



Общая геохимия

Лекция 6

Изотопная геохимия. Общие вопросы
(изотопы, радиоактивный распад)

Зачем нужна изотопная геохимия?



Литература

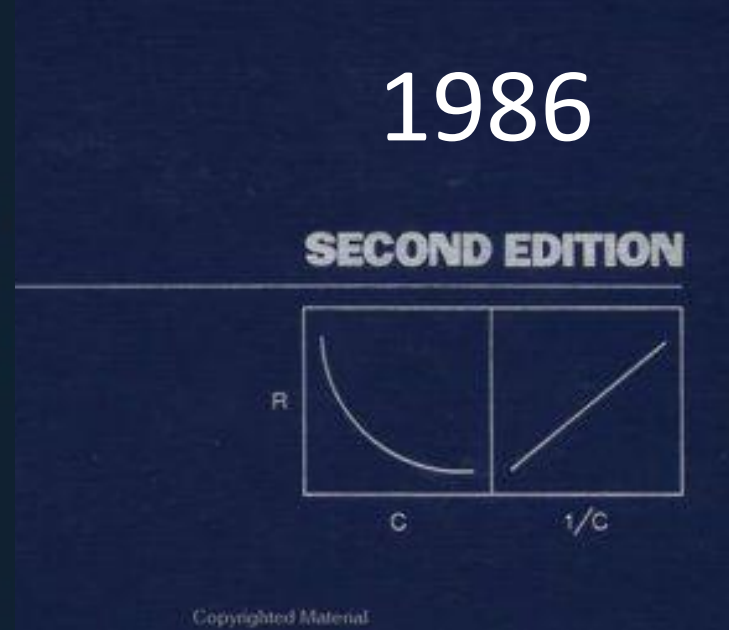
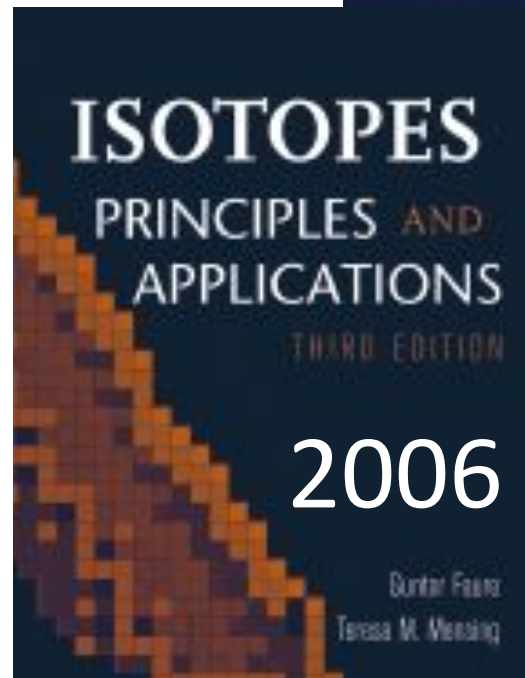
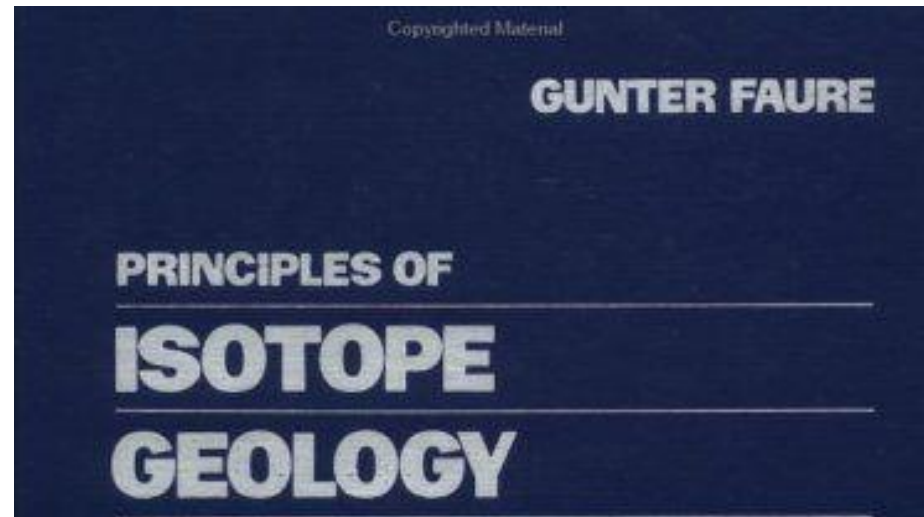
Г.ФОР

ОСНОВЫ ИЗОТОПНОЙ ГЕОЛОГИИ

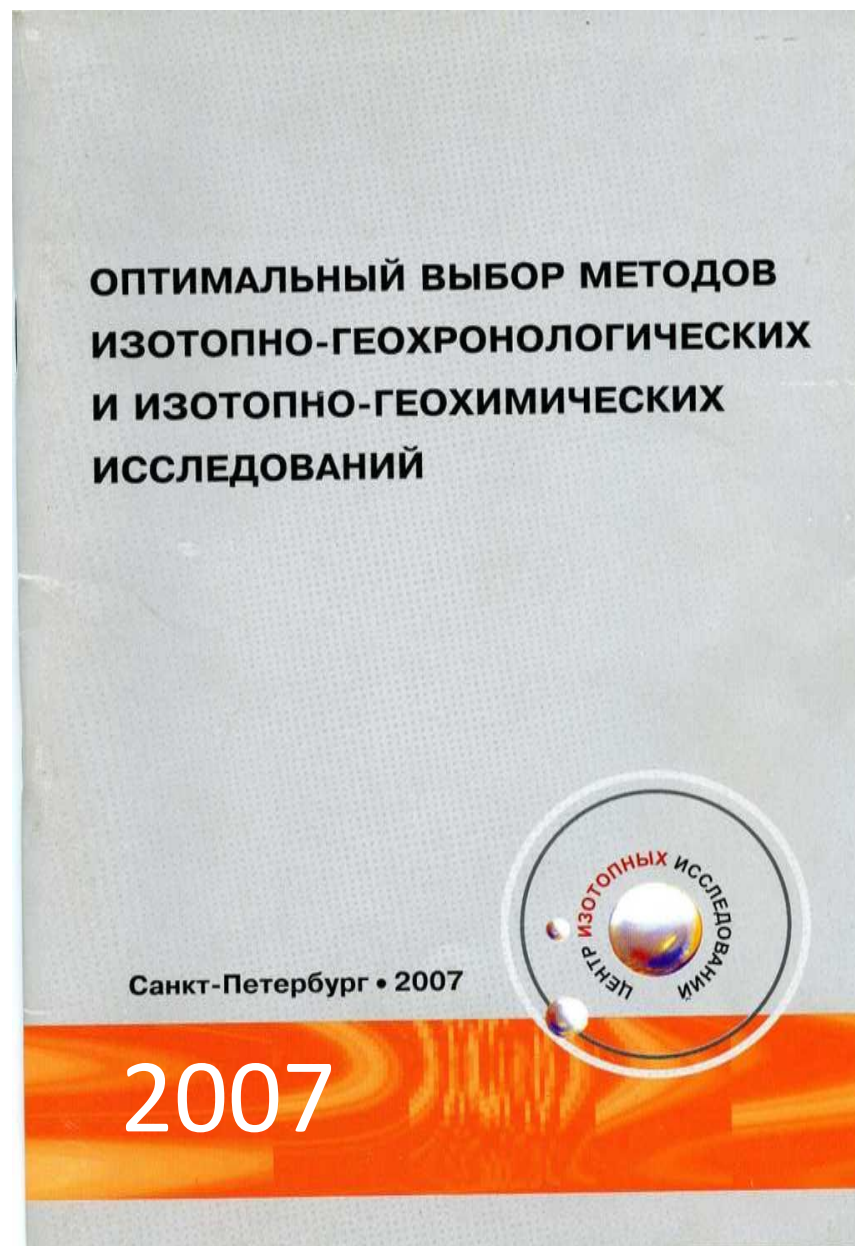
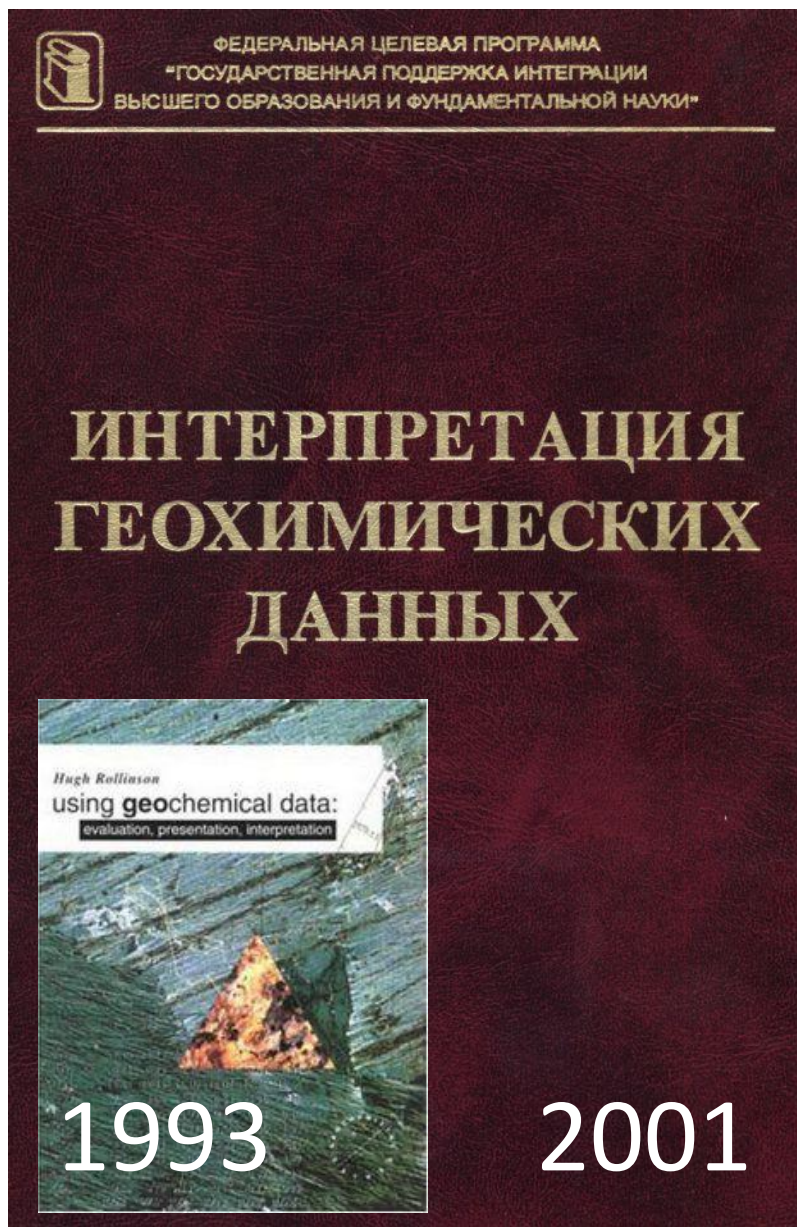
Перевод с английского
д-ра геол.-мин. наук
И. М. ГОРОХОВА
и д-ра хим. наук
Ю. А. ШУКОЛЮКОВА



