



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики

<http://enpl.mephi.ru/>

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №4

Радиоактивность

Лекция №4

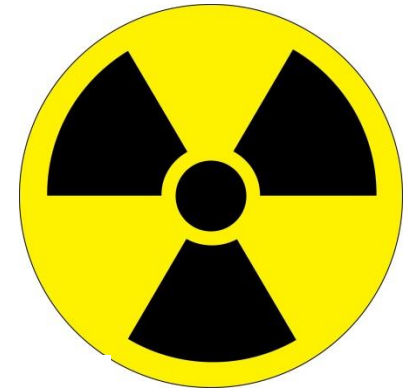
Радиоактивность

- 1. Радиоактивный распад ядер**
- 2. Закон радиоактивного распада**
- 3. Сложный радиоактивный распад**
- 4. Радиоизотопное датирование**
- 5. Радиоизотопные источники энергии**

1. Введение

Самопроизвольное (спонтанное) превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием одной или нескольких частиц, называется радиоактивностью.

Условились считать, что время радиоактивного распада ядер составляет не менее 10^{-12} с. За это время происходит большое число разнообразных внутриядерных процессов, полностью формирующих вновь образовавшееся ядро



Periodic Table of the Radioactive Elements

1A		2A		3B-10B										3A-7A					8A									
Atomic Number		Symbol		# of isotopes																								
1 H		3 Li	4 Be	11 Na	12 Mg	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	53 I	54 Xe	86 Rn	118 Uuo	
87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo											
Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu												
Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr												

В 1896 г. А. Беккерель неожиданно обнаружил неизвестное ранее высокопроникающее излучение, которое испускали соли урана.

Тогда считалось, что это излучение связано с атомными процессами. С открытием атомных ядер стало ясно, что это внутриядерный процесс, получивший название **радиоактивности**.

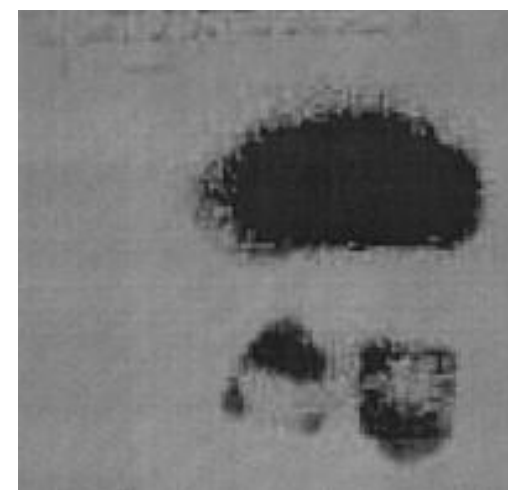


Антуан Беккерель
(1852-1908)

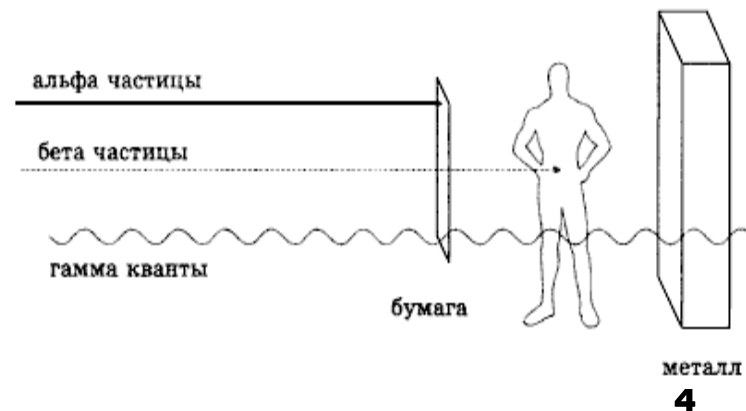
«Я особенно настаиваю на следующем факте, кажущемся мне весьма многозначительным... Те же кристаллы, содержащиеся в темноте, в условиях когда возникновение радиации под действием солнечного света исключается, дают, тем не менее, фотографические отпечатки»

Исследуя излучение урановой соли, Э. Резерфорд (1898 г.) показал, что оно состоит из двух компонент.

- 1) Сильно поглощаемое тонкими фольгами излучение, названное α -излучением (позже было установлено, что оно состоит из ядер атомов ${}^4\text{He}$).
- 2) Более слабо поглощаемое излучение, названное β -излучением. Было установлено, что частицы этого излучения имеют массу электрона.
Известны 3 типа β -распада ядер: β^+ -распад, β^- -распад, e^- -захват.



Через два года (1900 г.) П. Виллард обнаружил ещё одну нейтральную компоненту излучения урановой соли, названную γ -излучением.



Вслед за открытием радиоактивного урана U ($Z = 92$) была обнаружена радиоактивность тория Th ($Z = 90$).
В 1898 г. супруги М. и П. Кюри открыли два новых радиоактивных элемента – полоний Po ($Z = 84$) и радий Ra ($Z = 88$).

В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди выяснили, что испускание α -лучей сопровождается превращением химических элементов: химический элемент радий Ra превращался в химический элемент радон Rn , уран U превращался в торий Th .

В результате цикла экспериментальных исследований было показано, что в состав атомных ядер входят протоны (1919 г., Э. Резерфорд) и нейтроны (1932 г., Д. Чадвик), и в 1932 г. Д. Иваненко, В. Гейзенбергом и Э. Майорана была предложена протон-нейтронная модель атомного ядра.

В 1934 г. супругами И. и Ф. Жолио-Кюри была открыта искусственная (наведённая) радиоактивность.

В 1938 г. О. Ганн и Ф. Штрассман обнаружили распад ядер урана на тяжелые осколки под действием нейтронов.

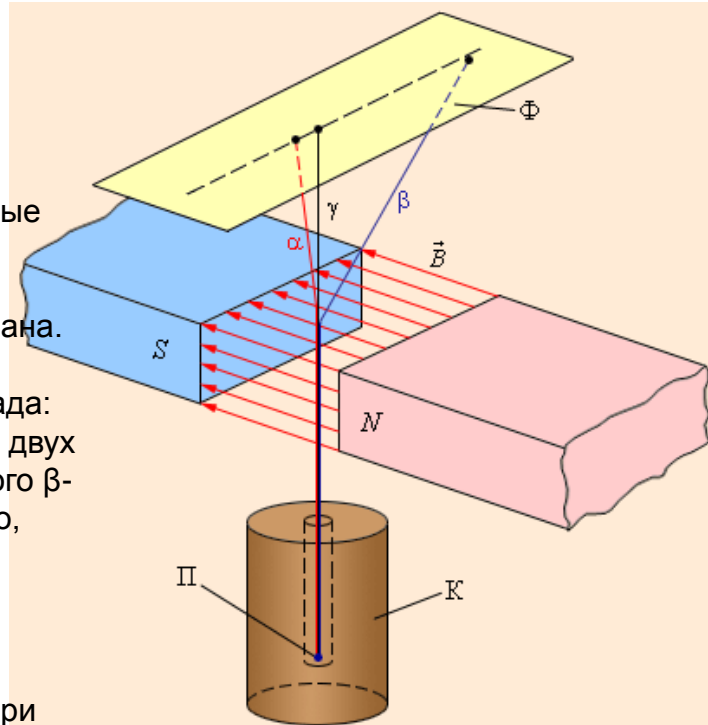
В 1940 г. Г. Н. Флеров и К.А. Петржак открыли спонтанное деление ядер урана.


