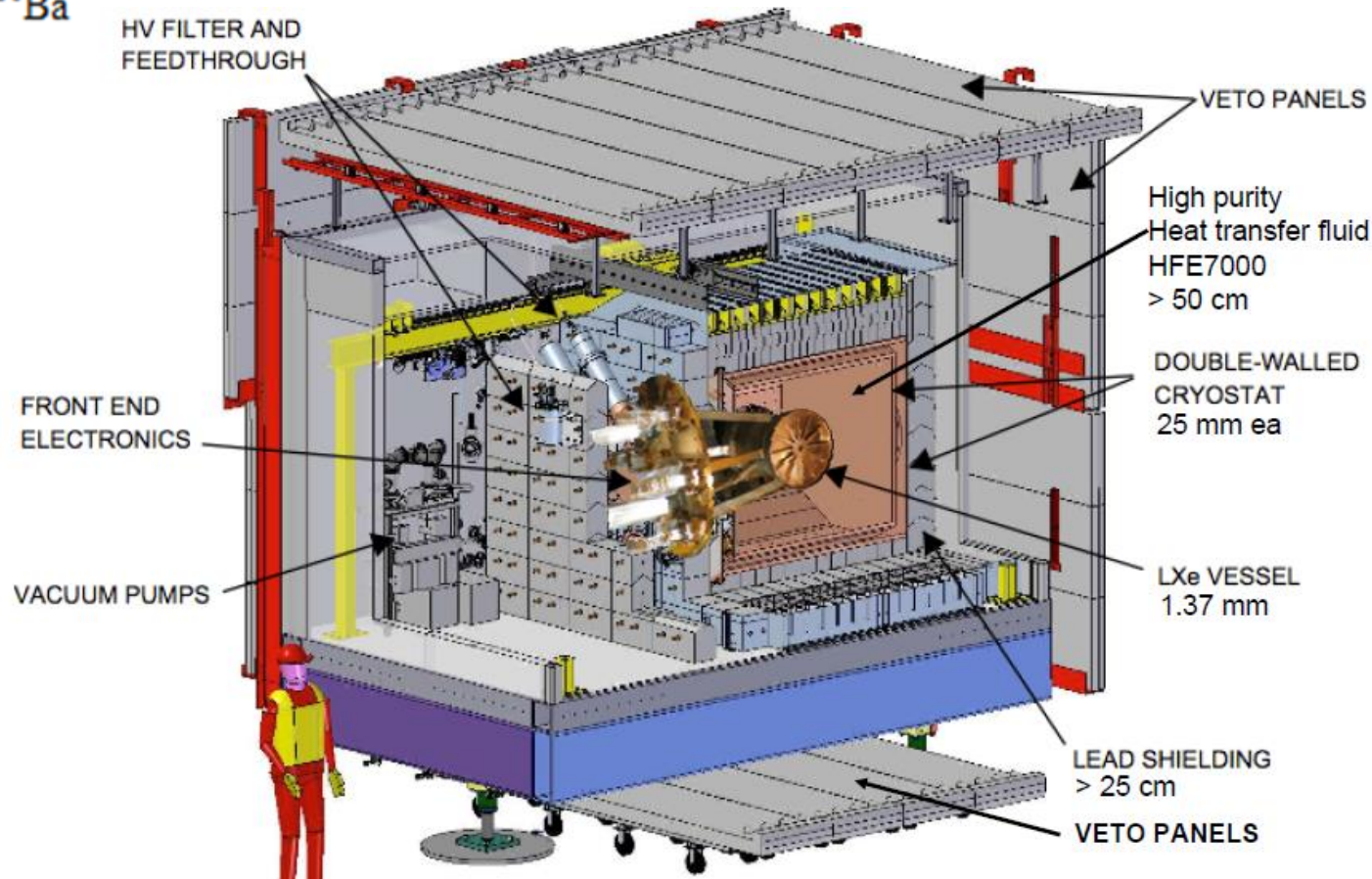
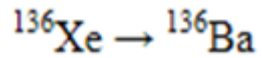
Периоды полураспада $T_{1/2}(2\beta 2\nu)$ и $T_{1/2}(2\beta 0\nu)$ некоторых изотопов