Москва «Мир» 1989



Литература



Литература

2005

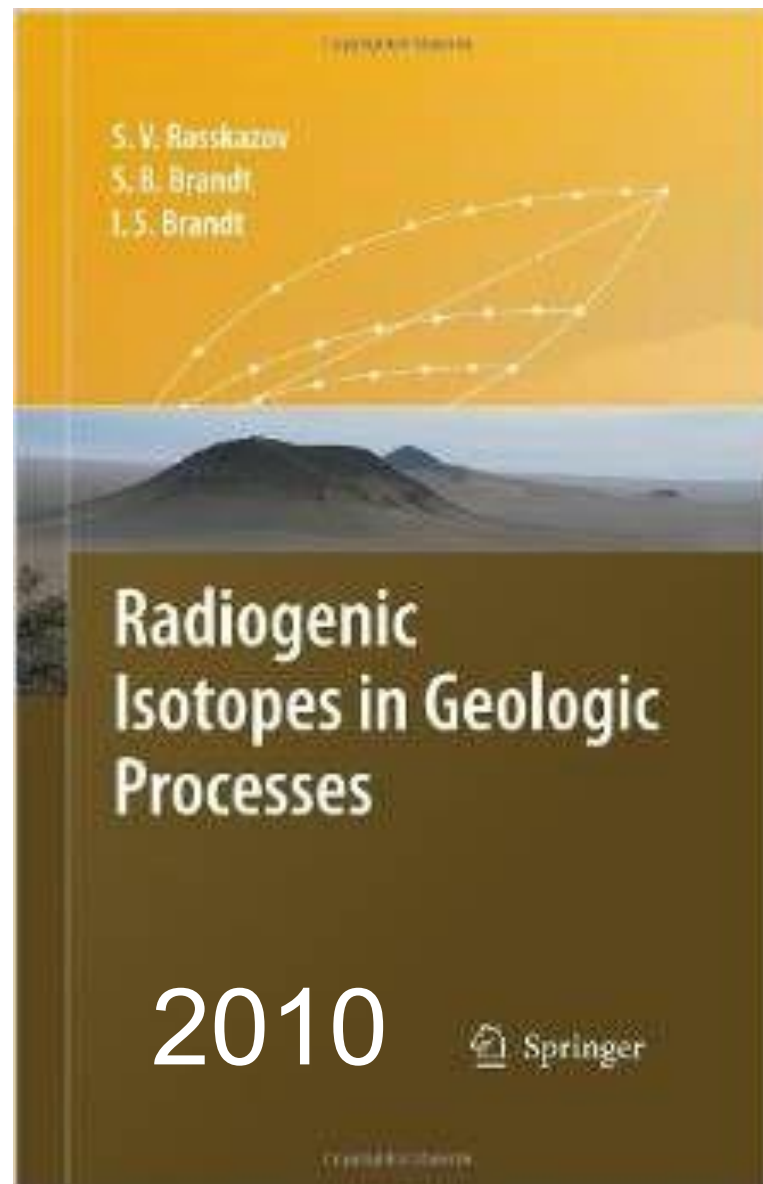


С. В. РАССКАЗОВ, И. С. ЧУВАШОВА

2012

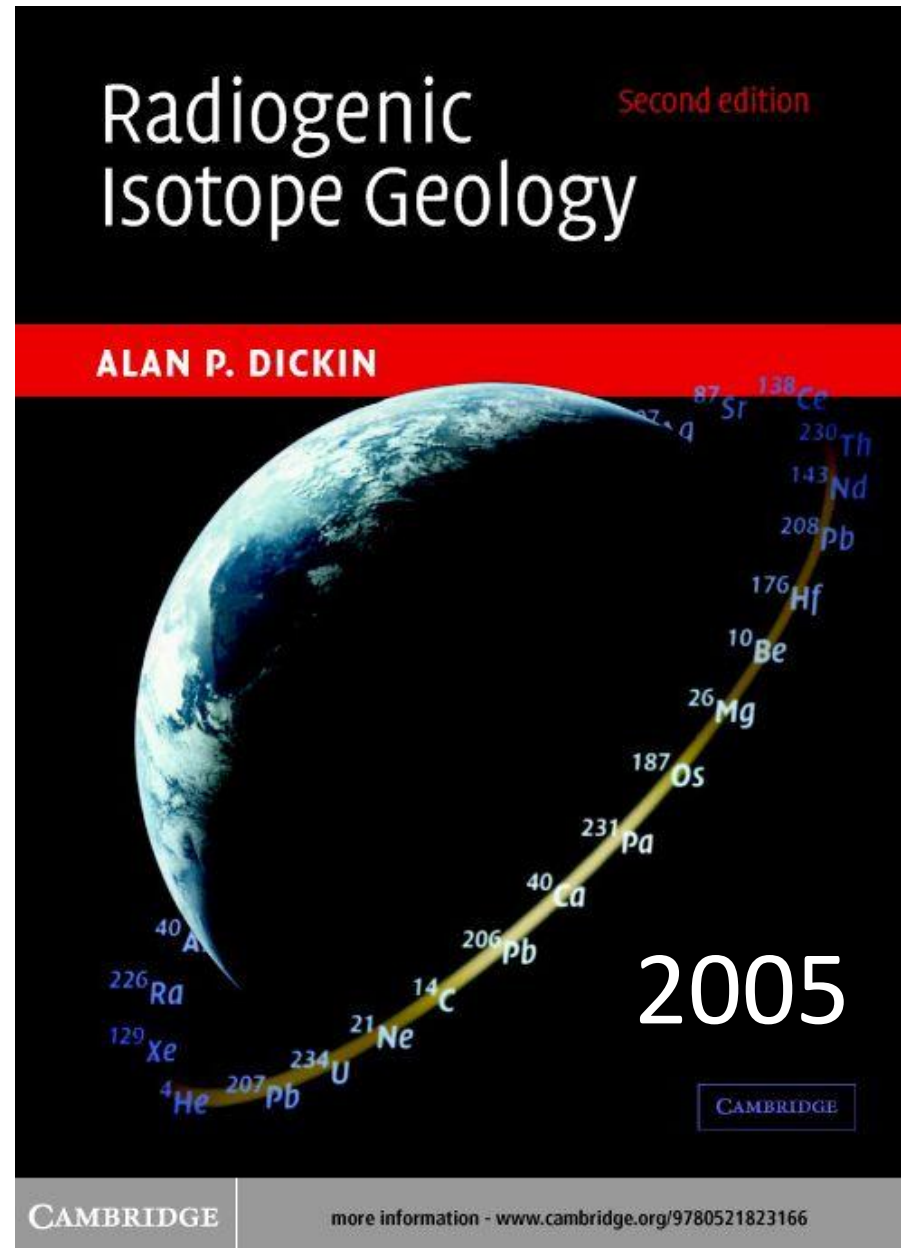
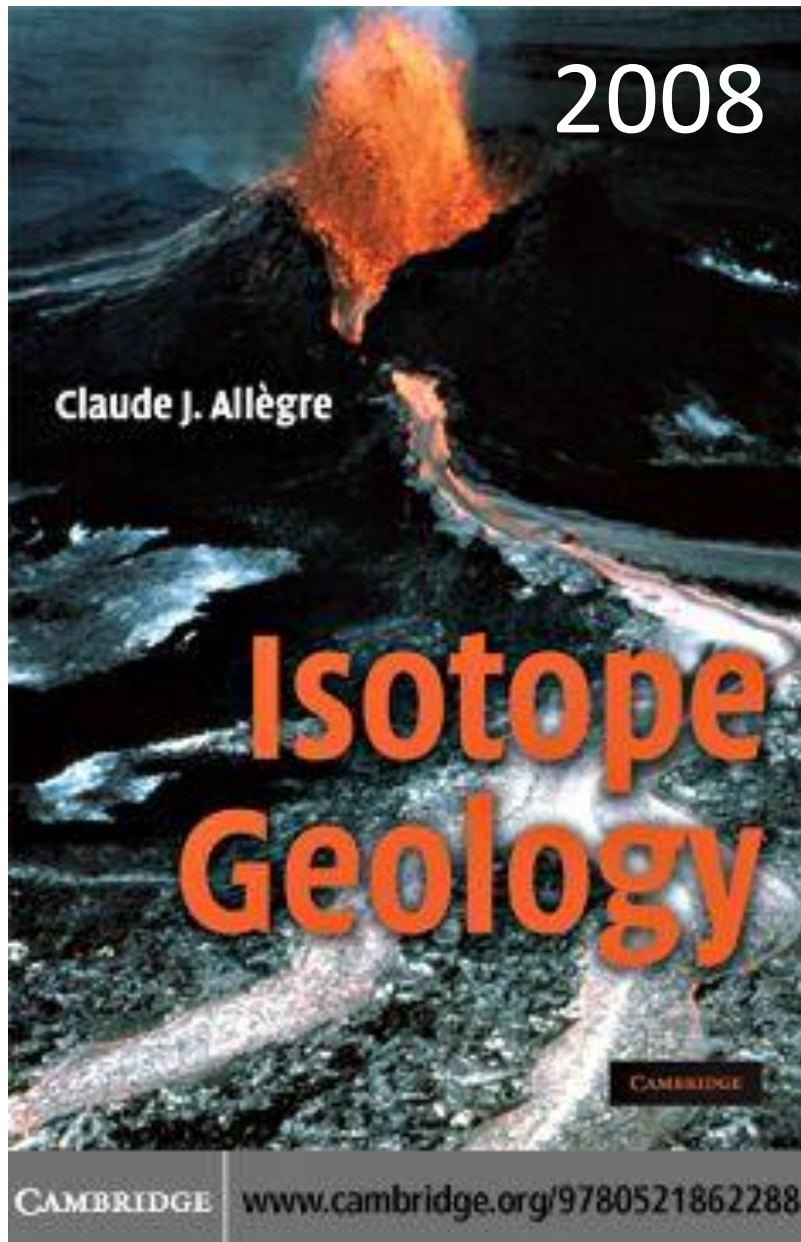
**РАДИОИЗОТОПНЫЕ МЕТОДЫ
ХРОНОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Учебное пособие

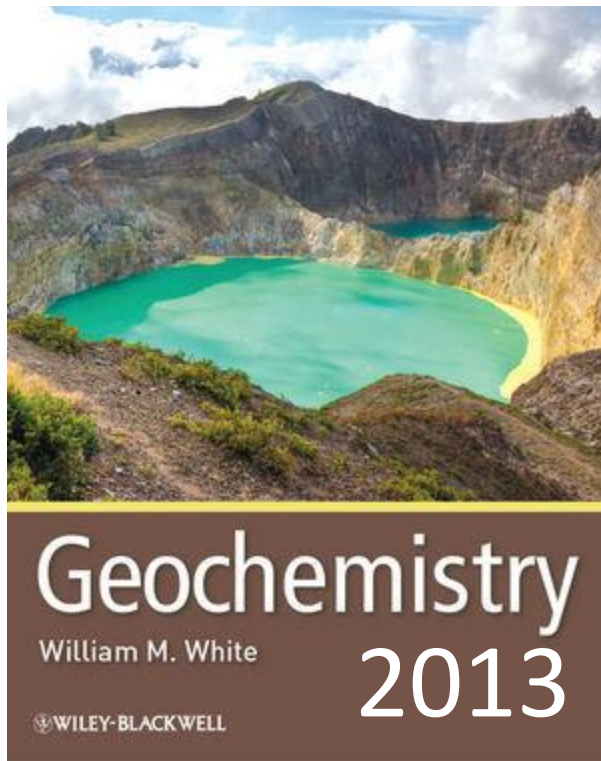


2010

Литература

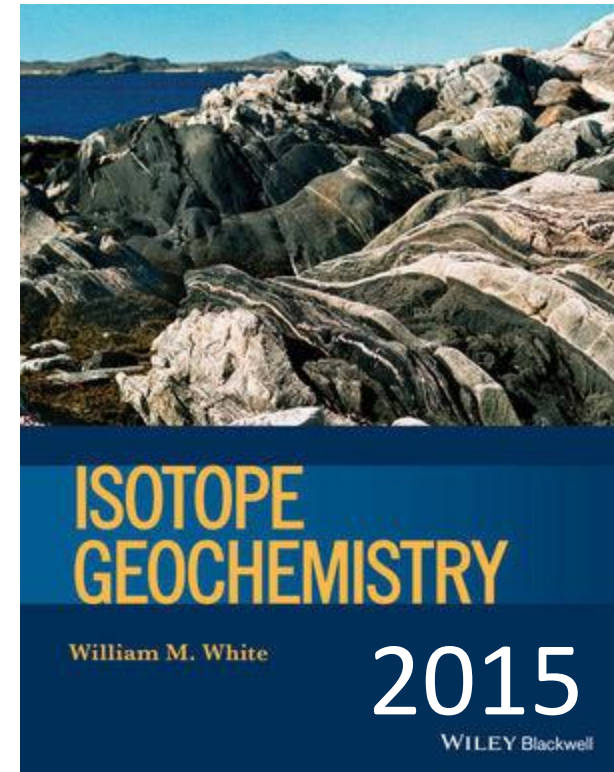


Литература



Isotope Geochemistry
Atoms and Nuclei: Their Physics and Origins
Chapter I **Spring 2011**

 **GEOCHEMISTRY**
by **William M. White**
Cornell University
*An On-Line Textbook, Eventually to be
published by:* **John-Hopkins University Press**



Литература



Литература

Г. А. Вагнер

Научные методы
датирования в геологии,
археологии и истории

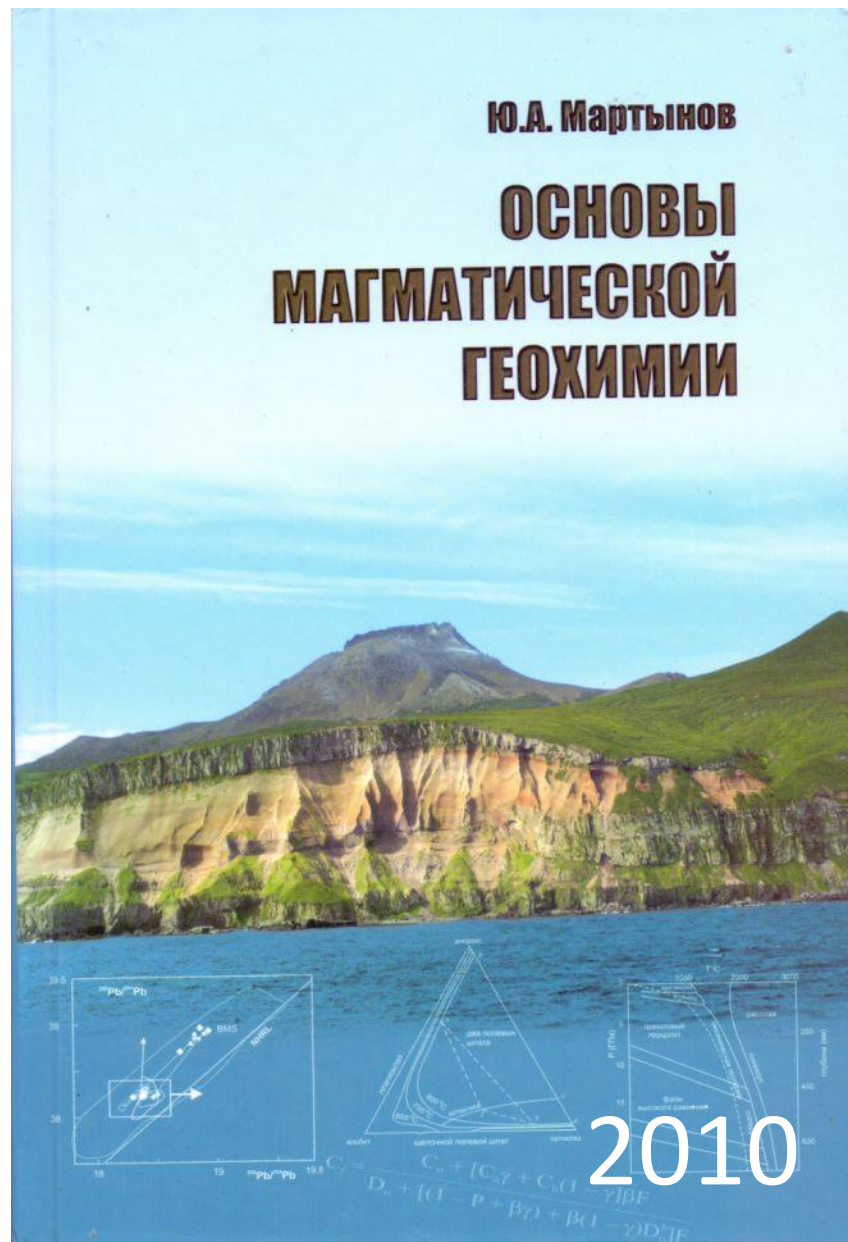


 ТЕХНОСФЕРА

2006

Ю.А. Мартынов

ОСНОВЫ
МАГМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОХИМИИ



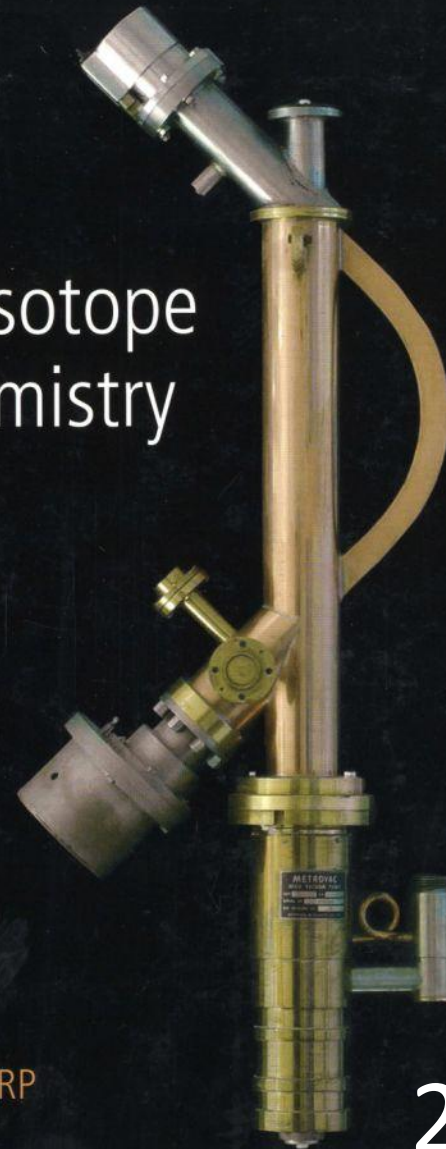
Литература

Й. ХЁФС

ГЕОХИМИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

1983

Principles of Stable Isotope Geochemistry



ZACHARY SHARP

2007

Elements

February 2007
Volume 3, Number 1
ISSN 1811-5209



Reactions with Fluids and Melts

Elements

February 2013
Volume 9, Number 1
ISSN 1811-5209

One Hundred Years of Geochronology

100 Years of U-Pb Geochronology

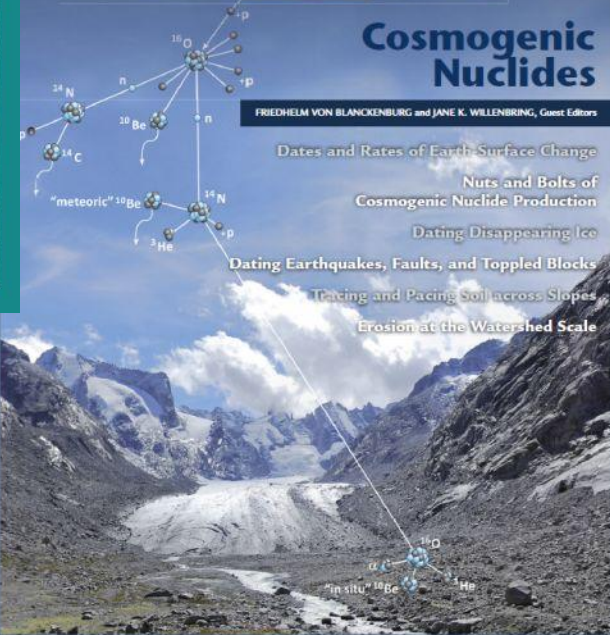
Elements

October 2014
Volume 10, Number 5
ISSN 1811-5209

Cosmogenic Nuclides

FRIEDHELM VON BLANKENBURG and JANE K. WILLENBRING, Guest Editors

Erosion at the Watershed Scale



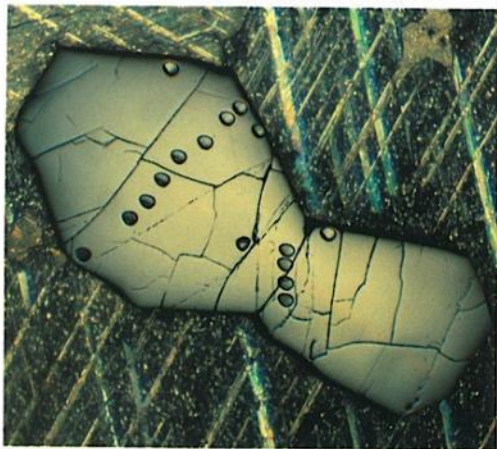


REVIEWS in
MINERALOGY &
GEOCHEMISTRY
Volume 43



STABLE ISOTOPE GEOCHEMISTRY

JOHN W. VALLEY, DAVID R. COLE, EDITORS



MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA
Paul H. Ribbe, *Series Editor*
GEOCHEMICAL SOCIETY
Jodi J. Rosso, *Series Editor*