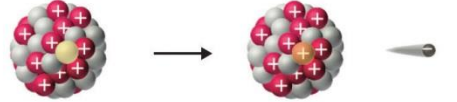
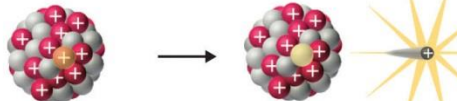

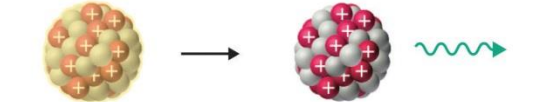
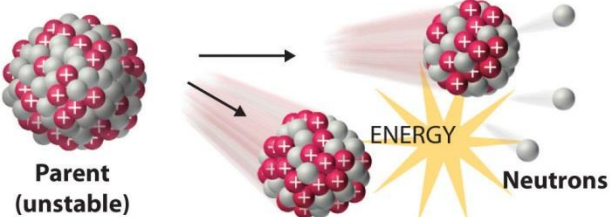
В 1950 г. М. Инграм и Дж. Рейнолдс обнаружили явление двойного β -распада: изотоп ^{130}Te превращался в изотоп ^{130}Xe с одновременным испусканием двух электронов и двух антинейтрино. С тех пор исследование явления двойного β -распада стало одним из эффективных методов изучения свойств нейтрино, проверки Стандартной Модели.

В 1981 г. была открыта протонная радиоактивность (С. Хофман)

В 1984 г. Г. Роуз, Г. Джонс и независимо Д. Александров обнаружили, что при распаде ^{223}Ra происходит испускание не только α -частиц, но и более тяжелых фрагментов. Так была открыта кластерная радиоактивность. С тех пор кластерный распад обнаружен более чем на 10 ядрах от Fr до Sm .

В 2002 г. J.Giovinazzo, B. Blnk et al и независимо M.Pfutzner, E.Badura et al открыли двухпротонную радиоактивность.



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	${}^{A+B+C}_{Z+Y}X \longrightarrow {}^A_ZX' + {}^B_YX' + C{}_0^1n$	 <p>Parent (unstable) → Daughters + Neutrons + ENERGY</p>

В настоящее время известно ~3500 атомных ядер, представляющих собой различные сочетания чисел протонов Z и нейтронов N .

По существующим оценкам число атомных ядер может составлять ~7000.

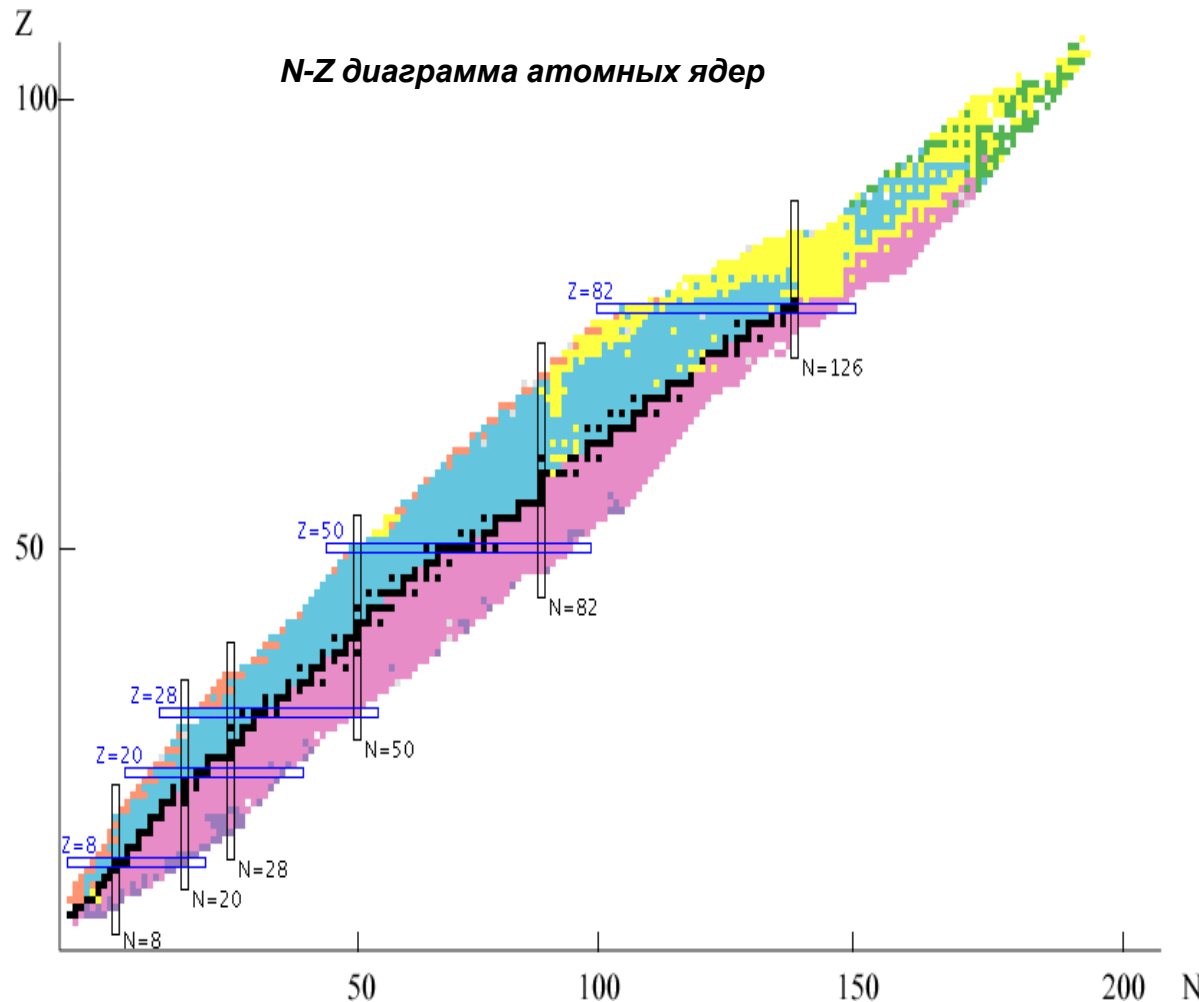
Из общего числа ~3500 известных атомных ядер стабильными являются ~350 ядер.

У 45 изотопов период полураспада сопоставим или больше возраста Вселенной ($13.7 \cdot 10^9$ лет).

Изотопы – атомные ядра, имеющие одинаковое число протонов ($Z = const$) и разное число нейтронов.

Изотоны – атомные ядра, имеющие одинаковое число нейтронов ($N = const$) и разное число протонов.

Изобары – атомные ядра, имеющие одинаковое массовое число A ($A = Z + N$) и разные числа нейтронов и протонов.



Порядковый номер, Z	Символ химического элемента	Название химического элемента	Минимальное – максимальное массовое число изотопа химического элемента
0	n	нейтрон	1
1	H	водород	1–7
2	He	гелий	3–10
3	Li	литий	3–12
4	Be	бериллий	5–16
5	B	бор	6–19
6	C	углерод	8–22
7	N	азот	10–25
8	O	кислород	12–28
9	F	фтор	14–31
10	Ne	неон	16–34
11	Na	натрий	18–37
12	Mg	магний	19–40
13	Al	алюминий	21–43
14	Si	кремний	22–44

...

Порядковый номер, Z	Символ химического элемента	Название химического элемента	Минимальное – максимальное массовое число изотопа химического элемента
...			
74	W	вольфрам	158–192
75	Re	рений	159–194
76	Os	осмий	162–200
77	Ir	иридий	164–202
78	Pt	платина	166–203
79	Au	золото	169–205
80	Hg	ртуть	171–210
81	Tl	таллий	176–212
82	Pb	свинец	178–215
83	Bi	висмут	184–218
84	Po	полоний	188–220
85	At	астат	191–223
86	Rn	радон	193–228
87	Fr	франций	199–232
88	Ra	радий	201–234
89	Ac	актиний	206–236
90	Th	торий	208–238
91	Pa	протактиний	212–240
92	U	уран	217–242
93	Np	нептуний	225–244
94	Pu	плутоний	228–247
95	Am	америций	230–249

...

2. Законы радиоактивного распада

Необходимое условие: $M_i > \sum M_f$ Энерговыделение реакции: $Q = (M_i - \sum M_f)c^2$

Постоянная распада λ - вероятность распада ядра в единицу времени.