Распад	$T_{1/2}(2\beta 2\nu)$, лет	$T_{1/2}(2\beta 0\nu)$, лет
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$4.2 \cdot 10^{21}$	$> 1.9 \cdot 10^{25}$
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	$9.2 \cdot 10^{19}$	$> 2.7 \cdot 10^{23}$
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	$1.4 \cdot 10^{19}$	$> 3.9 \cdot 10^{19}$
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	$8.0 \cdot 10^{18}$	$> 5.8 \cdot 10^{23}$
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	$3.2 \cdot 10^{19}$	$> 1.7 \cdot 10^{23}$
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	$7.7 \cdot 10^{24}$	$> 7.7 \cdot 10^{24}$
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	$0.9 \cdot 10^{21}$	$> 3 \cdot 10^{24}$
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	$7 \cdot 10^{18}$	$> 3.6 \cdot 10^{21}$
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	$4.2 \cdot 10^{19}$	$> 1.7 \cdot 10^{22}$
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$		$> 4.6 \cdot 10^{23}$

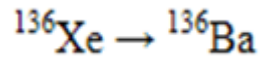
GERDA (с участием ОИЯИ, ИТЭФ и ИЯИ РАН)



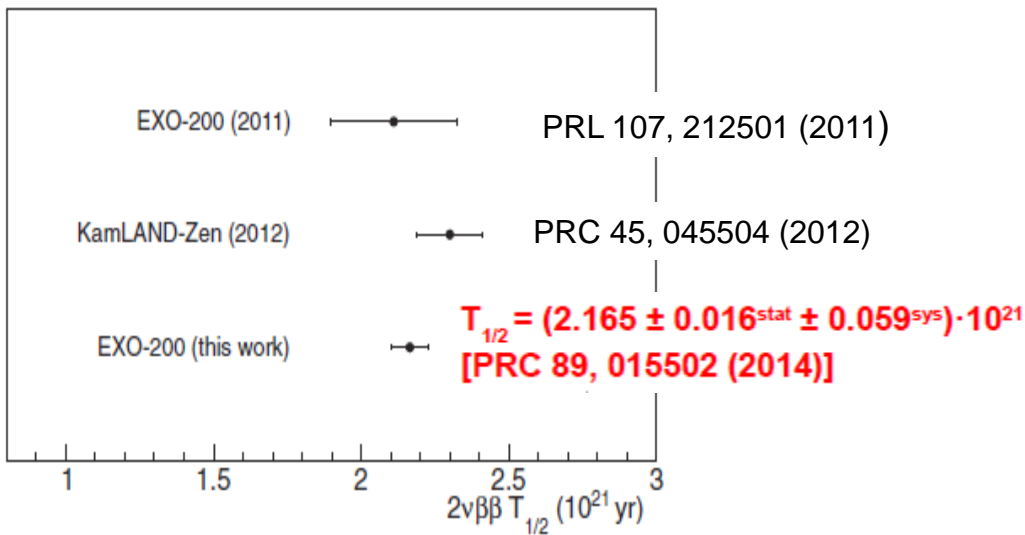
EXO-200



- ~200 kg of Xe enriched to 80.6%
 - ~175 kg in liquid phase inside a cylindrical Time Projection Chamber
 - ~100 kg current fiducial mass
- Located at 1585 m.w.e. in the Waste Isolation Plant near Carlsbad, NM