ISSN 1529-6466

Периодика



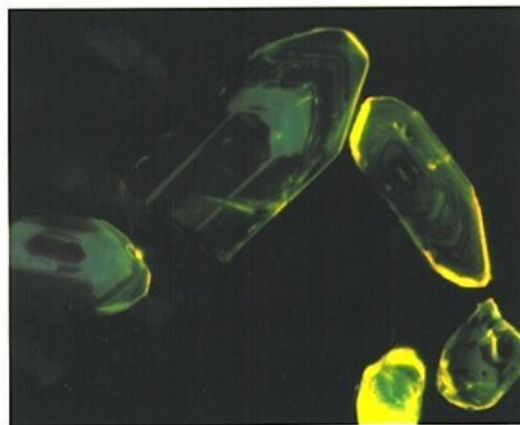
REVIEWS in
MINERALOGY &
GEOCHEMISTRY
Volume 53 2003



ZIRCON

EDITORS:

John M. Hancher & Paul W.O. Hoskin



MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA
Paul H. Ribbe, *Series Editor*
GEOCHEMICAL SOCIETY
Jodi J. Rosso, *Series Editor*

ISSN 1529-6466

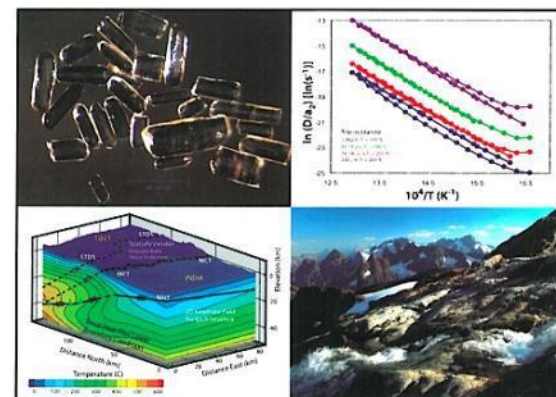


REVIEWS in
MINERALOGY &
GEOCHEMISTRY
Volume 58



LOW-TEMPERATURE THERMOCHRONOLOGY: *Techniques, Interpretations, and Applications*

EDITORS: Peter W. Reiners & Todd A. Ehlers



MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA
GEOCHEMICAL SOCIETY
Series Editor: Jodi J. Rosso

2005

ISSN 1529-6466

geology.spbu.ru/oldsite «лекции on-line»
<http://ansatte.uit.no/kku000/webgeology/>

Задачи изотопной геохронологии

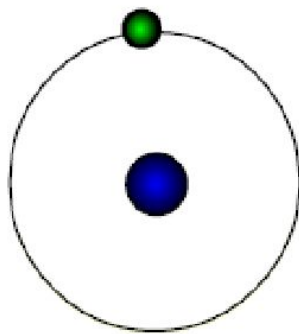
- Определение времени и длительности геологических событий

Основные задачи изотопной геохимии

- Оценка отношения материнского элемента к дочернему в источнике вещества по изотопному составу и возрасту его производных;
- Оценка химического состава источника исследуемого вещества;
- Проверка генетической связи исследуемого вещества с известным источником (задачи геохимии, экологии);
- Оценка пропорций смешения различных источников;

Изотопы

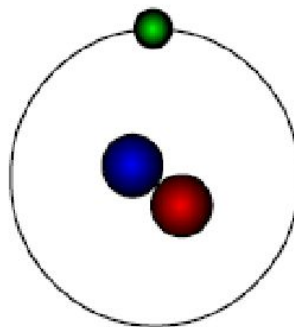
Атомы данного элемента могут отличаться массой ядра (число протонов Z постоянно, число нейтронов $N=A-Z$ может меняться); такие разновидности атома одного и того же элемента называются **изотопами**



Количество нуклонов
(протонов и нейтронов)



Количество протонов



Естественный водород состоит на 99.985% из ${}^1\text{H}$ и на 0.015% из ${}^2\text{H}$. Атомный вес водорода, который представляет собой среднюю массу атомов водорода, встречающихся в естественной природе, составляет 1.0079.

- **Изотопы** – атомы **одного элемента**, имеющие в ядрах **одинаковое число протонов**, но различное число нейтронов.
- **Изотопы** занимают **одну и ту же клетку** в Периодической таблице. Следовательно, атомная масса элемента, имеющего несколько изотопов, не является целочисленной. Атомы имеют **одинаковое строение электронных оболочек** и одинаковое число электронов.
- Поэтому **химические и ряд физических свойств** у различных изотопов практически **тождественны**, т.е. в химических реакциях они ведут себя одинаково.

Isotopes of Hydrogen

<http://www.webelements.com/hydrogen/isotopes.html>

Electron
cloud



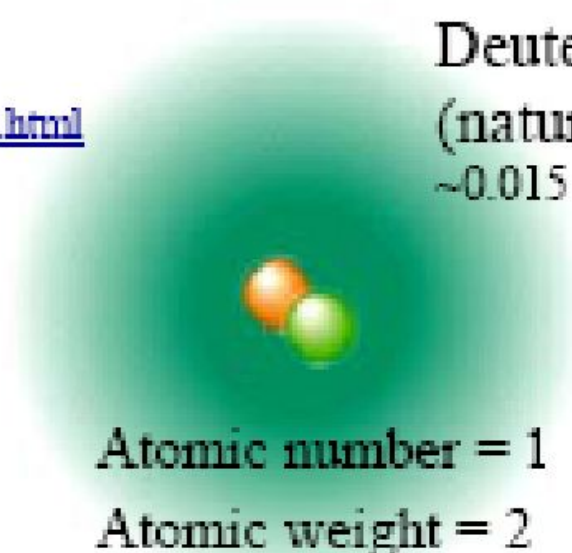
Atomic number = 1

Atomic weight = 1

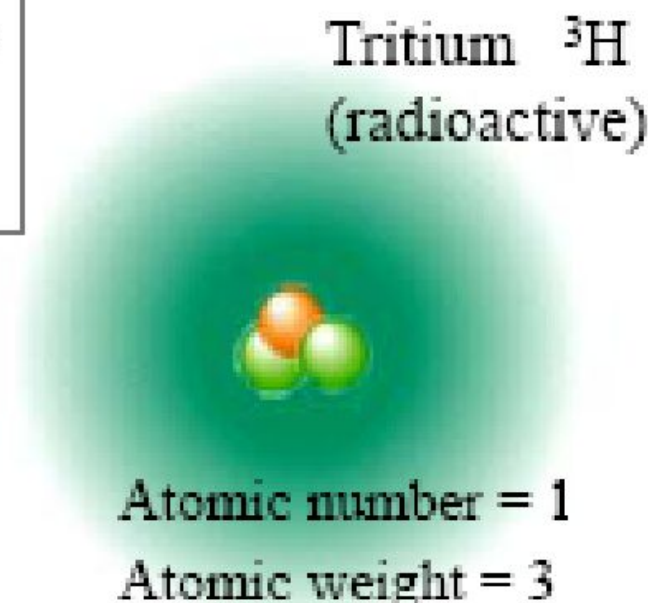
ordinary Hydrogen ^1H
(natural, stable)

~99.99% of all hydrogen

- +  Proton (atomic mass = 1)
-  Neutron (atomic mass = 1)
-  Electron (atomic mass = 0)



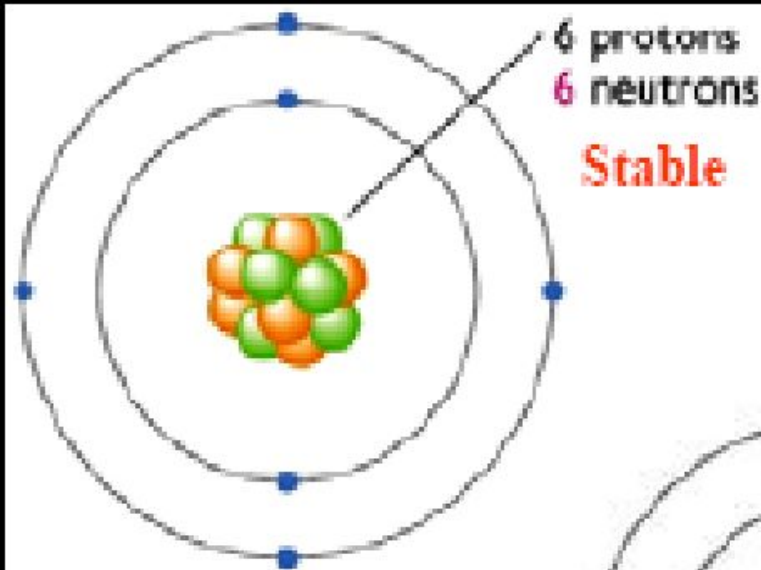
*mean atomic weight
of H in typical
materials: 1.00794*



Isotopes of carbon

*mean atomic weight of C in
typical materials: 12.0107*

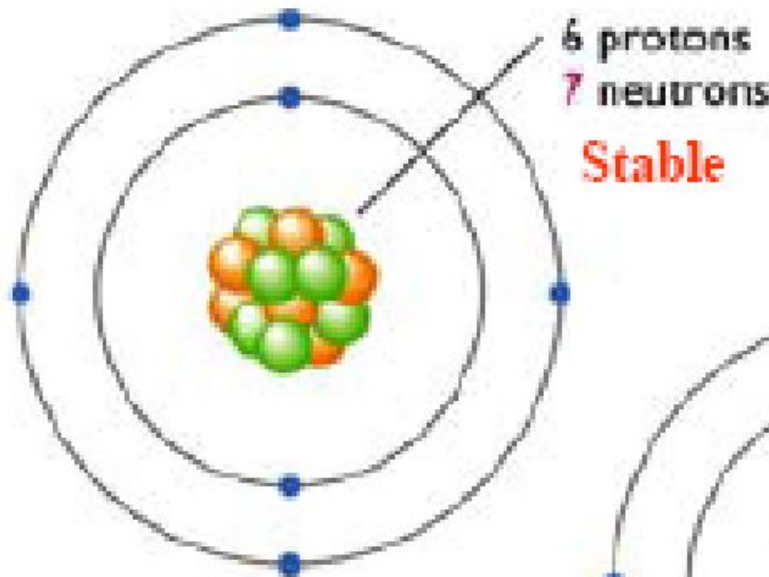
<http://www.webelements.com/carbon/isotopes.html>



Stable

Carbon-12
(6P | 6N)

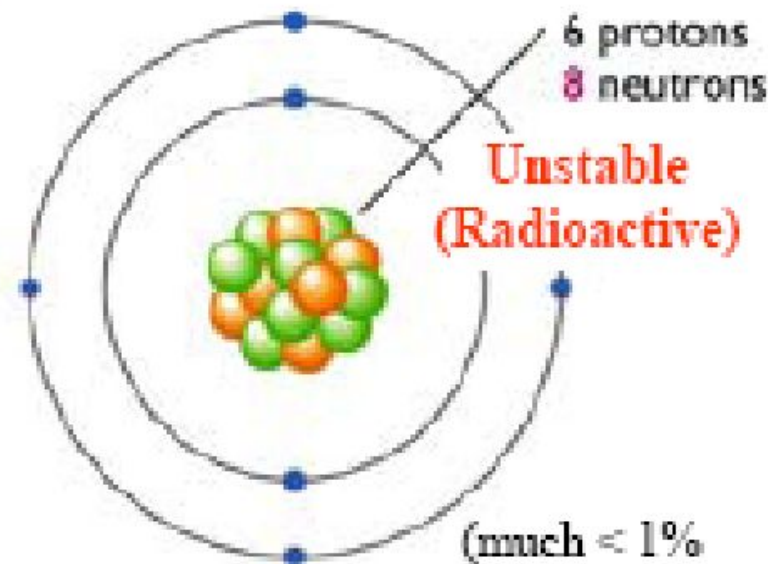
Atomic weight 12
(~99% of all carbon)



Stable

Carbon-13
(6P | 7N)

Atomic weight 13
(~1% of all carbon)



**Unstable
(Radioactive)**

Carbon-14
(6P | 8N)

Atomic weight 14
(much < 1%
of all carbon)

*Artificially produced
carbon isotopes:*

^9C	^{10}C	^{11}C
^{15}C	^{16}C	^{17}C

Изобары – атомы различных элементов, ядра которых содержат одинаковое число нуклонов (протонов и нейтронов в сумме), и, следовательно, имеющие одинаковые массовые числа.

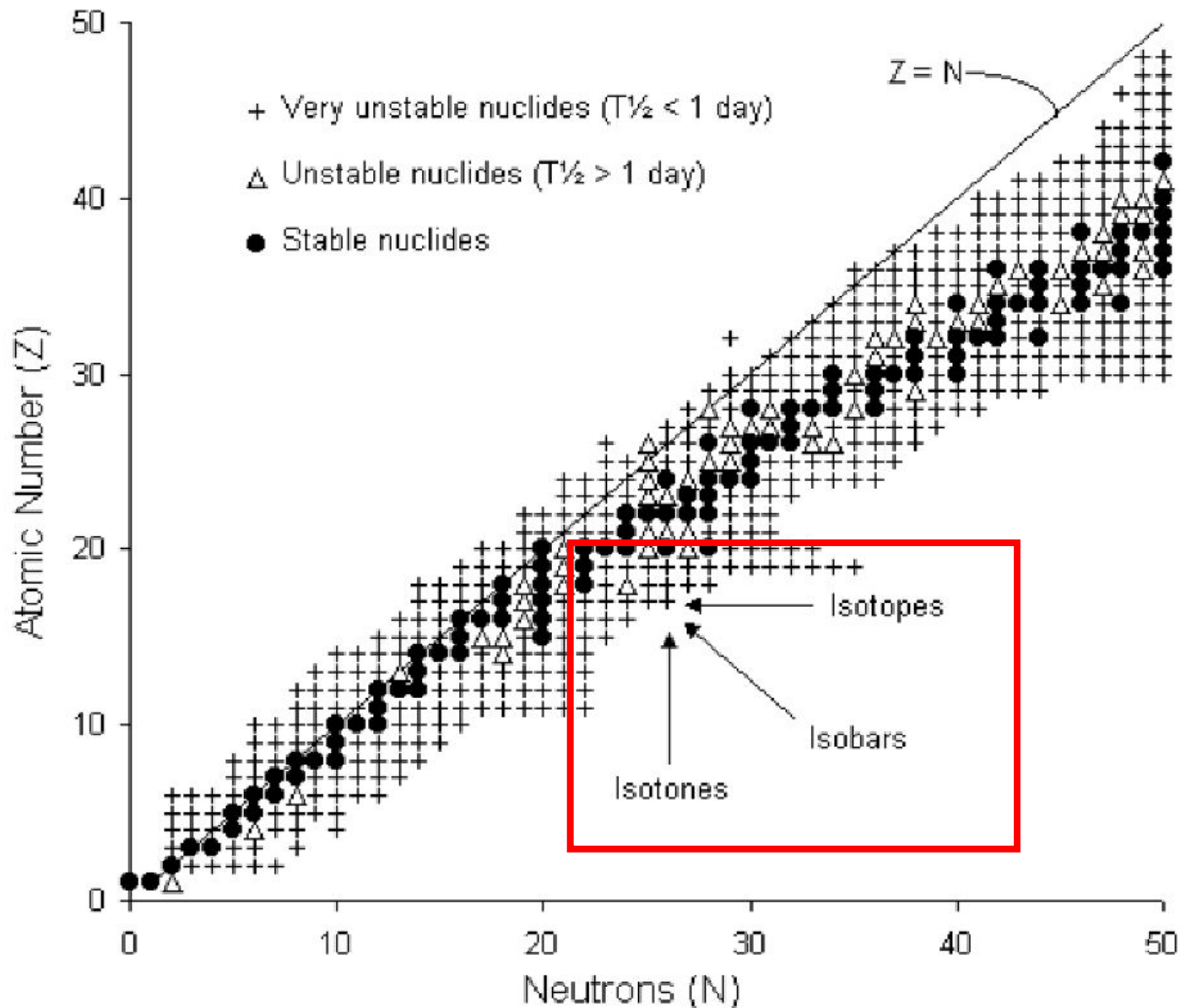
${}_{19}\text{K}^{40}$ ($Z=19$, $N=21$) и ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ ($Z=20$, $N=20$).

Изотоны – атомы различных элементов, имеющие одинаковое число нейтронов, но разные массы A и числа протонов Z .

Изомеры – атомы одного элемента, имеющие одинаковое число как протонов, так и нейтронов, но различную энергию ядер (и **период полураспада**).

Обозначаются: *m*-метастабильное ядро.