Если в образце в момент времени t имеется N радиоактивных ядер, то количество ядер dN , распавшихся за время dt пропорционально N .

$$dN = -\lambda N dt.$$

Проинтегрировав (1) получим закон радиоактивного распада

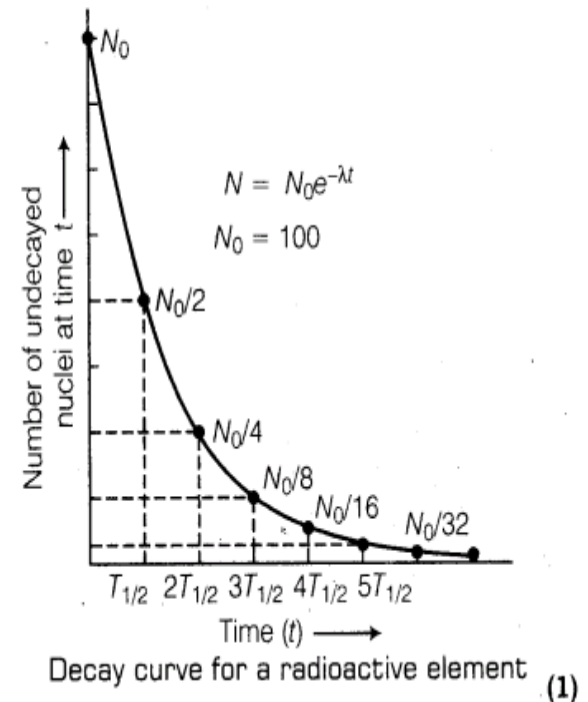
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

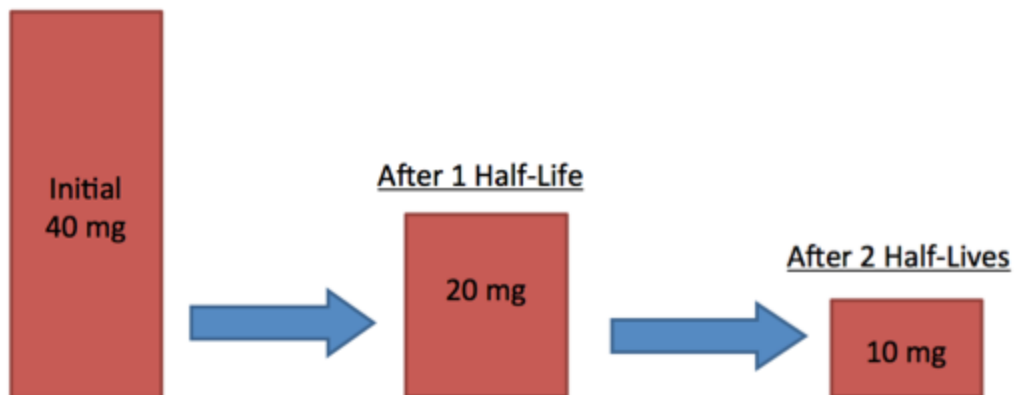
N_0 - количество радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$.

Среднее время жизни τ -

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t |dN/dt| dt}{\int_0^{\infty} |dN/dt| dt} = \frac{1}{\lambda}.$$

The curve representing the law of radioactive decay is shown as below:





Период полураспада $T_{1/2}$ - время, за которое первоначальное количество радиоактивных ядер уменьшится в два раза

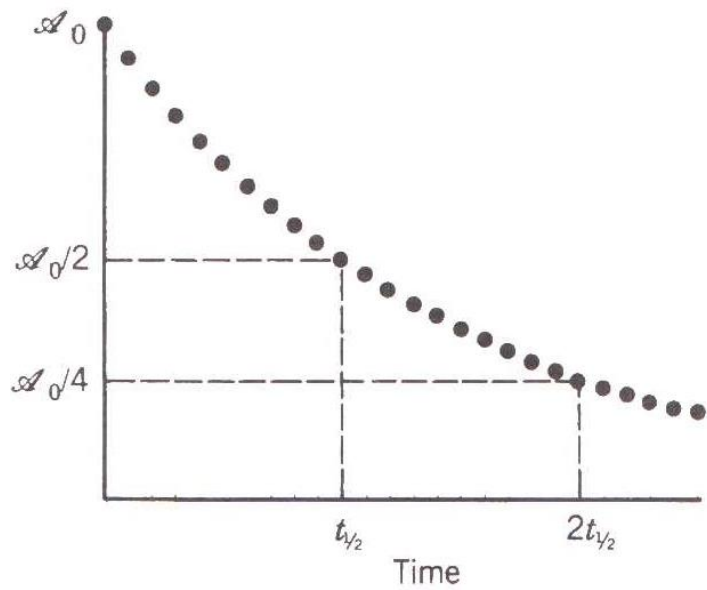
$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda = \tau \ln 2. \quad (4)$$

Активность A - среднее количество ядер распадающихся в единицу времени

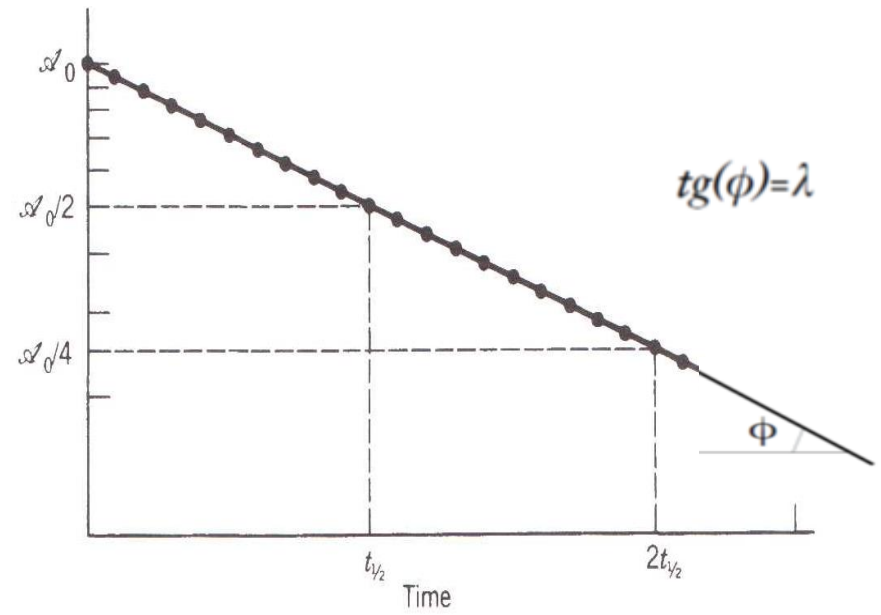
$$A(t) = \lambda N(t). \quad (5)$$

Активность измеряется в кюри (Ки) и беккерелях (Бк)