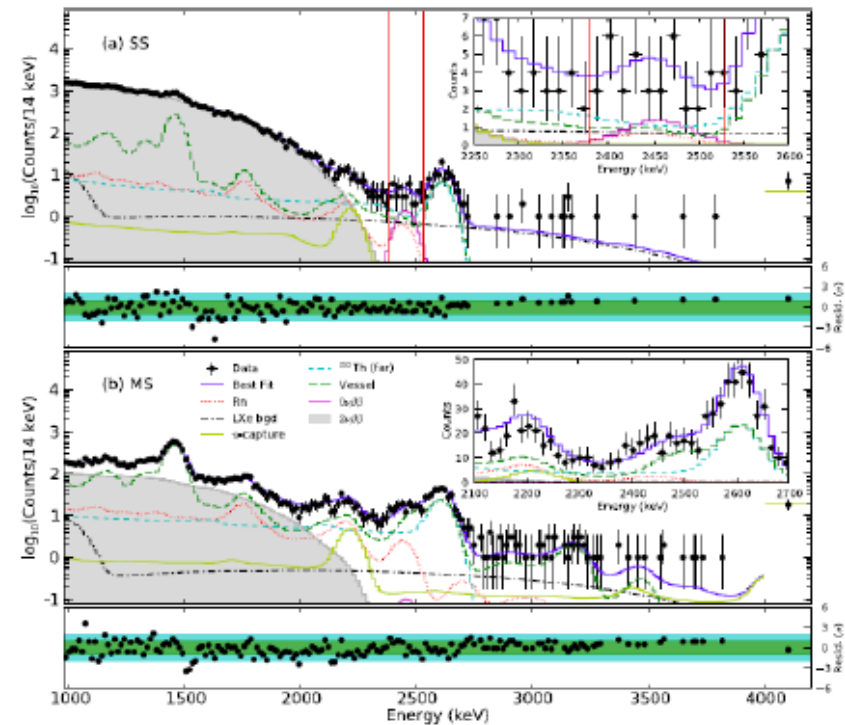


2-neutrino result



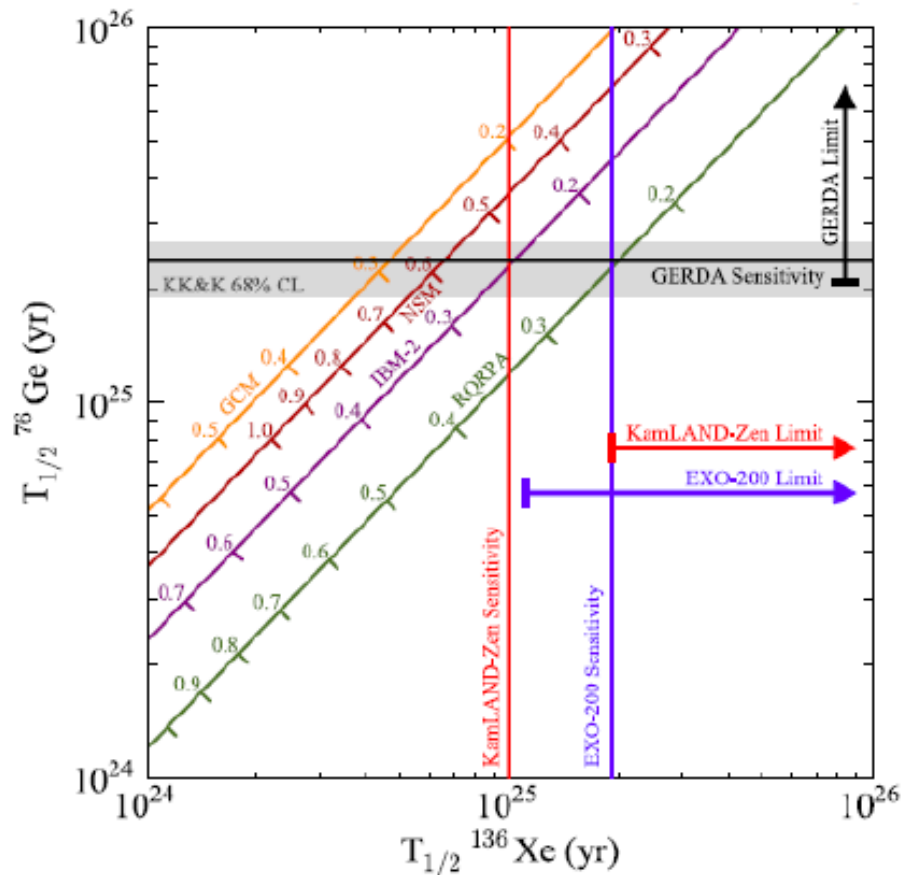
EXO-200 discovered the 2- ν mode in Xe-136 and provided the most accurate measurement of a 2- ν half-life among all isotopes