Chart of the Nuclides



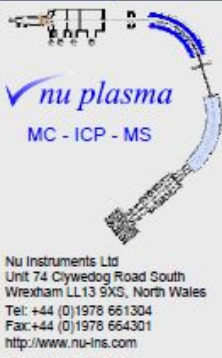
H 1.00784 2.01410	He 3.01603 4.00260	Li 6.01512 7.01600	Be 9.01218 100	B 10.01294 11.00931	C 12.00000 13.00335	N 14.00307 15.00011	O 15.99491 16.99913 17.99916	F 18.99840 100	Ne 19.99244 20.99385 21.99138	Na 22.98977 100	Mg 23.98505 24.96584 25.98260	Al 26.98154 100	Si 27.97693 28.97649 29.97377	P 30.97376 100	S 31.97207 32.97146 33.96787 35.96708	Cl 34.96886 36.96590	Ar 35.96755 37.96273 39.96238	K 38.96371 39.96400 40.96183	Ca 39.96259 41.95962 42.95977 43.95549 45.95369 47.95253	Sc 44.95591 100	Ti 45.95263 46.95177 47.94796 48.94787 49.94479	V 49.94716 50.94396	Cr 49.94646 51.94051 52.94065 53.93888	Mn 54.93805 100	Fe 53.93961 55.93494 56.93540 57.93328	Co 58.93320 100	Ni 57.93535 59.93079 60.93106 61.93835 63.92797	Cu 63.92960 64.92779	Zn 63.92915 65.92804 66.92713 67.92485 69.92532	Ga 68.92558 70.92470	Ge 69.92425 71.92209 72.92346 73.92118 75.92140	As 74.92160 100	Se 73.92248 75.91921 76.91991 77.91773 79.91652 81.91671	Br 78.91834 80.91629	Kr 77.92040 79.91638 81.91348 82.91413 83.91151 85.91061	Rb 84.91180 86.90918	Sr 83.91343 85.90927 86.90869 87.90562	Y 88.90586 100	Zr 89.90471 90.90564 91.90504 93.90632 95.90827	Nb 92.90638 100	Mo 91.90681 93.90509 94.90584 95.90468 96.90602 97.90541 99.90747	Ru 95.90760 97.90529 98.90594 99.90422 100.90558 101.90435 103.90542	Rh 102.90550 100	Pd 101.90561 103.90403 104.90508 105.90348 107.90389 109.90517	Ag 106.90510 108.90475	Cd 105.90646 107.90419 109.90301 110.90418 111.90276 112.90440 113.90336 115.90476	In 112.90405 114.90388	Sn 111.90482 113.90278 114.90334 115.90174 116.90295 117.90161 118.90331 119.90220 121.90344 123.90527	Sb 120.90382 122.90422	Te 119.90402 121.90306 122.90428 123.90289 124.90444 125.90331 127.90446 129.90523	I 126.90448 100	Xe 123.90612 125.90428 127.90353 128.90478 129.90351 130.90508 131.90415 133.90540 135.90722	Cs 132.90543 100	Ba 129.90628 131.90504 133.90449 134.90567 135.90456 136.90582 137.90524	La 137.90711 138.90636	Ce 135.90714 137.90500 139.90544 141.90525	Pr 140.90766 100	Nd 141.90773 142.90982 143.91010 144.91258 145.91313 147.91690 148.92090	Sm 143.91201 146.91149 147.91493 148.91719 149.91729 151.91974 153.92222	Eu 150.91986 152.92124	Gd 151.91980 153.92088 154.92263 155.92213 156.92397 157.92411 159.92706	Tb 158.92535 100	Dy 155.92429 157.92441 159.92520 160.92694 161.92681 162.92874 163.92918	Ho 164.93033 100	Er 161.92879 163.92921 165.93035 166.93206 167.93238 169.93648	Tm 166.93425 100	Yb 167.93391 169.93477 170.93634 171.93639 172.93822 173.93887 175.94258	Lu 174.94079 175.94269	Hf 173.94007 175.94142 176.94323 177.94371 178.94583 179.94656	Ta 179.94749 180.94801	W 179.94673 181.94823 182.95025 183.95095 185.95438	Re 184.95238 186.95577	Os 183.95251 185.95385 186.95576 187.95585 188.95516 189.95846 191.96149	Ir 190.96060 192.96294	Pt 189.95994 191.96105 193.96268 194.96479 195.96495 197.96788	Au 196.96656 100	Hg 195.96581 197.96676 198.96807 199.96832 200.97029 201.97053 202.97348	Tl 202.97324 204.97441	Pb 203.97304 205.97446 206.97589 207.97604	Bi 208.98039 100	Th 232.03805 100	U 234.04095 235.04393 238.05079
--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--	-----------------------------	---	------------------------------	---	------------------------------	---	-----------------------------	--	-----------------------------------	---	--	---	------------------------------	---	----------------------------------	---	------------------------------	---	------------------------------	---	-----------------------------------	---	-----------------------------------	---	------------------------------	---	-----------------------------------	---	-----------------------------------	---	-----------------------------	---	------------------------------	---	--	-------------------------------	---	-------------------------------------	---	-------------------------------------	---	-------------------------------------	---	------------------------------	--	-------------------------------	--	-------------------------------------	---	-------------------------------	--	--	-------------------------------------	--	-------------------------------	--	-------------------------------	---	-------------------------------	--	-------------------------------------	---	-------------------------------------	---	-------------------------------------	--	-------------------------------------	---	-------------------------------	--	-------------------------------------	---	-------------------------------	-------------------------------	---

Моноизотопных элементов (элементов-одинок) всего 20 (Be, F, Pr, I, Bi)

Sn Tin Isotopes

Stable Tin Isotopes - Sn Isotopes

Nominal mass	Accurate mass	% Natural abundance	Chemical form
¹¹² Sn	111.904826 (5)	0.97 (1)	metal
¹¹⁴ Sn	113.902784 (4)	0.66 (1)	metal
¹¹⁵ Sn	114.903348 (3)	0.34 (1)	metal
¹¹⁶ Sn	115.901747 (3)	14.54 (9)	metal
¹¹⁷ Sn	116.902956 (3)	7.68 (7)	metal
¹¹⁸ Sn	117.901609 (3)	24.22 (9)	metal, oxide
¹¹⁹ Sn	118.903311 (3)	8.59 (4)	metal
¹²⁰ Sn	119.9021991 (29)	32.58 (9)	metal
¹²² Sn	121.9034404 (30)	4.63 (3)	metal
¹²⁴ Sn	123.9052743 (17)	5.79 (5)	metal, oxide



Все известные изотопы могут быть распределены на четыре типа по зависимости от четного или нечетного числа протонов и нейтронов в их составе: четно-четный ${}_8\text{O}^{16}$, четно-нечетный ${}_4\text{Be}^9$, нечетно-четный ${}_3\text{Li}^7$, нечетно-нечетный ${}_5\text{B}^{10}$. Количественные соотношения ядер различного вида представлены в таблице:

Тип	Z - число протонов в ядре	N – число нейтронов в ядре	A – полное число нуклонов (массовое число)
Четно-четный	Четное	Четное	Четное
Четно-нечетный	Четное	Нечетное	Нечетное
Нечетно-четный	Нечетное	Четное	Нечетное
Нечетно - нечетный	Нечетное	Нечетное	Четное

Изотопы с четным Z и четным N резко преобладают над изотопами с нечетными соотношениями.

число протонов/ число нейтронов	четное	нечетное
четное	устойчивые ядра 166/11	умеренно 55/3 устойчивые ядра
нечетное	умеренно устойчивые ядра 47/3	неустойчивые ядра 5/5

Стабильные нуклиды/долгоживущие нуклиды

Большинство атомов стабильно, это означает, что они неизменны. Известно **282** стабильных изотопов. Для легких элементов ($Z < 20$) наиболее стабильны изотопы с равным числом протонов и нейтронов (${}_2\text{He}^4$, ${}_6\text{C}^{12}$, ${}_8\text{O}^{16}$). Но некоторые атомы неустойчивы – **радиоизотопы**. Они самопроизвольно разрушаются и превращаются в другие элементы.

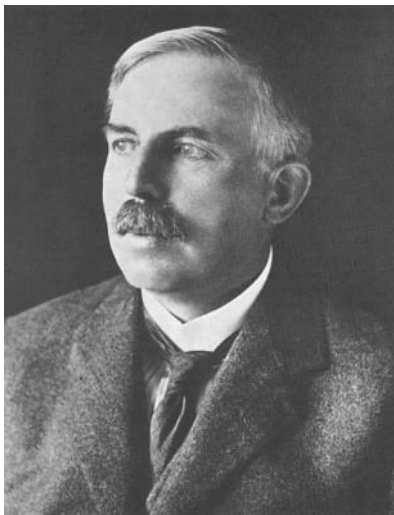
Радиоактивность (Э. Резерфорд 1903г., Ф.

Радиоактивность (от лат. radio-излучаю, radius-луч и activus-действенный), Содди самопроизвольное (спонтанное) превращение неустойчивого изотопа химического элемента в другой изотоп (обычно в изотоп другого элемента). Все тяжелые изотопы с $Z > 82$ радиоактивны.

^{209}Bi ($Z=83$, $N=126$) – наиболее тяжелый стабильный нуклид



Эффект открыл А. Беккерель в 1896г., установивший способность солей урана засвечивать фотопластинки, не подвергавшиеся предварительному освещению. Открытие было сделано после открытия В.К. Рентгеном X-лучей в 1895г.



Хронометр Э. Резерфорда

$$\lambda_U \sim 1.5 \times 10^{-10} \quad U \rightarrow 8\alpha$$

1 gram of UO_2

Time (yrs)	moles	He cc STP
1000	5×10^{-9}	1×10^{-4}
1 million	5×10^{-6}	0.1
10 million	5×10^{-5}	1.0
1 billion	5×10^{-3}	100



Настуран или U
руда,

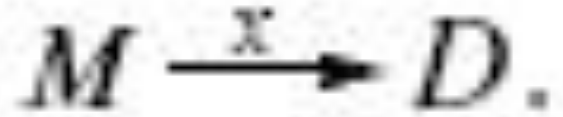
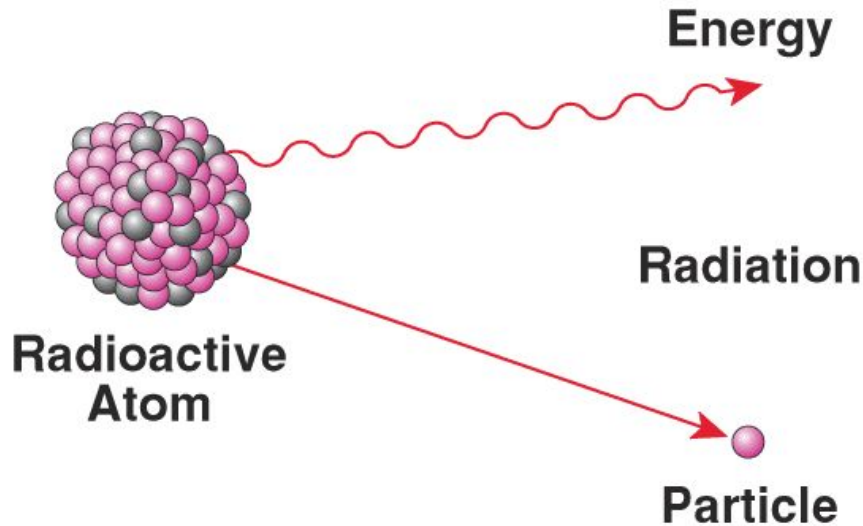
Возраст настурана

оказался ~500 Ma

Проблемы:

- Чувствительность и погрешность манометрических измерений (Африка)
- Реакция не полностью описана. U весит ~238 g/mol; 8 He ядер только 32 g/mol. Где «остаток» вещества?

Принципиальная схема радиоактивного распада



$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D}{M_t} + 1 \right).$$

Принципиальная схема радиоактивного распада: радиоактивный (материнский) изотоп **M** превращается в радиогенный (дочерний) стабильный (иногда радиоактивный) изотоп **D**.

λ – константа распада (**не зависит от внешних условий !!!** – температуры, давления и пр.).

Three major types of radioactive decay:

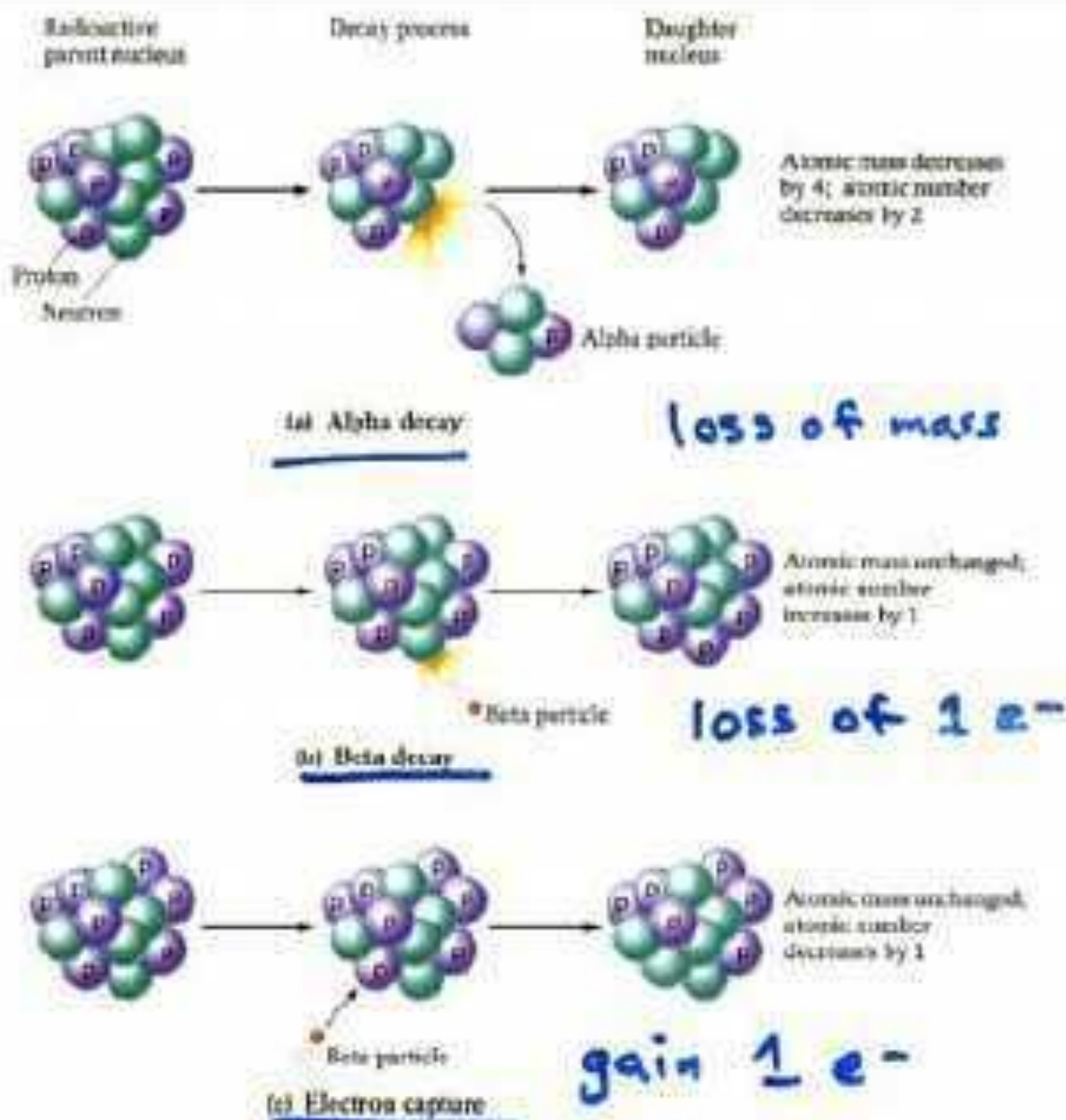
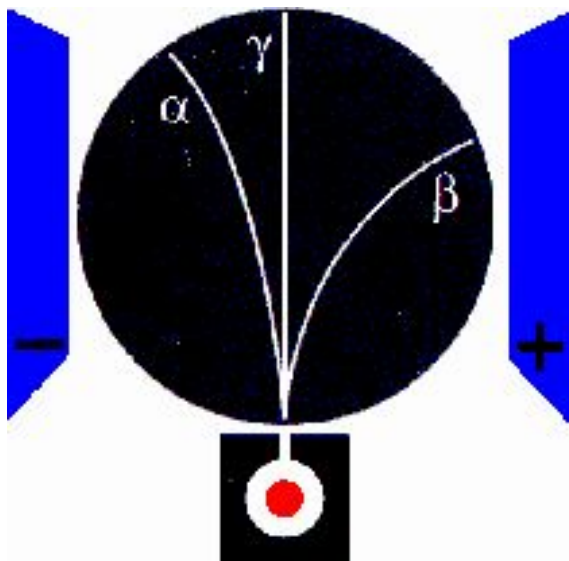


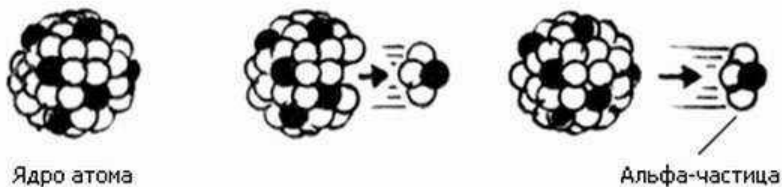
Fig 8-19 Geology 2nd ed
Chernicoff

Основные виды самопроизвольных ядерных превращений

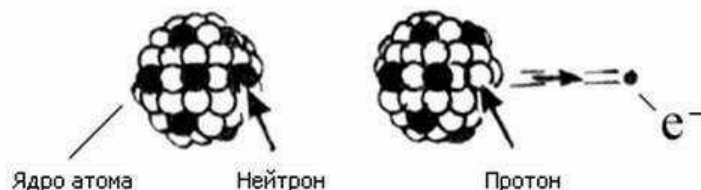


*Компоненты
радиоактивного излучения
в магнитном поле.*

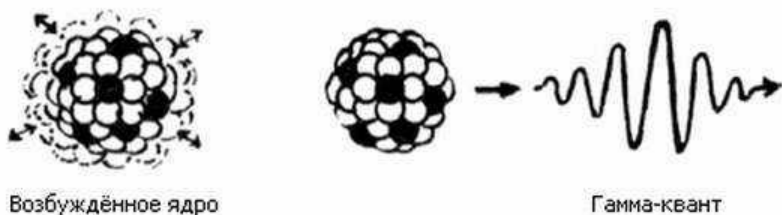
Альфа-распад



Бета-распад



Гамма-излучение



Некоторые изотопы могут испытывать одновременно два или более видов распада. Например, ^{212}Bi распадается с вероятностью 64% в ^{208}Tl (посредством α -распада) и с вероятностью 36% в ^{212}Po (посредством β -распада).