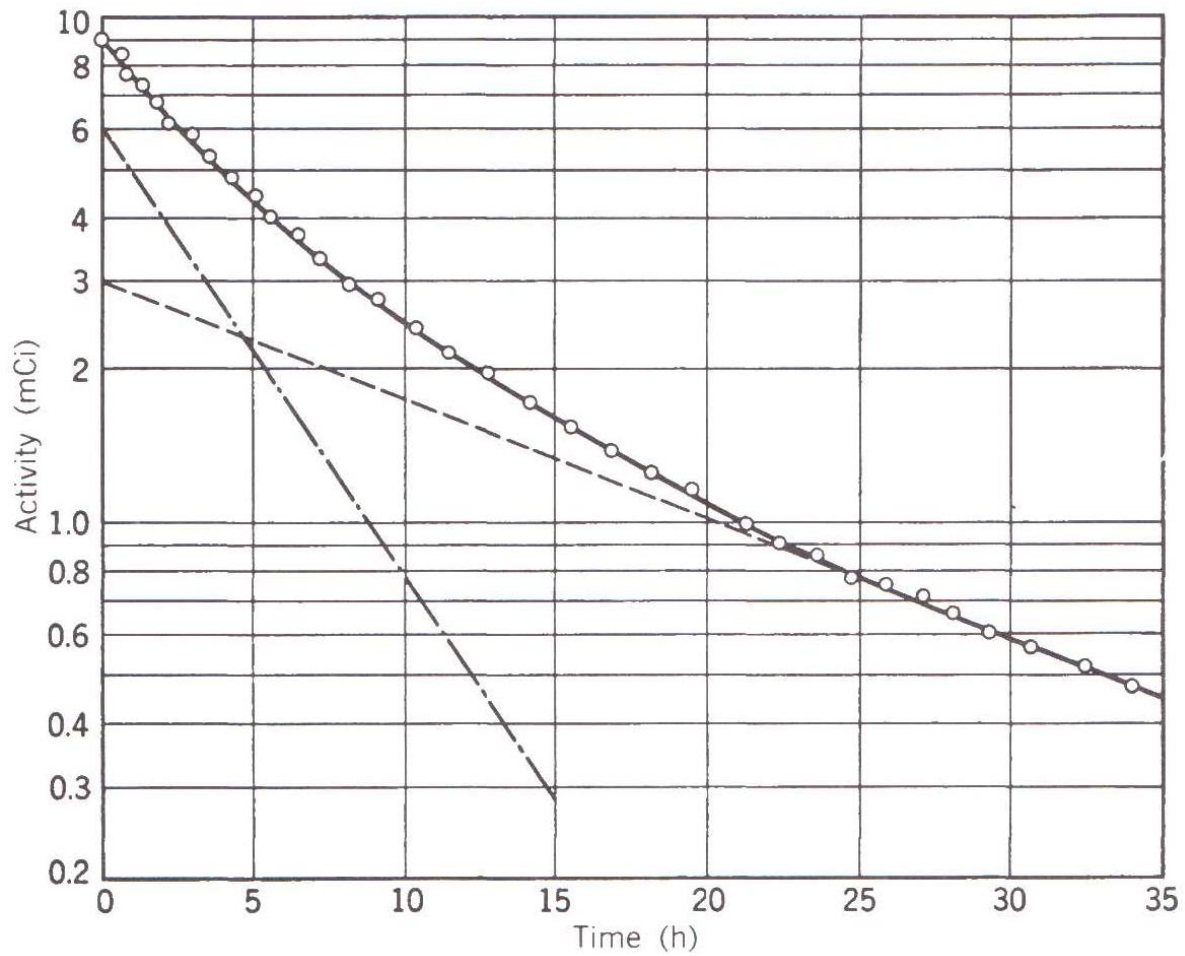
$$1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ распадов/с,}$$
$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с.}$$



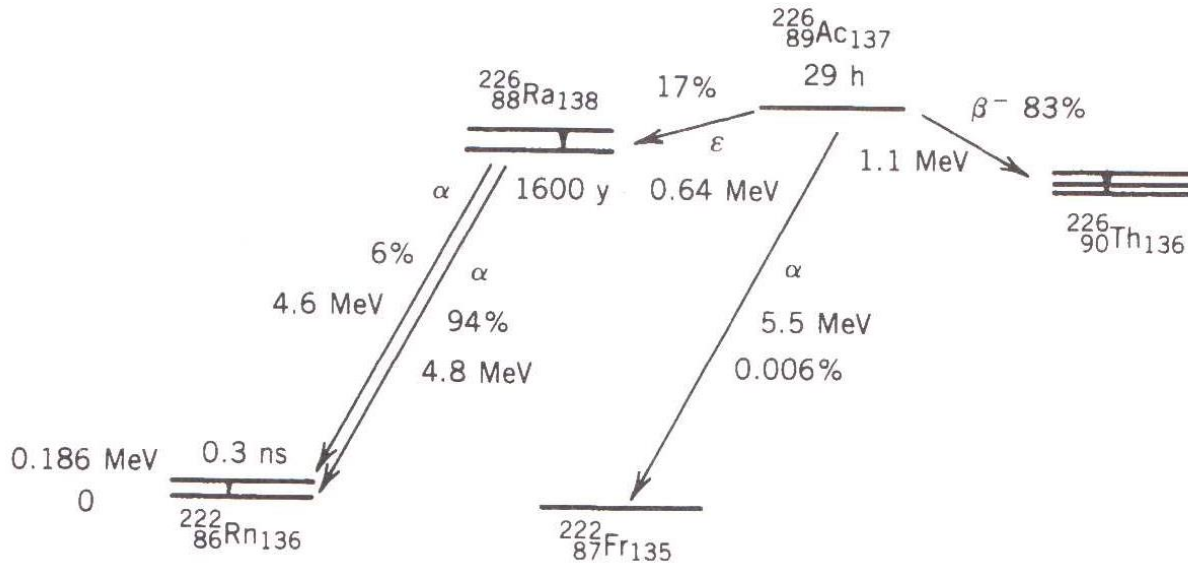
$\ln A$



Decay curve for a sample containing a mixture of ^{64}Cu (12.7 h) and ^{61}Cu (3.4 h)



Разветвлённый распад



Коэффициенты ветвления (branching ratio):

- α emission (0.006%)
- β^- emission (83%)
- ϵ (17%)

Константы распада:

Полная

$$\lambda_t = \frac{0.693}{t_{1/2}} = 0.024 \text{ h}^{-1} = 6.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Парциальные

$$\lambda_\beta = 0.83\lambda_t = 5.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_\epsilon = 0.17\lambda_t = 1.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_\alpha = 6 \times 10^{-5}\lambda_t = 4 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

Периоды полураспада:

Полный

$$t_{1/2} = 29 \text{ h}$$

← Единственно наблюдаемый для активности изотопа

²²⁶Ac

Парциальные

$$t_{1/2, \beta} = \frac{0.693}{\lambda_\beta} = 1.3 \times 10^5 \text{ s} = 35 \text{ h}$$

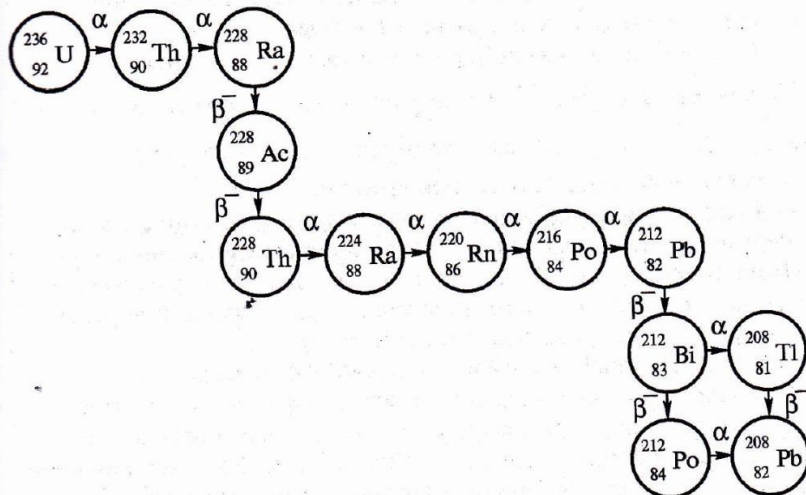
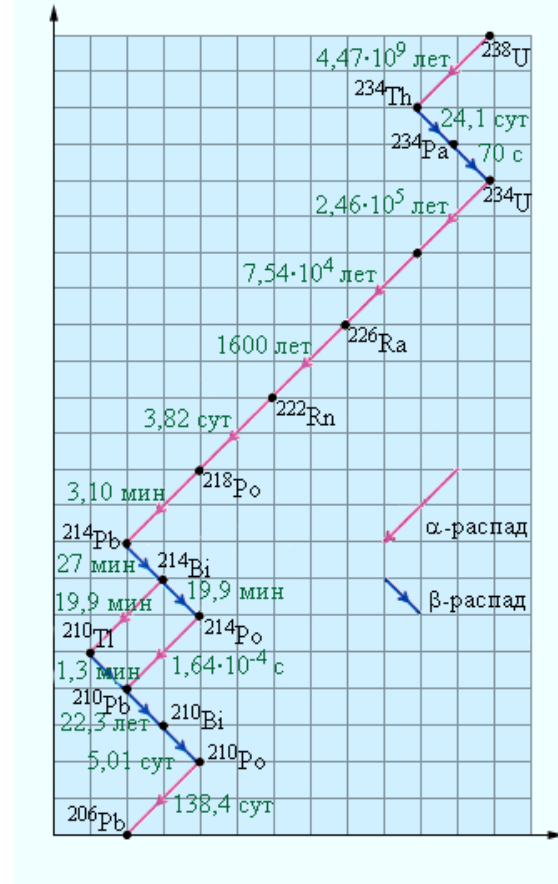
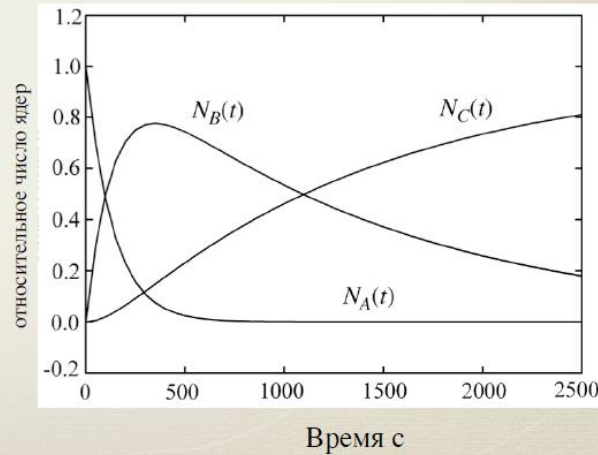
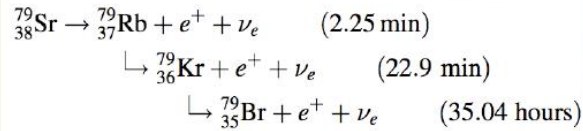
$$t_{1/2, \epsilon} = \frac{0.693}{\lambda_\epsilon} = 6.1 \times 10^5 \text{ s} = 170 \text{ h}$$