0-neutrino results: final fit



The reached sensitivity is $1.9e^{25}$ yrs

Context



EXO-200:
Nature 510 (2014) 229

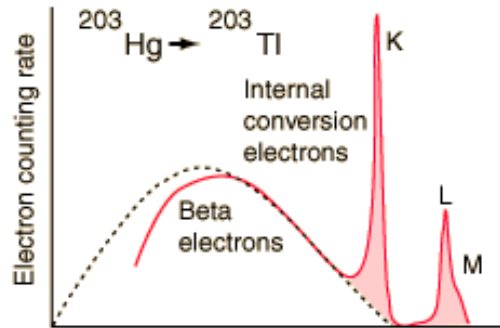
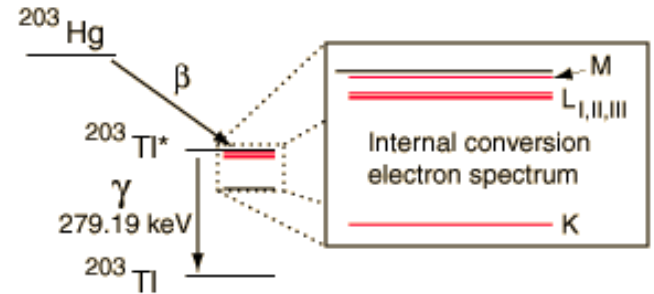
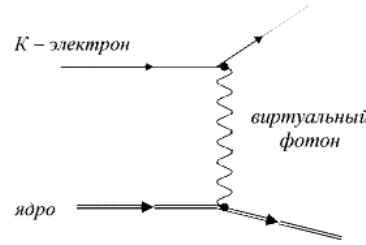
GERDA Phase 1:
 PRL 111 (2013) 122503

KamLAND-Zen:
 PRL 110 (2013) 062502

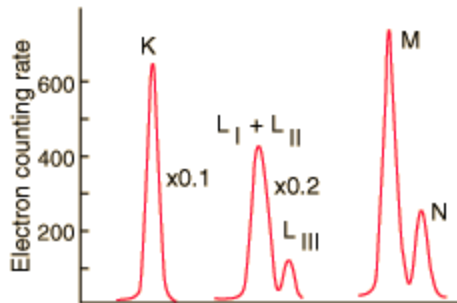
KK&K Claim:
 Mod. Phys. Lett., A21
 (2006) 1547

8. Внутренняя конверсия

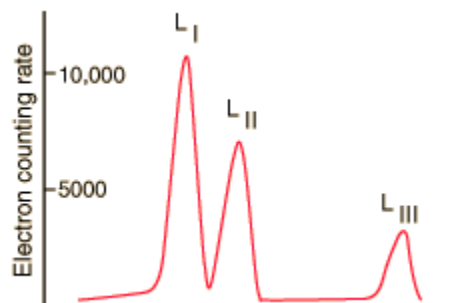
Внутренняя конверсия: атомное ядро, находящееся в возбуждённом состоянии с энергией E_i переходит в состояние с меньшей энергией E_f , передав энергию $W_{if} = E_i - E_f$ одному из электронов атомной оболочки, при этом испускается электрон, с энергией $E_e = W_{if} - E_{K,L,M}$



Электронная эмиссия из ядра ^{203}Hg при распаде в ^{203}Tl
A. H. Wapstra, et al., Physica 20, 169 (1954).



При более высоком энергетическом разрешении можно различить конверсию электронов из L, M и N оболочек
Z. Sujkowski, Ark. Fys. 20, 243 (1961).



При ещё более высоком разрешении можно разрешить три L подоболочки.

C. J. Herrlander and R. L. Graham, Nucl. Phys. 58, 544 (1964).

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

“ Большие открытия всегда связаны с тем, что «очевидное» подвергается сомнению”

*В. Вейспопф и Л. Родберг
УФН, т. 66, вып. 3, стр. 435 (1958)*

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, §18, стр.200-249
2. Б.С. Ишханов. Бета-распад.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract03.htm>
Двойной бета-распад.
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/ract04.htm>
3. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 9;
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .
4. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава VI, §4. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>