Table IV-4. Different types of radioactive decay processes.

Type	Emitted Particle	Δ protons	Δ neutrons	Comments
α	He^{2+} (helium nucleus)	-2	-2	loss of 4 atomic weight units
β	e^- (electron)	+1	-1	no mass loss
k capture	none	-1	+1	no mass loss, x-ray emission
β^+	e^+ (positron)	-1	+1	no mass loss, x-ray emission

Табл. 1. История открытия различных видов радиоактивности

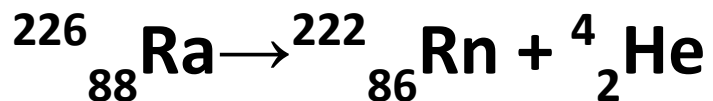
Тип радиоактивности ядер	Вид обнаруженного излучения	Год открытия	Авторы открытия
Радиоактивность атомных ядер	Излучение	1896	А. Беккерель
Альфа-распад	^4He	1898	Э. Резерфорд
Бета-распад	e^-	1898	Э. Резерфорд
Гамма-распад	γ -Квант	1900	П. Виллард
Спонтанное деление ядер	Два осколка	1940	Г.Н. Флеров,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

α-распад

Ядро испускает α-частицу, которая представляет собой ядро атома гелия (${}^4\text{He}$) и состоит из двух протонов и двух нейтронов.

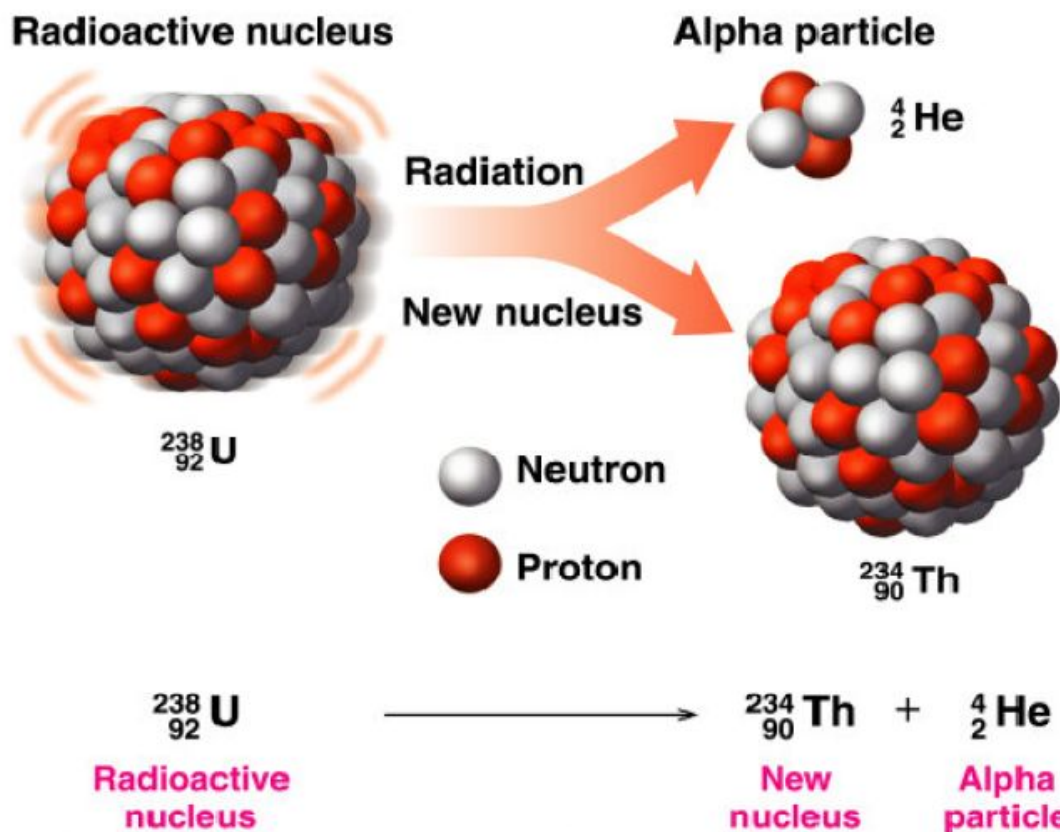
При α-распаде массовое число изотопа уменьшится на 4, а заряд ядра - на 2.

Радий испускает α-частицу и переходит в радон.

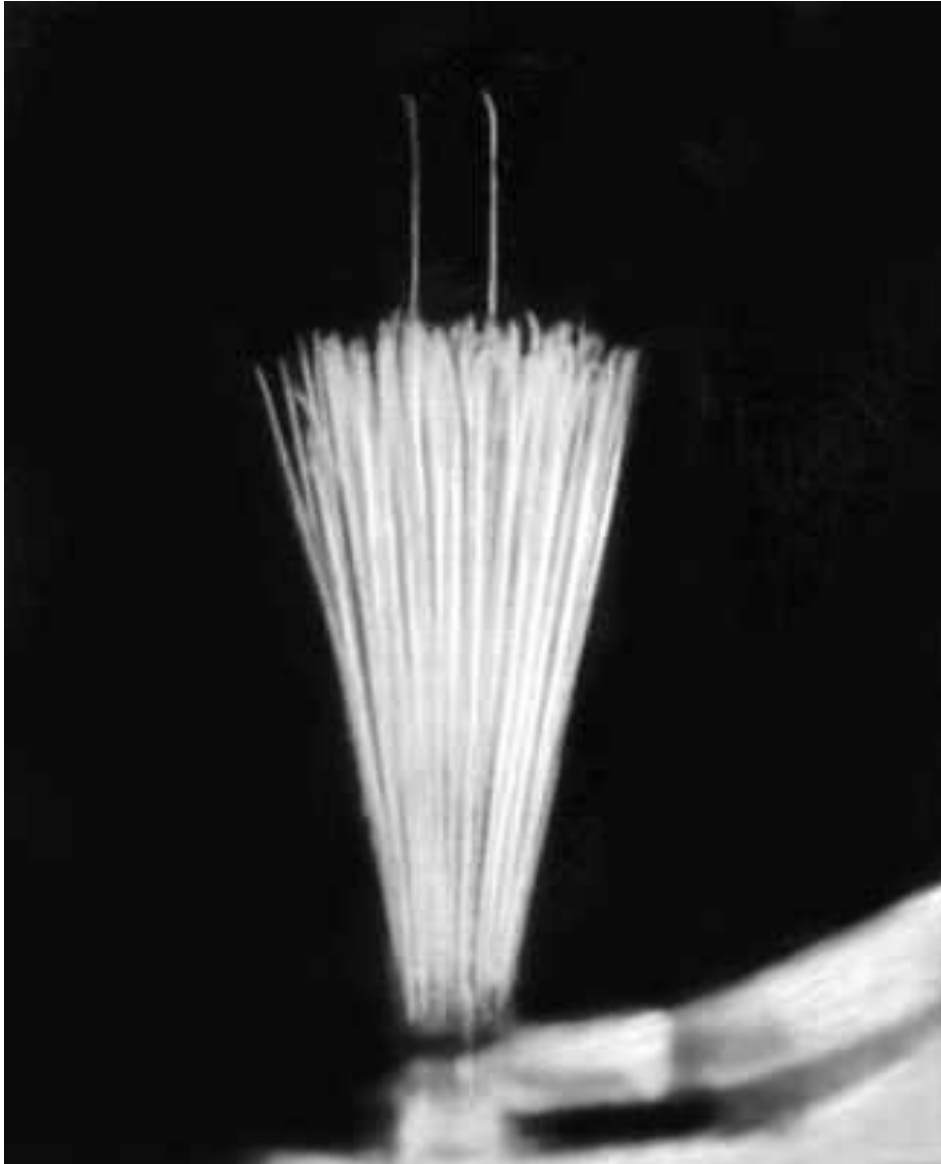


Скорость α-частиц ~16 000 км/с.

Alpha (α) decay:



Фотография следов α -частиц, испускаемых при α -распаде.



Известно более 200 α -радиоактивных ядер; большая часть их тяжелее свинца ($Z > 82$).

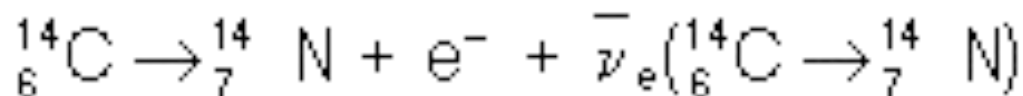
Некоторое количество α -радиоактивных изотопов имеется в области значений $Z < 82$ среди ядер с недостаточным количеством нейтронов, т.н. нейтронодефицитных ядер.

При типа р-распада.

1. β^- электронный распад

В неустойчивом ядре нейтрон превращается в протон, при этом ядро испускает «электрон» (β -частицу - негатрон).

При β -распаде массовое число изотопа не изменяется, поскольку общее число протонов и нейтронов сохраняется, а заряд ядра увеличивается на 1.



β -активность атомных ядер можно рассматривать как распад одного ядерного нейтрона на протон и электрон

(+ антинейтрино) $M^A \rightarrow M^A + \beta$
(правило сохранения: образующийся при распаде атом занимает следующую клетку вправо от изначального (масса его практически не меняется, так как масса электрона в ~2000 раз меньше массы нейтрона). Скорость электрона 150-300 000 км/с.

Beta(β)⁻-decay:

Radioactive
carbon nucleus



$^{14}_6\text{C}$

Radiation

New nucleus



Neutron



Proton

Beta particle



Stable nitrogen-14
nucleus



$^{14}_7\text{N}$

$^{14}_6\text{C}$



$^{14}_7\text{N}$

+ $^0_{-1}e$

Mass number is
the same for
both nuclei

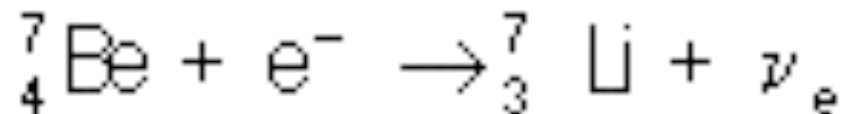
Atomic number
of the new nucleus
increases by 1

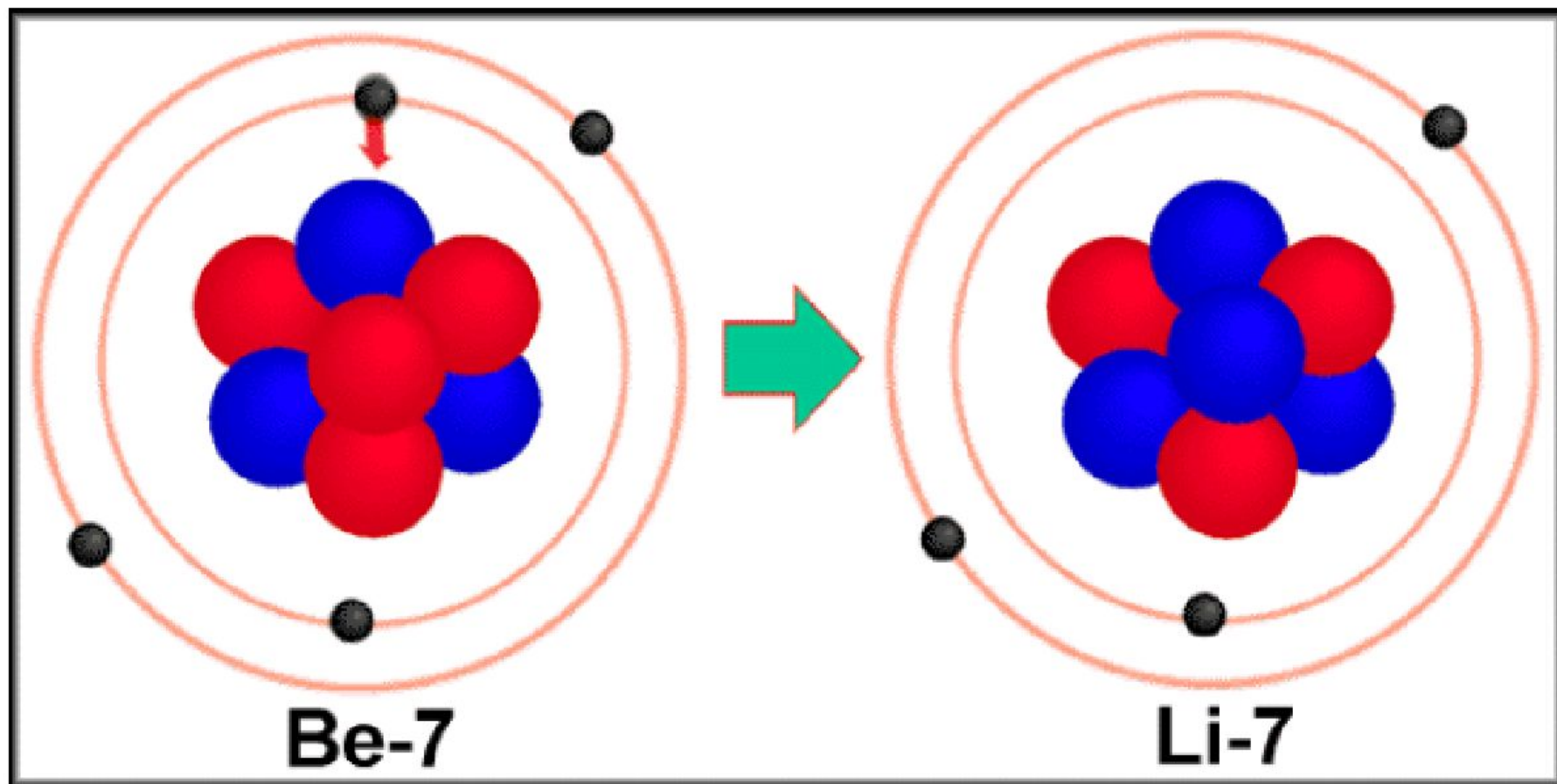
2. *E*-захват – электронный захват (*K*-захват, редко *L*-захват)

Явление **электронного захвата** противоположно β -распаду: электрон с нижнего *K*-уровня поглощается ядром, то есть протон в ядре реагирует с электроном, образуя нейтрон (и испускается нейтрино).

При этом атомный номер элемента уменьшается на 1, то есть перемещается в таблице Менделеева на одну клетку влево. Среди естественных радиоизотопов существуют такие, которые одновременно испытывают *K*-захват и β -распад (^{40}K).