$$t_{1/2, \alpha} = \frac{0.693}{\lambda_\alpha} = 1.7 \times 10^9 \text{ s} = 55 \text{ y}$$

3. Сложный радиоактивный распад

* Часто продукты распада радиоактивных ядер тоже являются радиоактивными. Это приводит к цепочкам распада.

* На рисунке показана зависимость числа ядер от времени, для последовательного распада трех ядер А-⁷⁹Sr, В-⁷⁹Rb и С-⁷⁹Kr.



Распад исходного ядра 1 в ядро 2, с последующим его распадом в ядро 3, описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= -\lambda_1 N_1 \\ dN_2/dt &= -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1, \end{aligned}$$

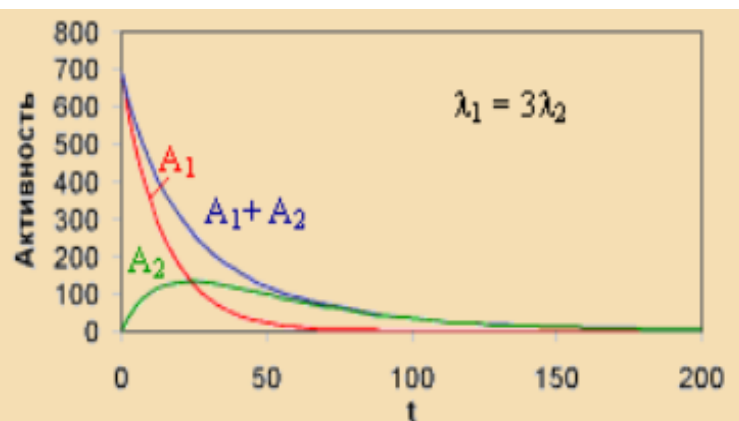
где $N_1(t)$ и $N_2(t)$ - количество ядер, а λ_1 и λ_2 - постоянные распада ядер 1 и 2 соответственно.

Решением системы с начальными условиями $N_1(0) = N_{10}$; $N_2(0) = 0$ будет

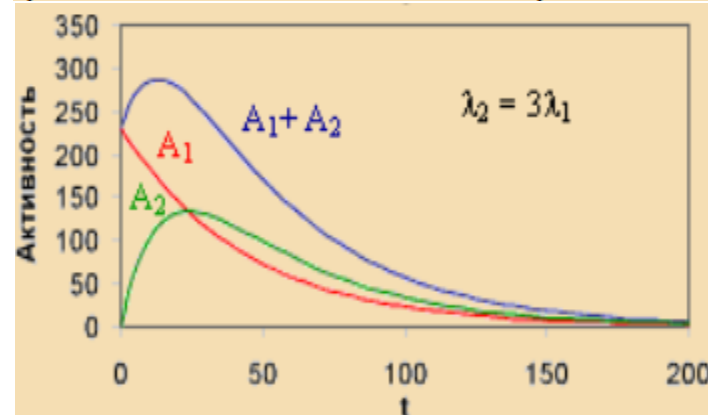
$$\begin{aligned} N_1(t) &= N_{10} e^{-\lambda_1 t}, \\ N_2(t) &= \frac{N_{10} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{aligned}$$

Количество ядер 2 достигает максимального значения $N_2^{\max} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} e^{-\lambda_1 t^{\max}}$ при $t^{\max} = \frac{\ln(\lambda_1 / \lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2}$.

Если $\lambda_2 < \lambda_1$ ($T_{1/2}^{(2)} > T_{1/2}^{(1)}$), суммарная активность $N_1(t)\lambda_1 + N_2(t)\lambda_2$ будет монотонно уменьшаться.



Если $\lambda_2 > \lambda_1$ ($T_{1/2}^{(2)} < T_{1/2}^{(1)}$), суммарная активность вначале растет за счет накопления ядер 2.



Если $\lambda_2 \gg \lambda_1$, при достаточно больших временах вклад второй экспоненты становится пренебрежимо мал, по сравнению со вкладом первой и активности второго $A_2 = \lambda_2 N_2$ и первого изотопов $A_1 = \lambda_1 N_1$ практически сравниваются. В дальнейшем активности как первого так и второго изотопов будут изменяться во времени одинаково.

$$A_1(t) = N_{10}\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = N_1(t)\lambda_1 = A_2(t) = N_2(t)\lambda_2.$$

То есть устанавливается так называемое **вековое равновесие**, при котором число ядер изотопов в цепочке распадов связано с постоянными распада (периодами полураспада) простым соотношением.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{T_{1/2}^{(1)}}{T_{1/2}^{(2)}}.$$

Поэтому в естественном состоянии все изотопы, генетически связанные в радиоактивных рядах, обычно находятся в определенных количественных соотношениях, зависящих от их периодов полураспада.

В общем случае, когда имеется цепочка распадов $1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow n$, процесс описывается системой дифференциальных уравнений

$$dN_i/dt = -\lambda_i N_i + \lambda_{i-1} N_{i-1}. \quad (10)$$

Решением системы (10) для активностей с начальными условиями $N_1(0) = N_{10}$; $N_i(0) = 0$ будет

$$A_n(t) = N_{10} \sum_{i=1}^n c_i e^{-\lambda_i t}, \quad (11)$$

где

$$c_m = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_m)}. \quad (12)$$

Штрих означает, что в произведении, которое находится в знаменателе, опускается множитель с $i = m$.

4. Радиоизотопное датирование

Количество любого радиоактивного изотопа уменьшается со временем по экспоненциальному закону

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t} = 2^{-t/T_{1/2}}$$

где:

N_0 — количество атомов в начальный момент,

$N(t)$ — количество атомов по прошествии времени t ,

λ — постоянная распада.

Исходя из того, какая часть радиоизотопа распалась за некоторое время, можно рассчитать время

$$t = -T_{1/2} \log_2 \frac{N(t)}{N_0}$$

Период полураспада не зависит от температуры, давления, химического окружения, интенсивности электромагнитных полей. Единственное известное исключение относится к тем изотопам, которые распадаются путём электронного захвата: у них есть зависимость скорости распада от электронной плотности в районе ядра.

Принципиальная схема определения возраста образца состоит в следующем. Измеряется отношение содержания в исследуемом образце двух изотопов, один из которых является радиоактивным, а другой радиогенным продуктом распада и сравнивается с аналогичным отношением, которое предполагается известным в момент образования образца.

Главные источники трудностей для радиоизотопного датирования — это обмен веществом между исследуемым объектом и окружающей средой, который мог происходить после образования объекта, и неопределённость начального изотопного и элементного состава.