Схема электронного захвата: ${}_Z\text{M}^A + e^- \rightarrow {}_{Z-1}\text{M}^A$

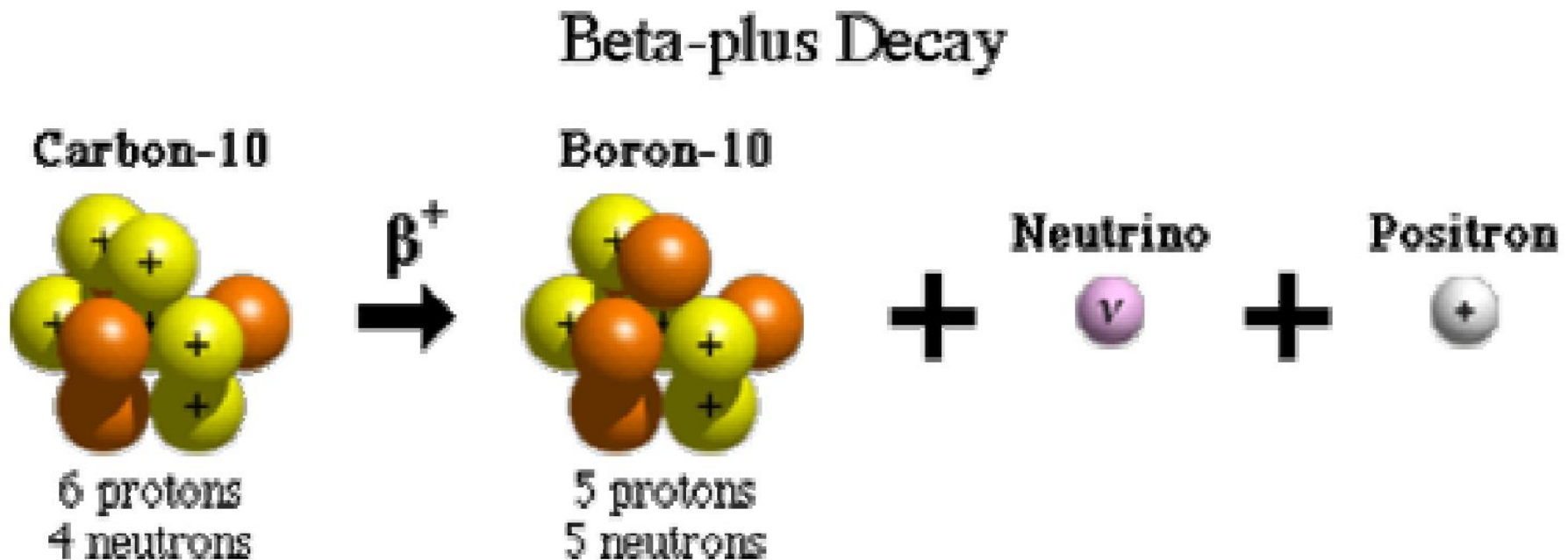




3. β^+ распад (позитронный распад)

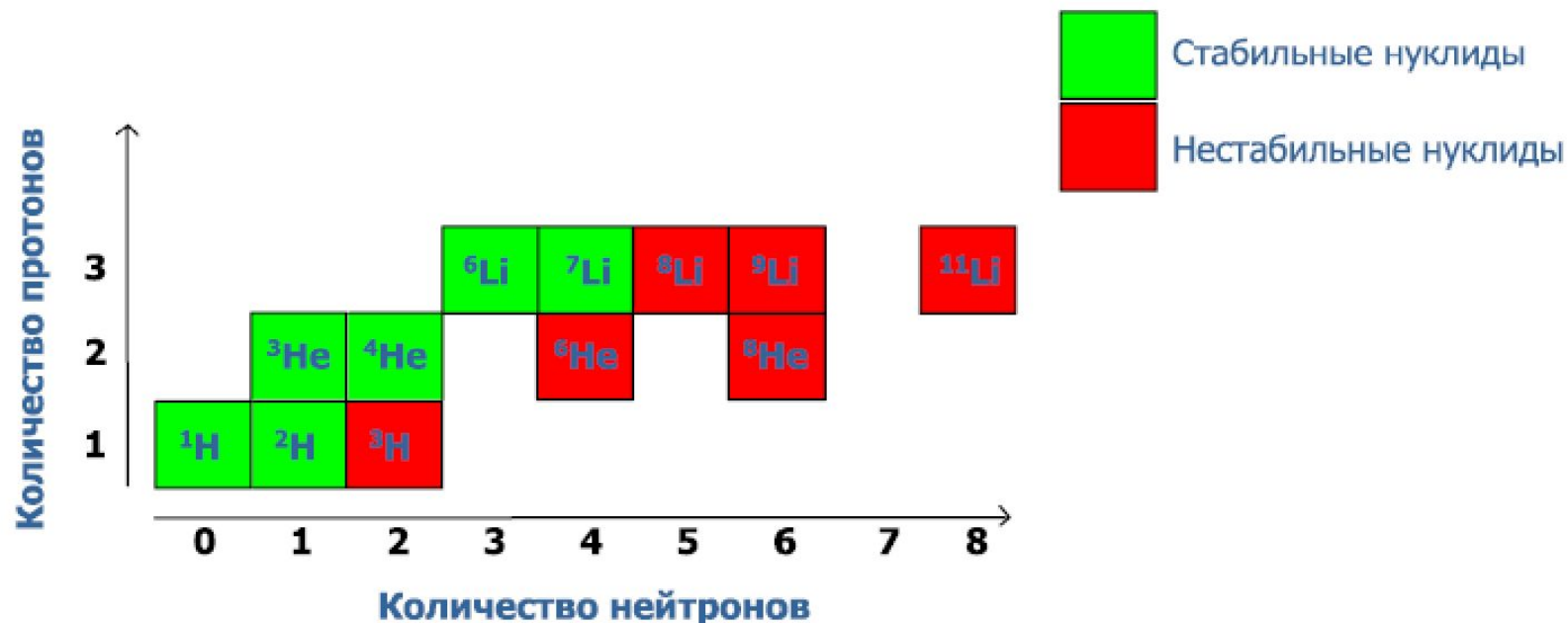
Приводит к тому же результату. Протон испускает позитрон и превращается в нейтрон (также испускается нейтрино).

Схема β^+ распада: $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$



Спонтанное деление (кластерная радиоактивность)

- Наблюдается только у ядер тяжелых элементов с $Z \geq 90$. При этом типе радиоактивности образуются два новых ядра с массами с соотношением приблизительно 2:3. Часто сопровождается испусканием 2-3 нейтронов. Обозначается как f.
- $^{238}\text{U} \rightarrow ^{144}\text{Ba} + ^{92}\text{Kr} + 2\text{n}$



В настоящее время известно немногим более 100 химических элементов. Однако, поскольку количество нейтронов в атомах одного и того же химического элемента может быть разным, общее количество различных атомных ядер, или нуклидов, около 1700.

Однако только 260 из них являются стабильными. 1700 известных нуклидов могут быть показаны в виде таблицы нуклидов. На этой диаграмме показана таблица нуклидов для изотопов H, He и Li.

Таблица нуклидов

Таблица нуклидов

Самопроизвольное деление

Всего ~1700 нуклидов
Элементов 118

Количество протонов

β^+ распад
К-захват

α -распад

β^- распад

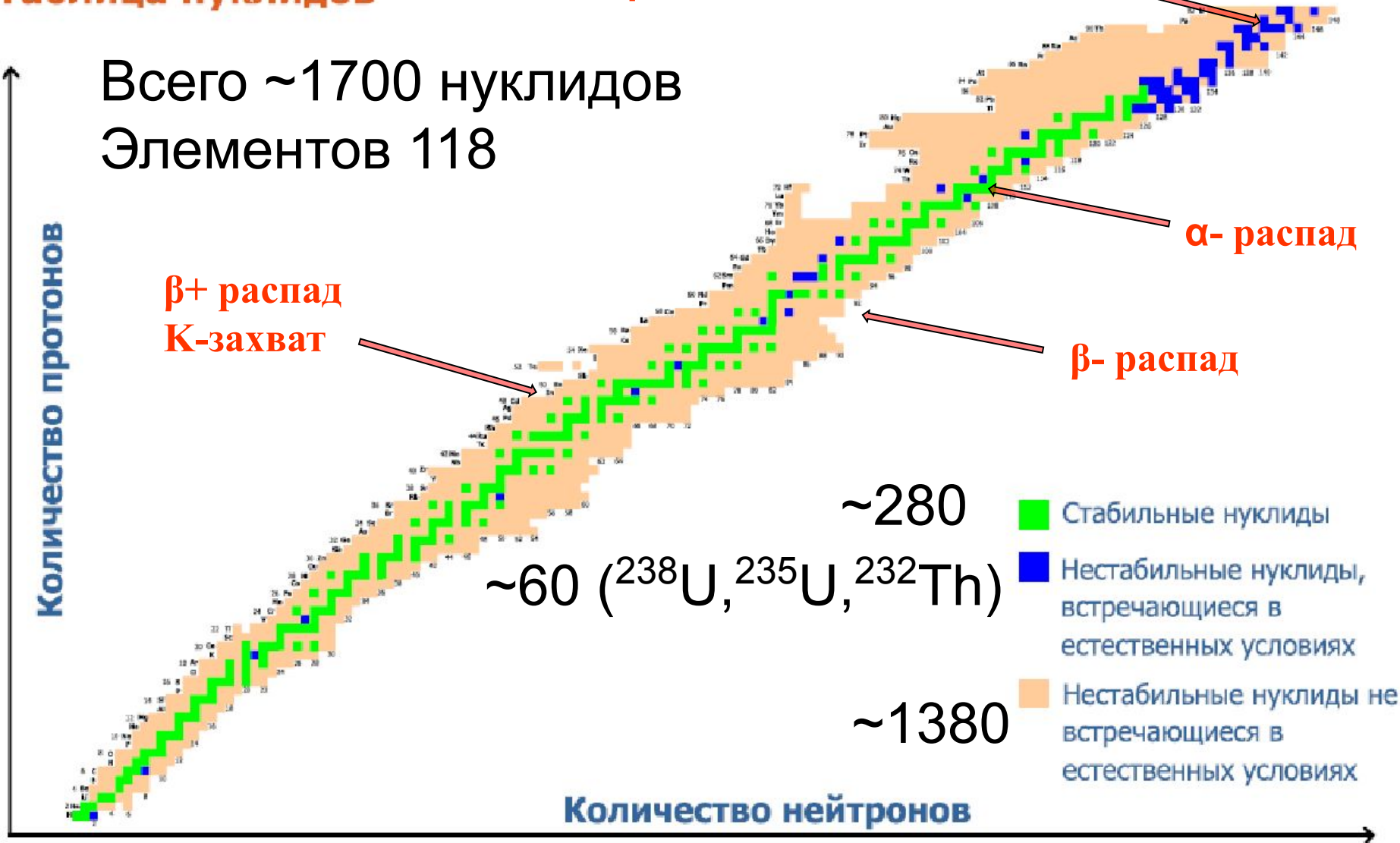
~280

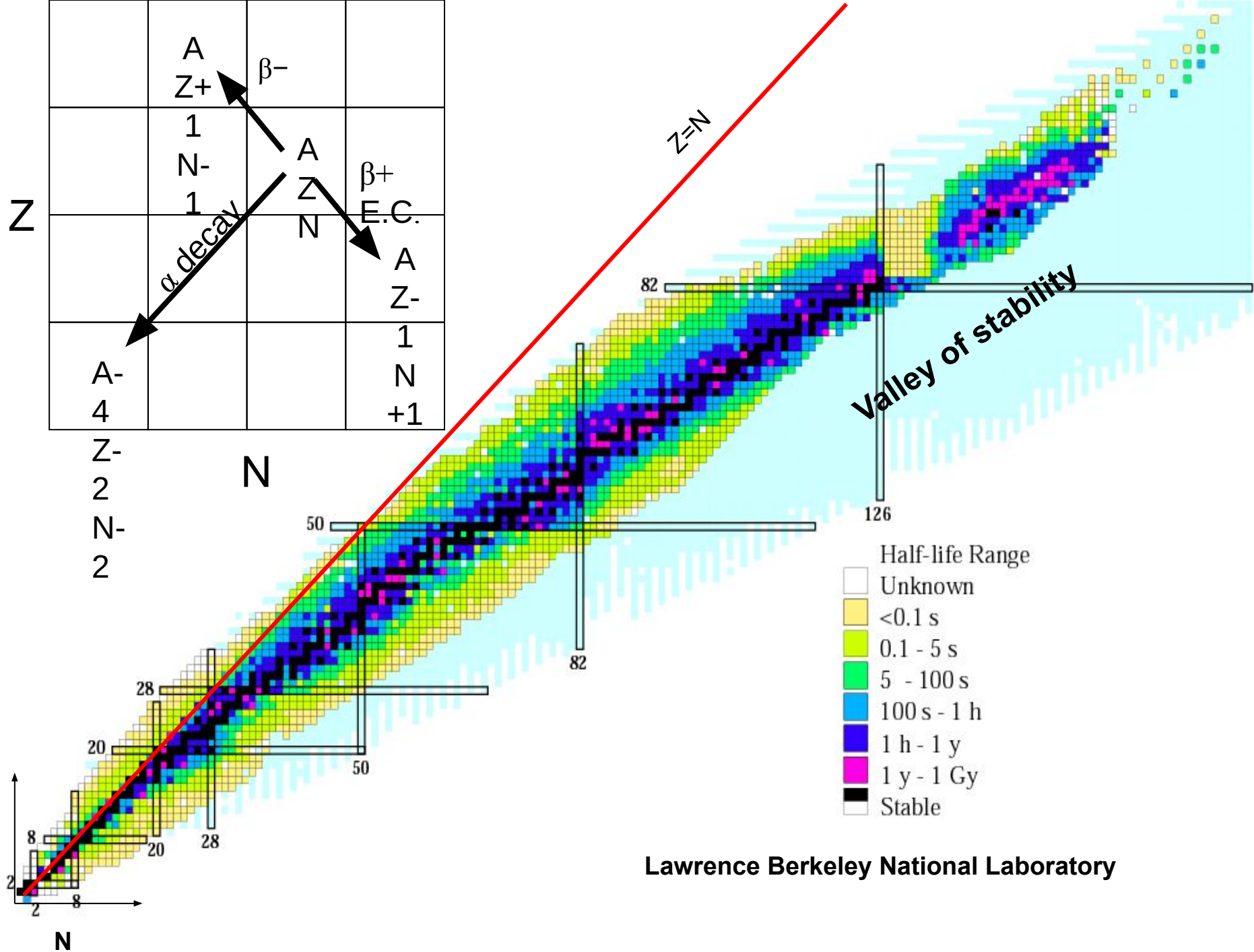
~60 (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th)

~1380

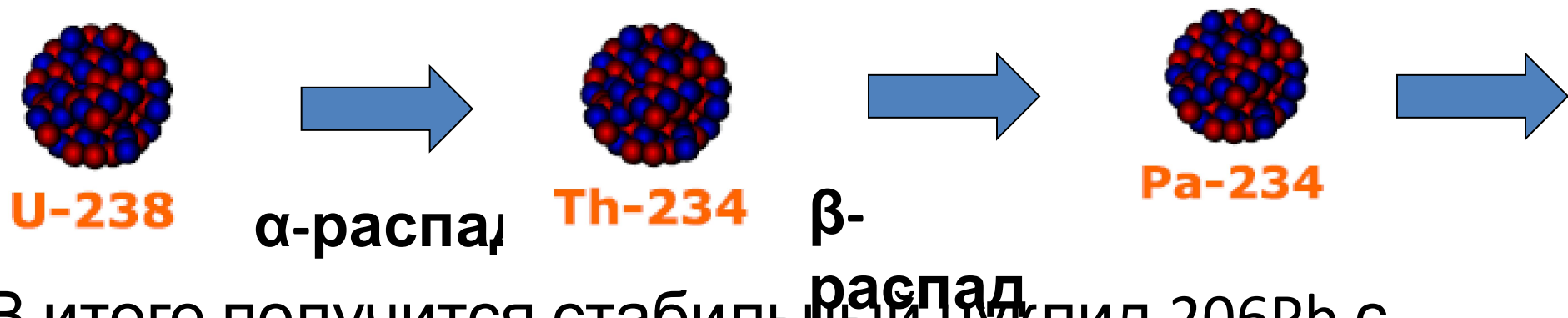
- Стабильные нуклиды
- Нестабильные нуклиды, встречающиеся в естественных условиях
- Нестабильные нуклиды не встречающиеся в естественных условиях

Количество нейтронов





Механизм распада

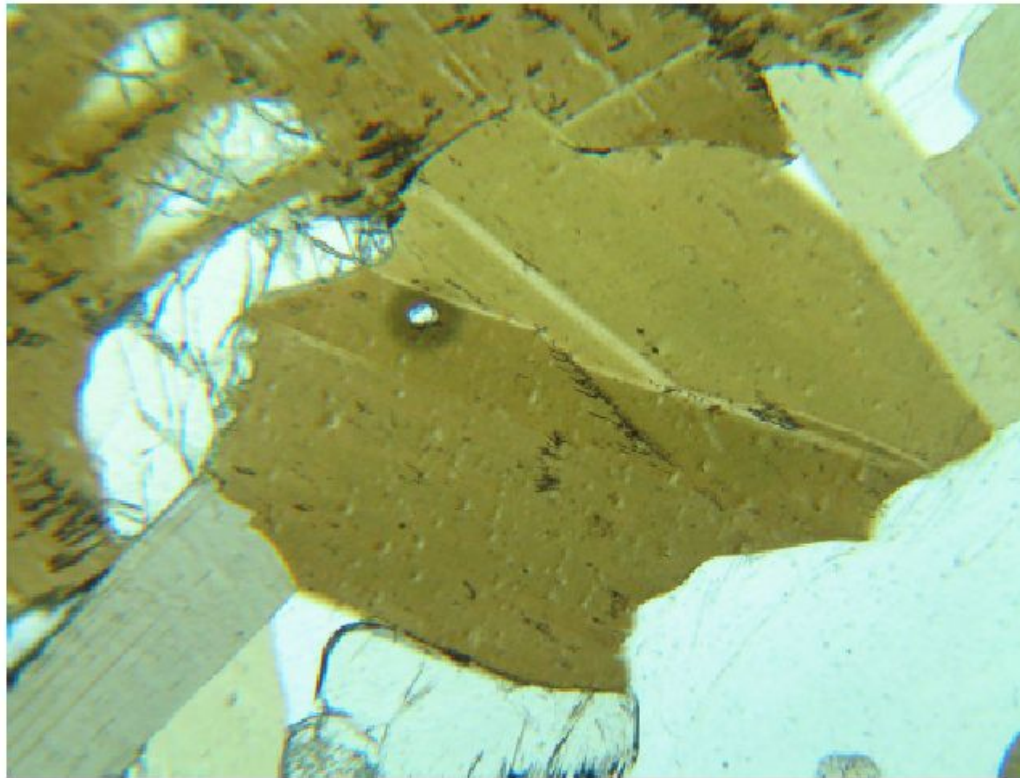


В итоге получится стабильный нуклид ^{206}Pb с испусканием 8 α -частиц и 6 β -частиц. Серии нуклидов: материнский нуклид, промежуточные нестабильные дочерние нуклиды и стабильный дочерний нуклид называются **цепочками распада**.

Существует **разветленный распад** с
об Около 89.5% атомов ^{40}K распадаются с образованием
дс стабильного ^{40}Ca , а 10.5% - с образованием ^{40}Ar .

Radioactive decay - lattice damage

Biotite with a halo around a zircon inclusion



The field of view is about 2 mm

Закон радиоактивного распада

$$-dN/dt \sim N,$$

dN/dt – скорость изменения

числа атомов родительского нуклида

“-” скорость распада уменьшается во времени

$$-dN/dt = \lambda N, \lambda - \text{константа скорости распада}$$

(доля от общего числа атомов, распадающаяся в единицу времени или вероятность того, что атом распадется за определенный промежуток времени)

λN – активность изотопа (число распадов в единицу времени). Чем больше константа, тем быстрее распадается изотоп

Example of exponential decay....



N
(# riders)



D
(# crashers)

Duration of race:

N riders

D crashes

λ = probability of a crash

$$t = \ln (D / N + 1) / \lambda$$

Основное уравнение, описывающее все виды радиоактивного распада

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

N – число радиоактивных родительских атомов, которое осталось к моменту времени t от N₀ - первоначального числа атомов, которое было вначале при t = 0,

λ – константа распада

e – основание натурального логарифма (=2,718)

$$D^* = N_0 - N \Rightarrow D^* = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow D^* = N_0 (1 - e^{-\lambda t}),$$

где D^* - количество радиогенного изотопа.

Обычно удобнее сравнивать D^* с количеством оставшихся родительских изотопов, то есть

$$D^* = N(e^{\lambda t} - 1),$$

В общем случае число атомов дочернего продукта D , присутствующих в системе определяется как $D = D_0 + D^*$, где D_0 – первоначальное число атомов дочернего нуклида, уже имевшееся в системе при $t=0$, D^* - число радиогенных атомов (образовавшихся в системе за счет распада родительского элемента), то есть

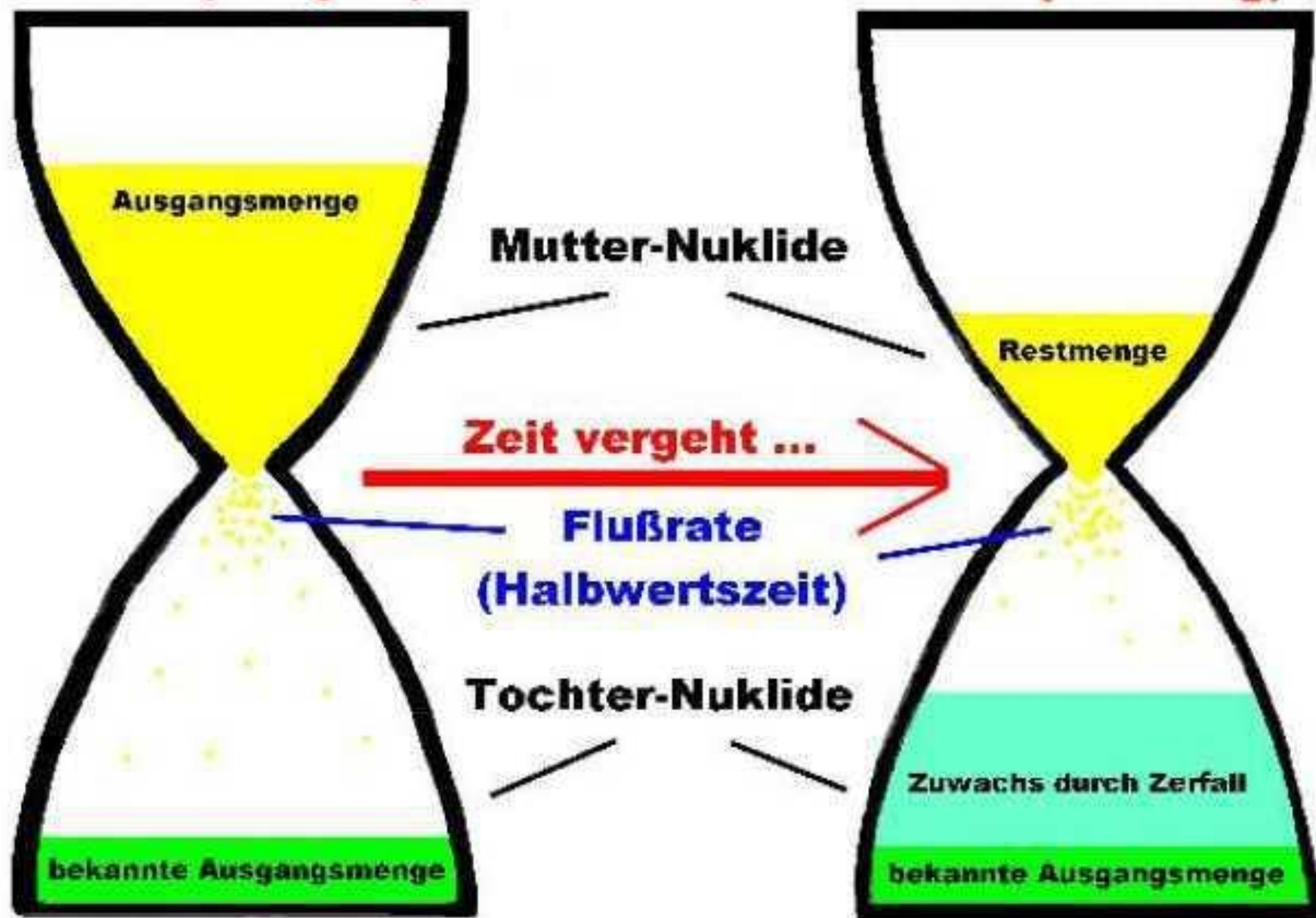
$$D = D_0 + N(e^{\lambda t} - 1)$$

это основное уравнение, используемое для определения возраста пород и минералов.

D и N мы измеряем, D_0 – выбираем либо из общих соображений, либо по соотношениям минералов.

Start (Ereignis)

Ende (Messung)



- **Это справедливо при соблюдении следующих условий:**
 - Система должна быть закрытой, то есть минерал или порода не должны терять ни родительский, ни дочерний нуклиды.
 - D_0 должны быть приписаны реальные значения
 - Константа распада должна быть точно известна
 - D и N должны быть измерены с достаточной точностью, а полученные значения представительными по отношению к породе или минералу
- Мы всегда получаем датировку при решении уравнения, но возрастом она становится только при соблюдении этих условий и когда это имеет геологический смысл

Как вычислить возраст минерала (породы)?

$$D = N(e^{\lambda t} - 1)$$

$$\lambda = 0.693/T_{1/2}$$

$$D = N(e^{\lambda t} - 1)$$

$$\Rightarrow e^{\lambda t} = (D/N) + 1$$

$$\Rightarrow \lambda t = \ln [(D/N) + 1]$$

$$\Rightarrow t = \frac{\ln [(D/N) + 1]}{\lambda}$$

N – материнский радиоактивный нуклид

D – стабильный дочерний радиогенный нуклид

t – время с момента образования минерала

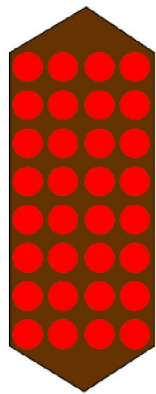
λ - константа распада

T_{1/2} – период полураспада

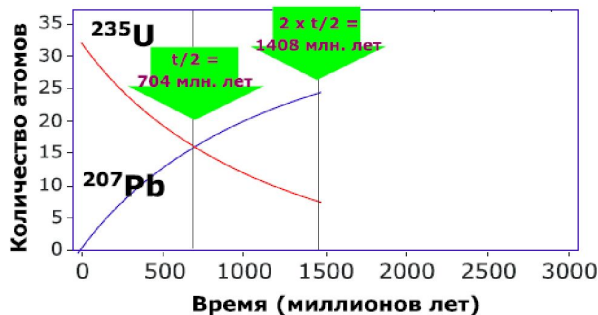
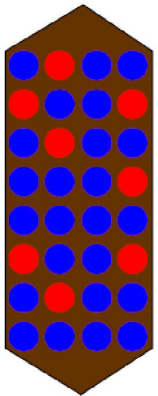
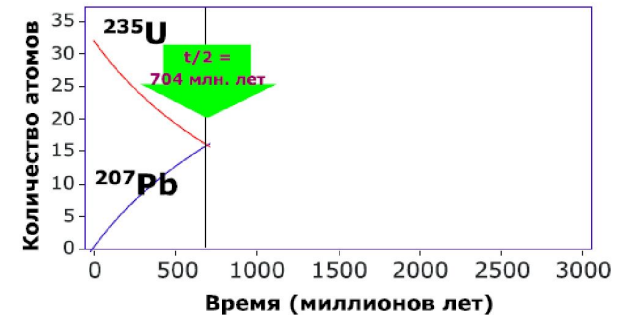
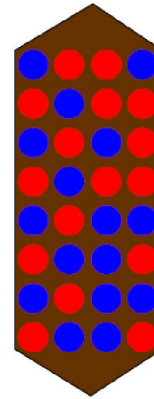
Вычисленный возраст является истинным, только если минерал (порода) представлял собой все это время **закрытую химическую систему** (обмена атомами (естественная миграция элементов) материнского и дочернего нуклидов между кристаллом и окружающей средой после его образования не было) и **не содержал атомов**

$$\text{age} = \ln(1 + D/N) / \lambda$$

Период полураспада – это время, в течение которого распадается половина атомов данного изотопа ($t_{1/2}$)



^{235}U $t_{1/2} = 704 \text{ Ma}$

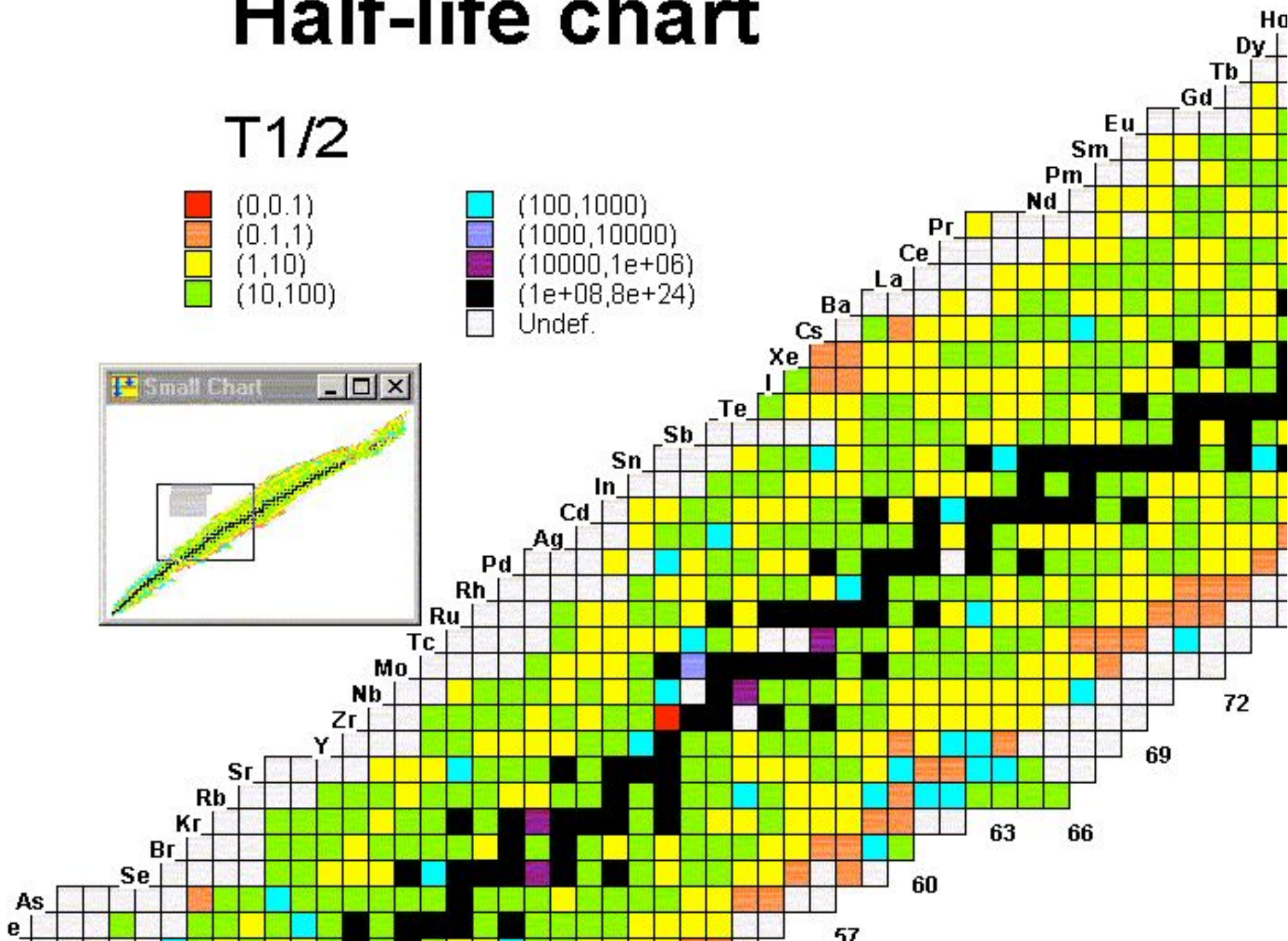
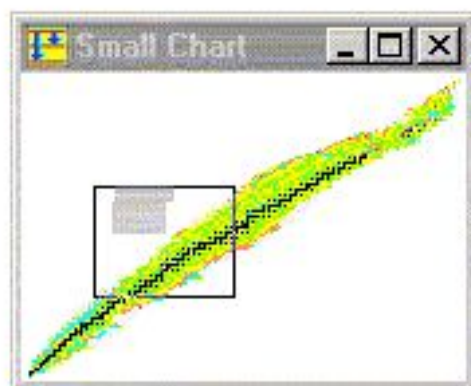
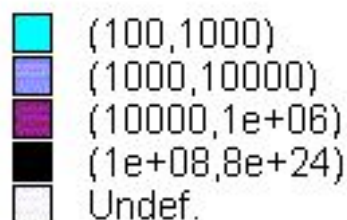
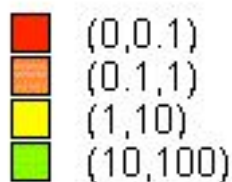


Через четыре периода полураспада ($= 2816$ млн. лет) количество атомов ^{235}U уменьшилось на 50% четыре раза. Осталось только 2 атома. Количество атомов ^{207}Pb соответственно увеличилось. Период полураспада радиоактивного нуклида является мерой скорости его распада. Если мы измерим содержание в минерале радиоактивного нуклида (например, ^{235}U) и его дочернего нуклида (^{207}Pb), и если мы знаем скорость распада радиоактивного нуклида, мы можем рассчитать время, прошедшее с момента образования минерала.