В качестве радиоактивных изотопов в ядерной хронологии выбираются

- долгоживущие изотопы радиоактивных семейств,
- долгоживущие радиоактивные изотопы, образующиеся при взаимодействии космических лучей с ядрами атмосферы Земли,
- долгоживущие радиоактивные изотопы, образовавшиеся во время формирования Солнечной системы.

Изотопы, используемые в ядерной хронологии

Исходный изотоп	Период полураспада, лет	Распространенность, %	Ядро-продукт
^{14}C	5700		^{14}N
^{40}K	$1.238 \cdot 10^9$	0.0117	^{40}Ar
^{87}Rb	$4.81 \cdot 10^{10}$	27.84	^{87}Sr
^{129}I	$1.57 \cdot 10^7$		^{129}Xe
^{232}Th	$1.40 \cdot 10^{10}$	100	^{208}Pb
^{235}U	$7.04 \cdot 10^8$	0.7204	^{207}Pb
^{238}U	$4.468 \cdot 10^9$	99.2742	^{206}Pb

Так в момент образования Солнечной системы отношения изотопов урана и тория составляли

$$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.3, \quad ^{232}\text{Th}/^{235}\text{Th} = 35.$$

В настоящее время эти отношения равны

$$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 7.3 \cdot 10^{-3}, \quad ^{232}\text{Th}/^{235}\text{Th} = 4,$$

что позволяет оценить возраст Солнечной системы $t = 4.5 \cdot 10^9$ лет.

В геохронологии используется несколько методов.

1. Уран, торий-свинцовый метод.
2. Свинцовый метод.
3. Калий-аргоновый метод.
4. Рубидий-стронциевый метод.

Уран-свинцовый метод — один из самых старых и хорошо разработанных способов радиоизотопного датирования и, при хорошем исполнении, самый надёжный метод для образцов с возрастом порядка сотен миллионов лет.

При таком возрасте достижима точность порядка 0,1 %

Для определения возраста биологических останков, предметов и материалов биологического происхождения используется радиоуглеродный анализ содержания в материале радиоактивного ^{14}C по отношению к стабильным изотопам углерода.

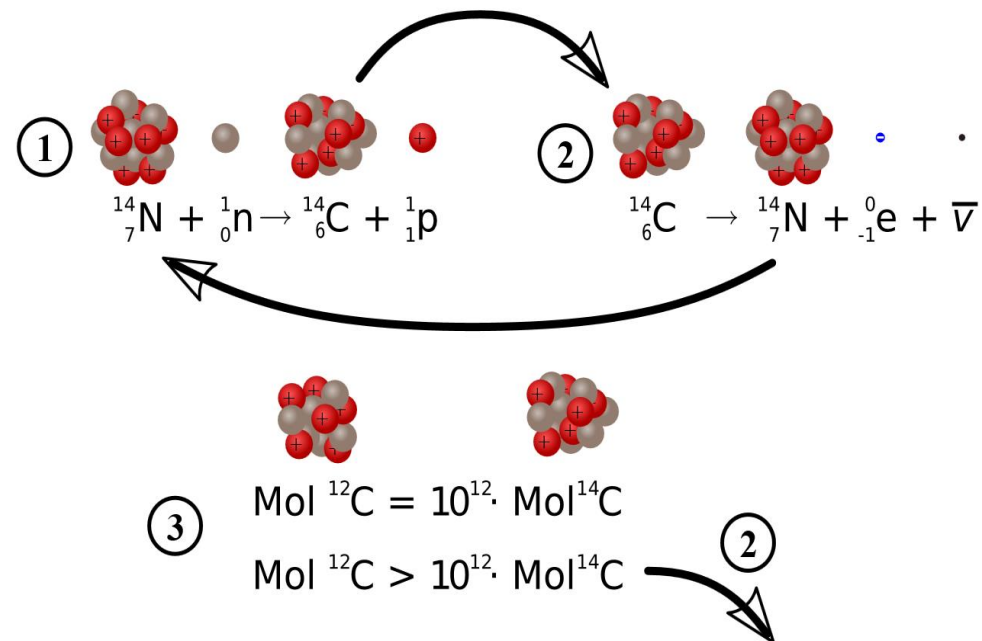
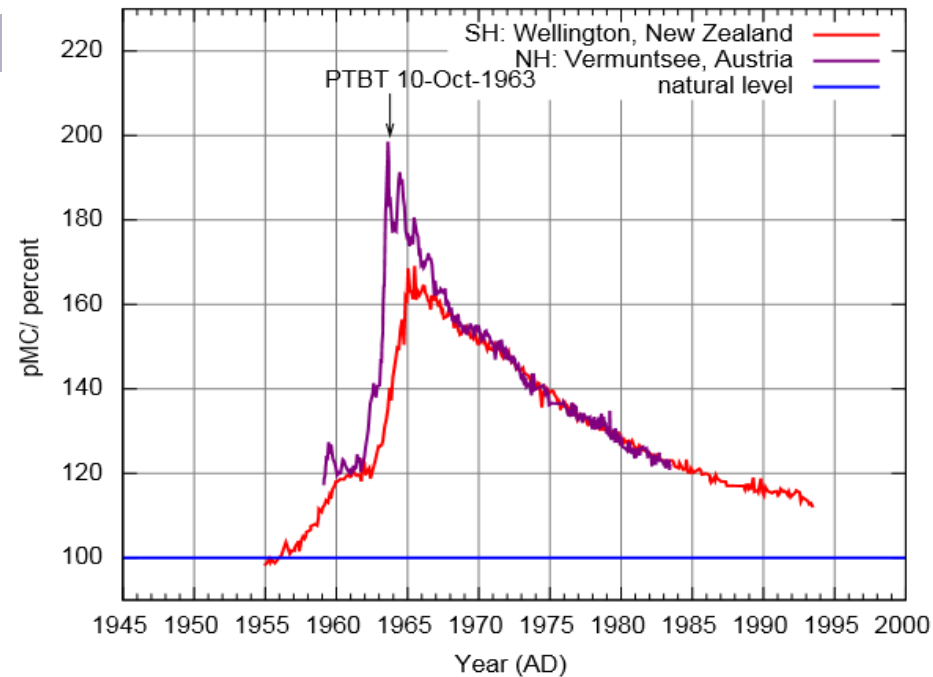
Предложен Уиллардом Либби в 1946 году (Нобелевская премия по химии, 1960).

Изотоп ^{14}C постоянно образуется в основном в верхних слоях атмосферы на высоте 12-15 км при столкновении вторичных нейтронов от космических лучей с ядрами атмосферного азота. В среднем – 7.5 кг в год при общем количестве содержания в атмосфере 75 тонн

Радиоизотоп углерода ^{14}C подвержен β -распаду с периодом полураспада $T_{1/2} = 5730 \pm 40$ лет:

Удельная активность изотопа в живом организме ^{14}C составляет 0.23 Бк на 1 г углерода. При гибели поступление углерода ^{14}C в организм прекращается и удельная активность углерода ^{14}C начинает падать с периодом полураспада $T_{1/2} = 5700$ лет. Зная начальную активность образца и измеренную активность на данный момент можно определить время гибели живого организма.

В 2015 году учёные из Имперского колледжа Лондона подсчитали, что промышленное использование углеводородов скоро сведёт на нет радиоуглеродный метод



5. Радиоизотопные источники энергии

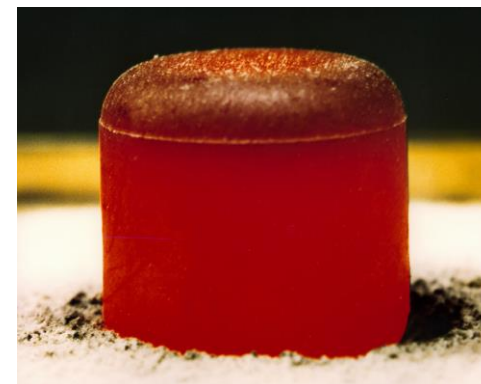
Устройства, использующие энергию, выделяющуюся при радиоактивном распаде, для нагрева теплоносителя или преобразующие её в электроэнергию.