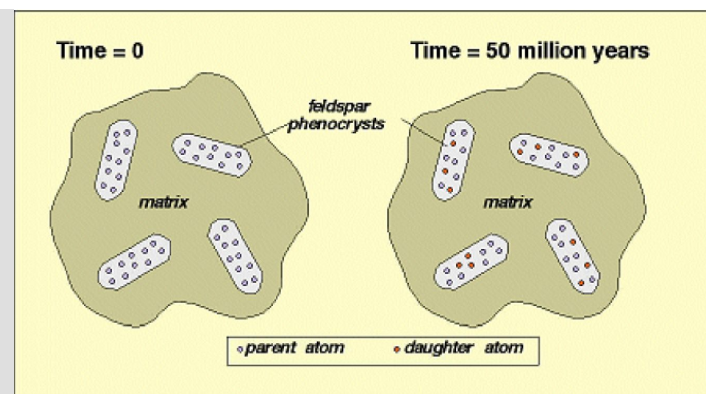
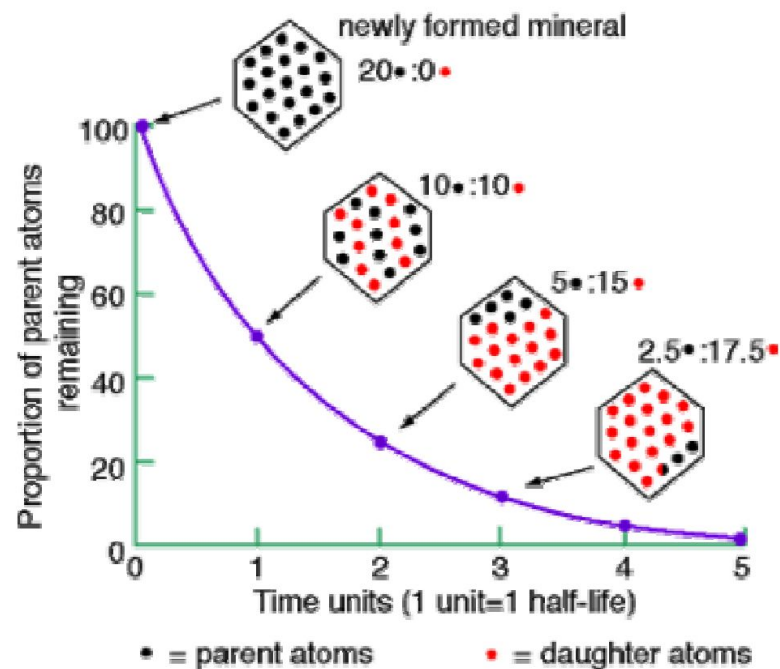
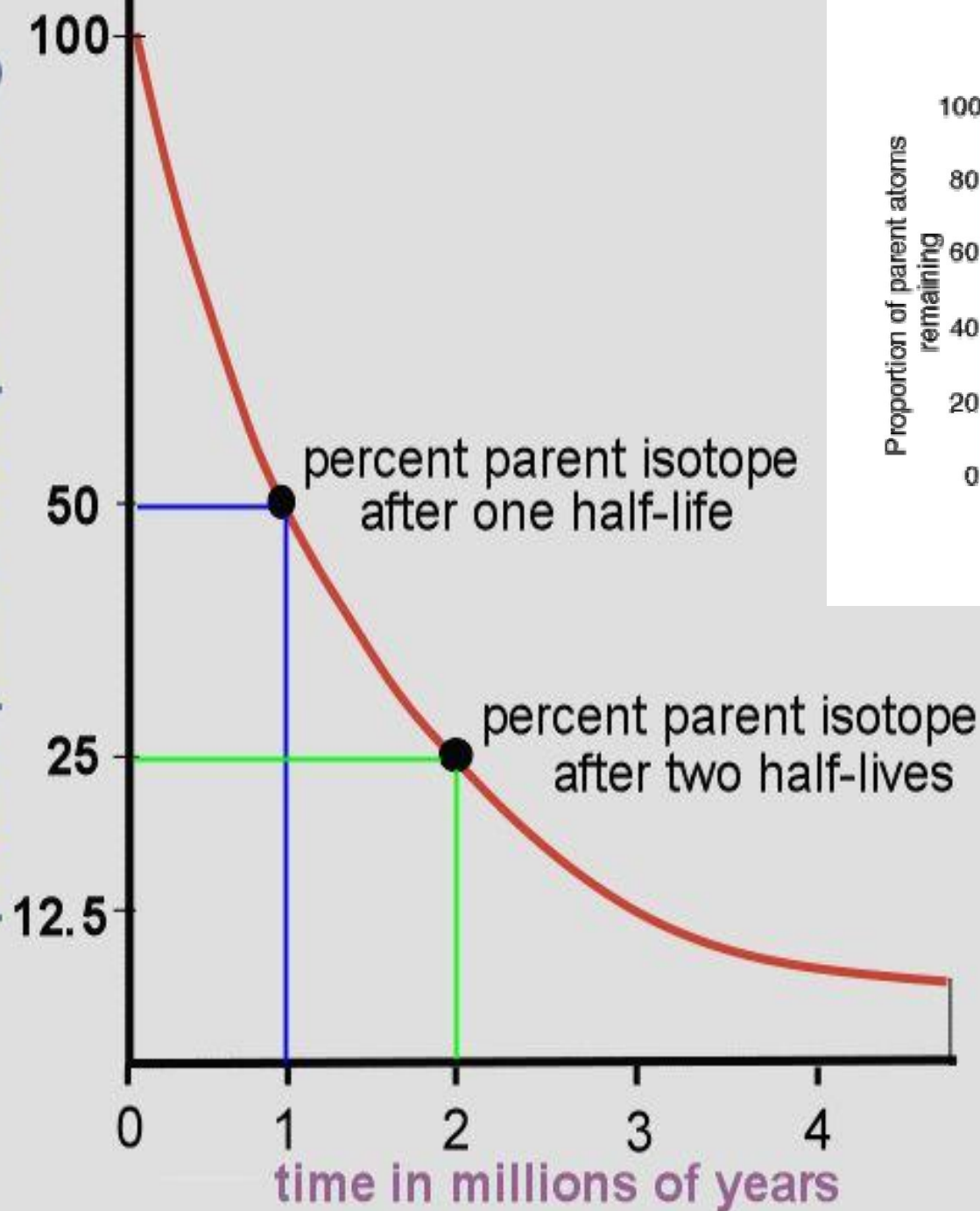
Через 10 периодов полураспада материнского изотопа не остается!!!

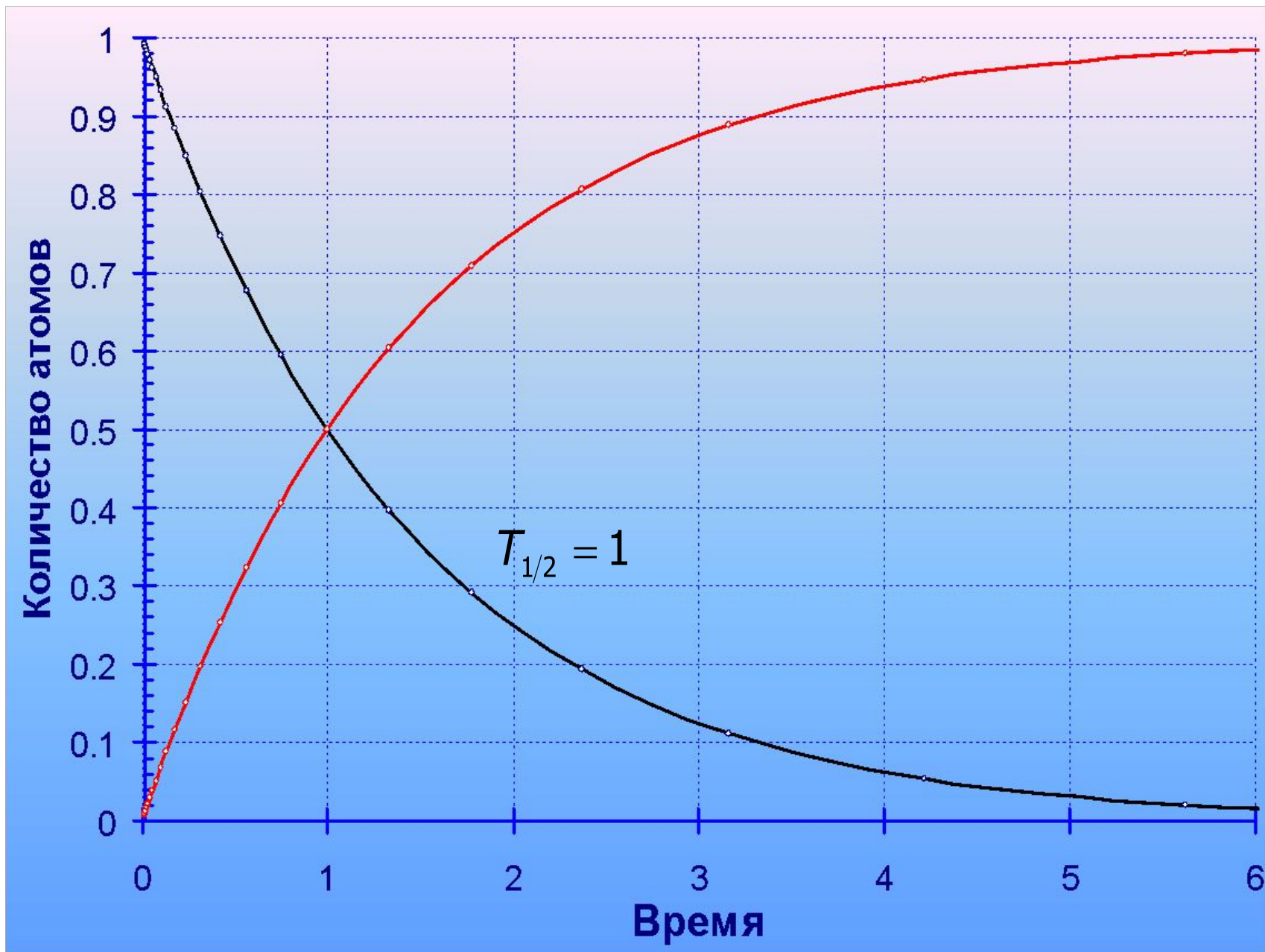
Half-life chart

T1/2



percent parent isotope remaining





Цепочки радиоактивных превращений

$$N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2} N_3 \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

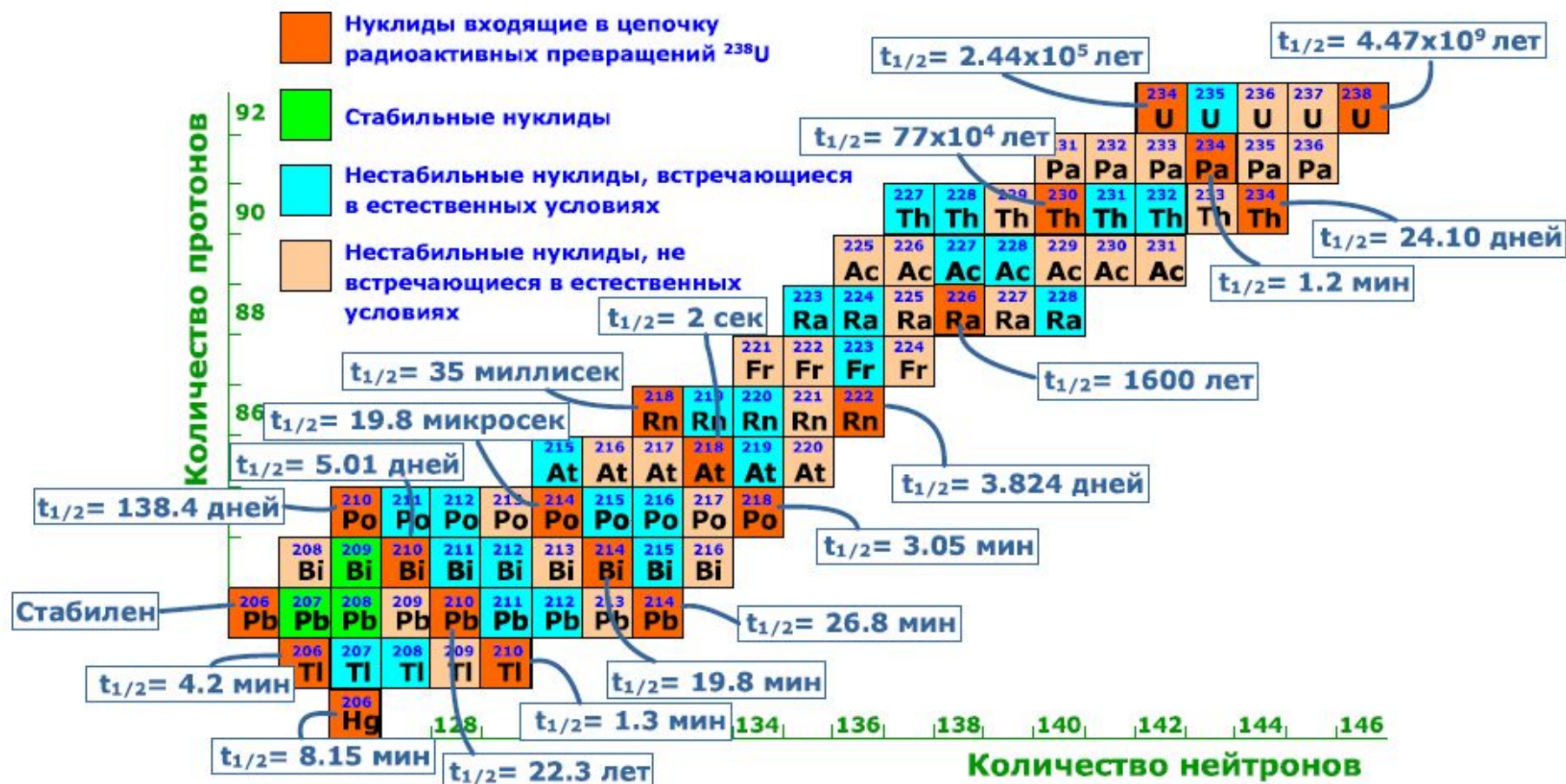
$$N_1 = N_1^0 \exp(-\lambda_1 t), \quad \text{где } N_1^0 = N_1 \text{ при } t = 0$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^0 \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_2 N_2$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] + N_2^0 \exp(-\lambda_2 t)$$

если $N_2^0 \neq 0$

Дочерние продукты распада ^{238}U и секулярное равновесие



Периоды полураспада радиоактивных нуклидов, принадлежащих к цепочке радиоактивных превращений ^{238}U , очень сильно отличаются друг от

друга. Однако, обратите внимание, что период полураспада ^{238}U значительно превышает периоды полураспада остальных нуклидов в этой цепочке.

Изотопные системы, используемые в геохронологии

- **U-Th-Pb** $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$
- **Rb-Sr** $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \beta^-$
- **Sm-Nd** $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd} + \alpha$
- **Lu-Hf** $^{176}\text{Lu} \rightarrow ^{176}\text{Hf} + \beta^-$
- **Re-Os** $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os} + \beta^-$
- **K-Ar** $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \beta^+$
- **K-Ca** $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + \beta^-$
- **Радиоуглерод**
- **Pt-Os, U-Th-He и др.**