Распад используемых изотопов уступает лишь делению ядер и превосходит химические источники (аккумуляторы, топливные элементы и др.) в десятки и сотни тысяч раз по массовой и объёмной энергоёмкости.

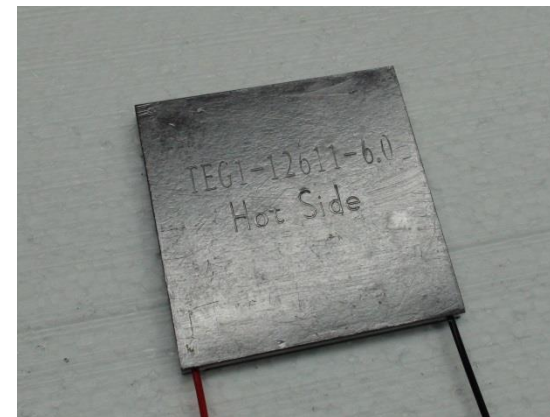
Обеспечивают автономность работы оборудования, значительную надёжность, малый вес и габариты

Требования к радиоизотопным источникам

- высокая активность для получения значительного энерговыделения в ограниченном объёме установки (относительно малый период полураспада)
- длительный период поддержания мощности (период полураспада – годы и десятилетия)
- безопасный вид ионизирующего излучения (простая и легкая защита от излучения)
- для изотопов, способных к делению, возможно большая критическая масса
- дешевизна и простота получения изотопа



Топливный элемент из оксида ^{238}Pu
62 W; падение энерговыделения 0,78%
в год



Области применения радиоизотопных источников энергии

- космические аппараты, в особенности «глубокого космоса», где крайне мал поток излучения от Солнца
- глубоководные аппараты
- крайний Север, Антарктика
- энергопитание маяков, бакенов, метеостанций
- питание электрокардиостимуляторов

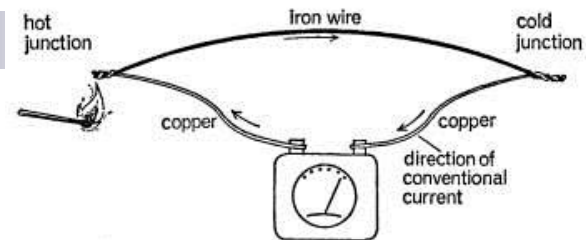
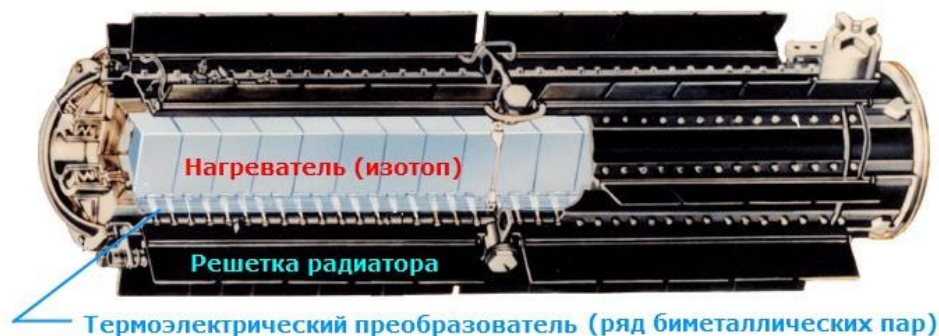
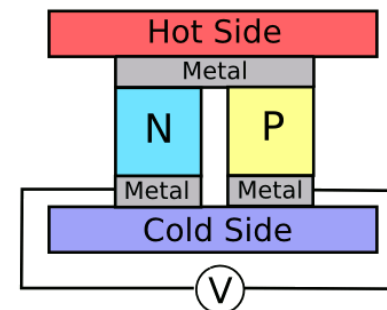
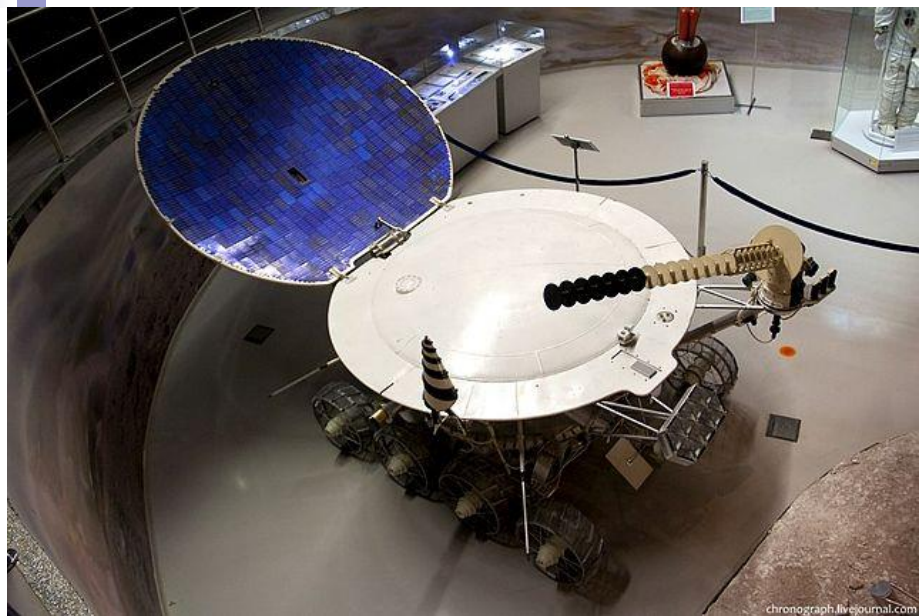


Fig. 128. Thermoelectric effect in a copper-iron circuit

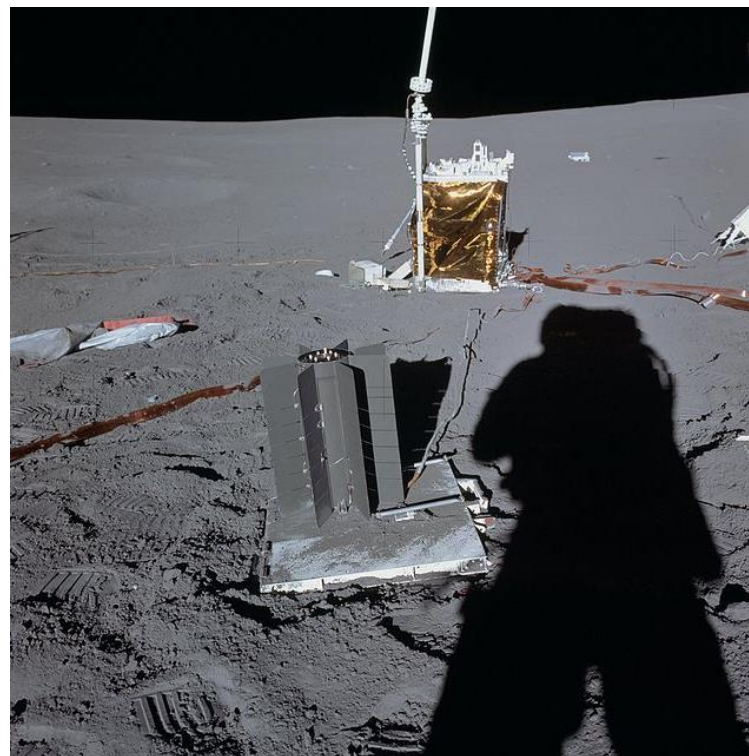


Изотоп	Получение	Удельная мощность, Вт/г	Температура плавления топлива, °C	$T_{1/2}$	Энергия распада, кВт·ч/г
^{238}Pu	ядерный реактор	0,568	2500	86 лет	608,7
^{90}Sr	осколки деления	0,93	2460 (SrO)	28 лет	162,721
^{144}Ce	осколки деления	2,6	~2600	285 дней	57,439
^{242}Cm	ядерный реактор	121	~2270	162 дня	677,8
^{210}Po	облучение висмута	142	600 (PbPo)	138 дней	677,59
^{244}Cm	ядерный реактор	2,8	~2270	18,1 года	640,6
^{232}U	облучение тория	8,097	2850	68,9 лет	4887,103
^{106}Ru	осколки деления	29,8	2250	371,63 сут	9,854

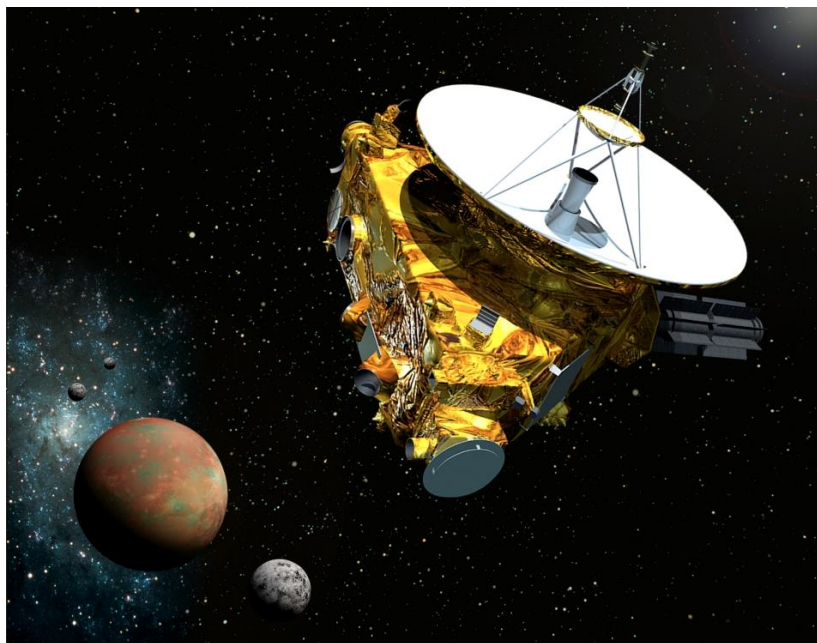




Источник тепла на основе ^{210}Po использовался на Луноходе-1 и 2.



SNAP-27, Аполлон-14.



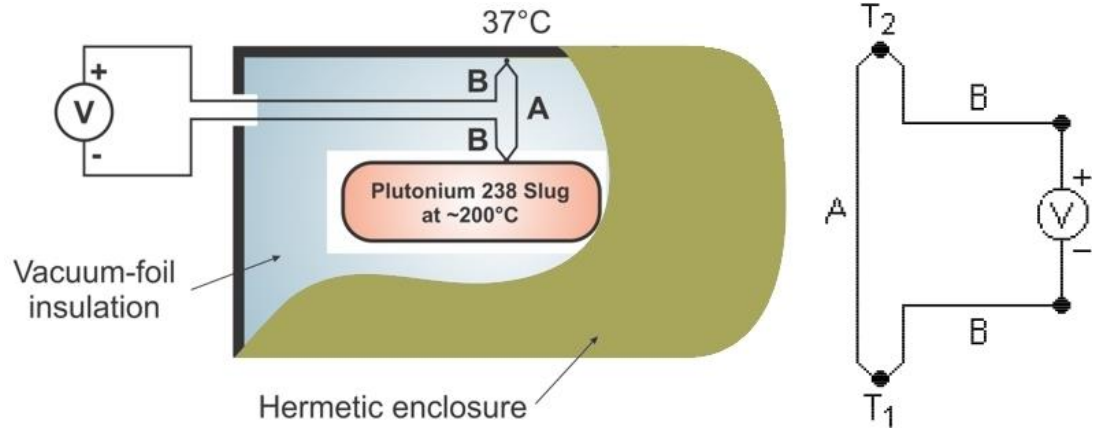
Станция «Новые горизонты» для изучения Плутона, его спутника Харона и объектов пояса Койпера.
Запущена в 2006 г.
Стартовая мощность РИТЭГ – 228 Вт.

В СССР было изготовлено 1007 РИТЭГ для наземной эксплуатации. Почти все они делались на базе радиоактивного тепловыделяющего элемента с изотопом ^{90}Sr . Мощность от 10 до 120 Вт, срок службы 10-30 лет. Обеспечивали электропитанием маяки вдоль всего Северного Морского Пути.

В настоящее время большая часть утилизирована и заменена альтернативными источниками питания.



The nuclear battery developed by Alcatel for Medtronic



Nuclear batteries were introduced in the pacing industry around 1973. The implant of nuclear-powered pacemakers stopped in the mid-1980s. Lithium-powered batteries are now the norm

A pacemaker implanted in the abdomen was calculated to deliver a dose of 57 mrem during the full term, which is approximately 20 times less than the maximum allowable dose (1125 mrem).

Figure 3 - This Medtronic nuclear pacemaker still “ticks” 35 years after it was manufactured.

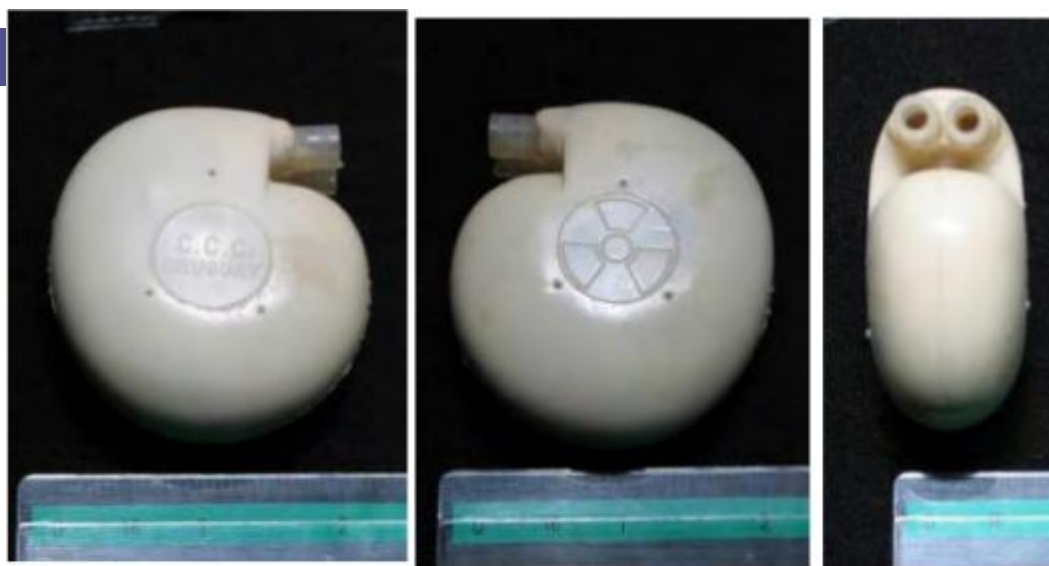


Figure 8 – This nuclear-powered pacemaker was constructed by CCC del Uruguay and implanted in 1974. The power source was a McDonnell-Douglas Betacel 400 betavoltaic cell.



Figure 9 – No radiation above normal background could be detected from this CCC Betacel-powered nuclear pacemaker 30 years after it was manufactured.

Ядерный реактивный двигатель РД-0410 1965-1985



Тяга в вакууме	35.28 кН
Рабочее тело	смесь водорода и гексана
Удельный импульс	9000 м/с
Средняя температура на входе в сопло	3000 К
Время работы	3600 с
Количество включений	10
Масса с радиационной защитой и адаптером	2000 кг
Тепловая мощность реактора	196 МВт
Размеры реактора:	
– высота	800 мм
– диаметр	500 мм
Размеры двигателя:	
– высота	3700 мм
– максимальный диаметр	1200 мм

Ядерное топливо — материал на основе карбидов урана и вольфрама, с обогащением по изотопу U-235 около 80 %



Испытания РД-0410 в шахте
на Семипалатинском полигоне

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

Nature is in austere mood, even terrifying, withal majestically beautiful.

Природа настроена строго, даже угрожающе, но при этом величественно красива.

Frederick Soddy

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, стр.165-172
2. Б.С. Ишханов. Радиоактивность,
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/index.html>
3. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава VI. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>
4. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 6;
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .