



**Изотопная геология**  
**(введение)**

**Кирилл Игоревич Лохов**

СПбГУ, ИЦ ВСЕГЕИ

**Ольга Валентиновна Якубович**

СПбГУ, ИГГД РАН

**Валерий Михайлович Саватенков**

СПбГУ, ИГГД РАН

## **Приблизительный план занятий.**

11 февр - введение. В.М. Саватенков.

18 февр - изотопная масспектрия К.И. Лохов

25 февр - K-Ar, U-He, Pt-He. О.В. Якубович

3 марта - геохимия изотопов благородных газов. К.И. Лохов.

10 марта - Rb-Sr, изохронная модель. В.М. Саватенков.

17 марта - Sm-Nd Lu-Hf, Re-Os. В.М. Саватенков.

24 марта - геохимия радиогенных изотопов Nd, Sr. В.М. Саватенков.

31 марта - U-Pb-Th классика, геохимия изотопов свинца. В.М. Саватенков.

7 апреля - Локальные методы. К.И. Лохов.

14 апреля - радиоуглерод и другие космогенные. К.И. Лохов.

21 апреля - геохимия стабильных изотопов. К.И. Лохов.

## **Экзамены**

# Литература

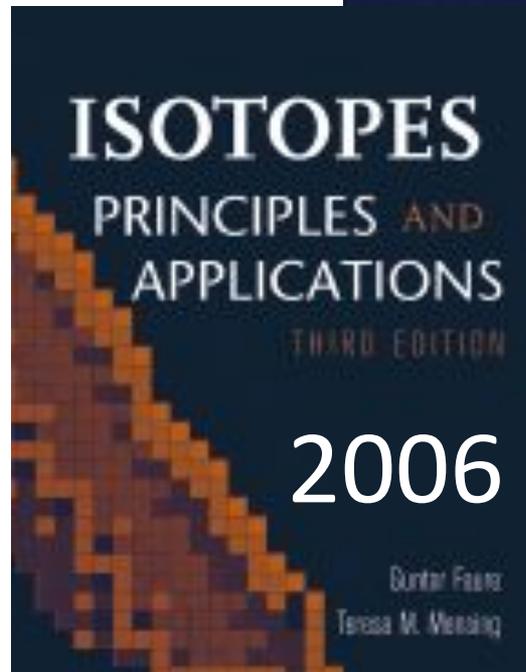
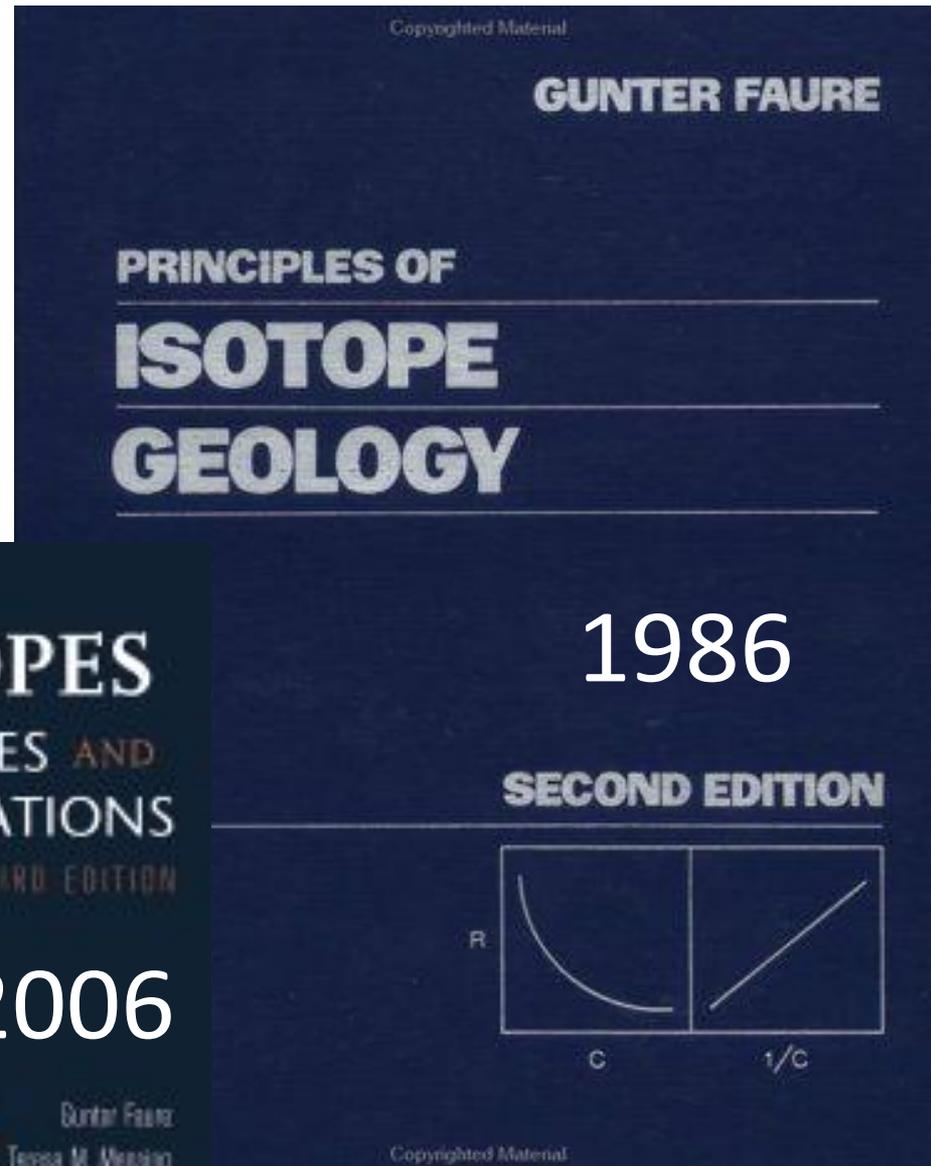
Г.ФОР

## ОСНОВЫ ИЗОТОПНОЙ ГЕОЛОГИИ

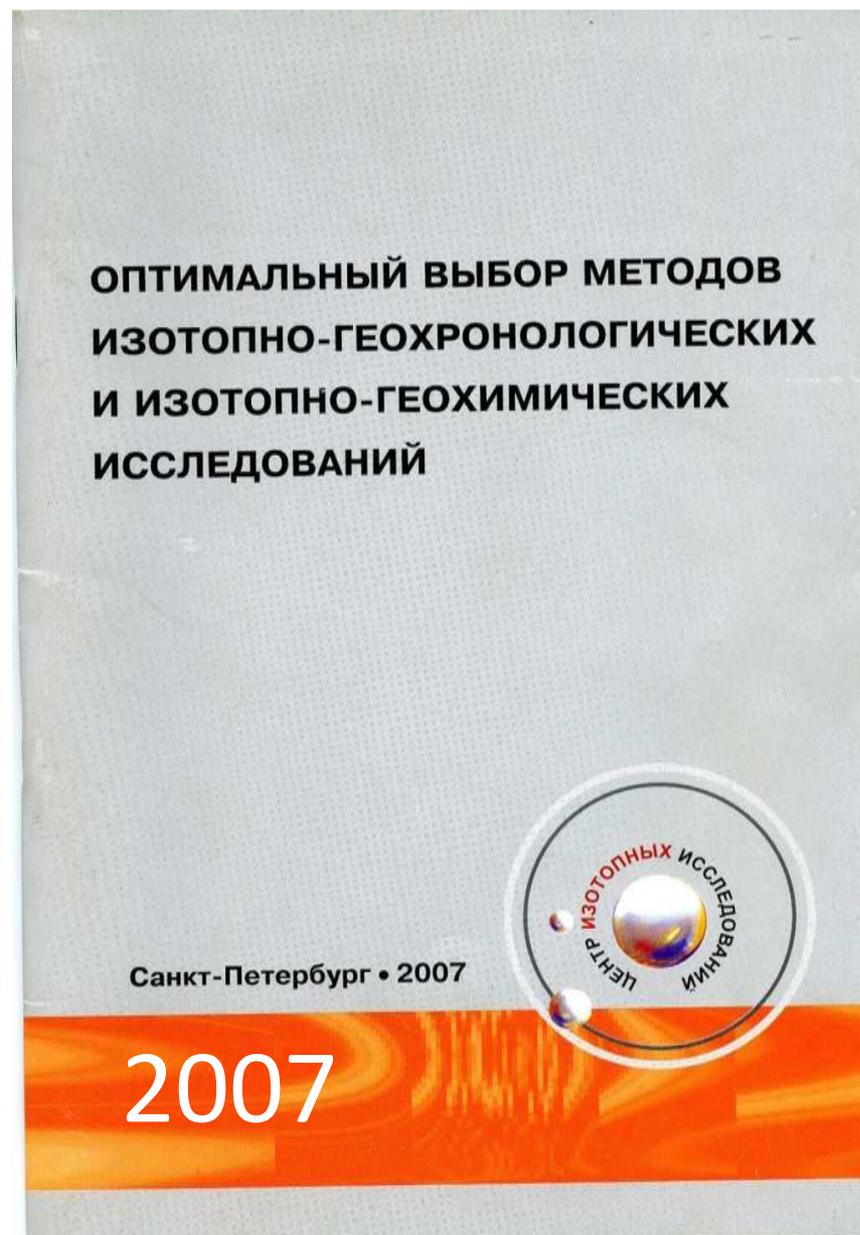
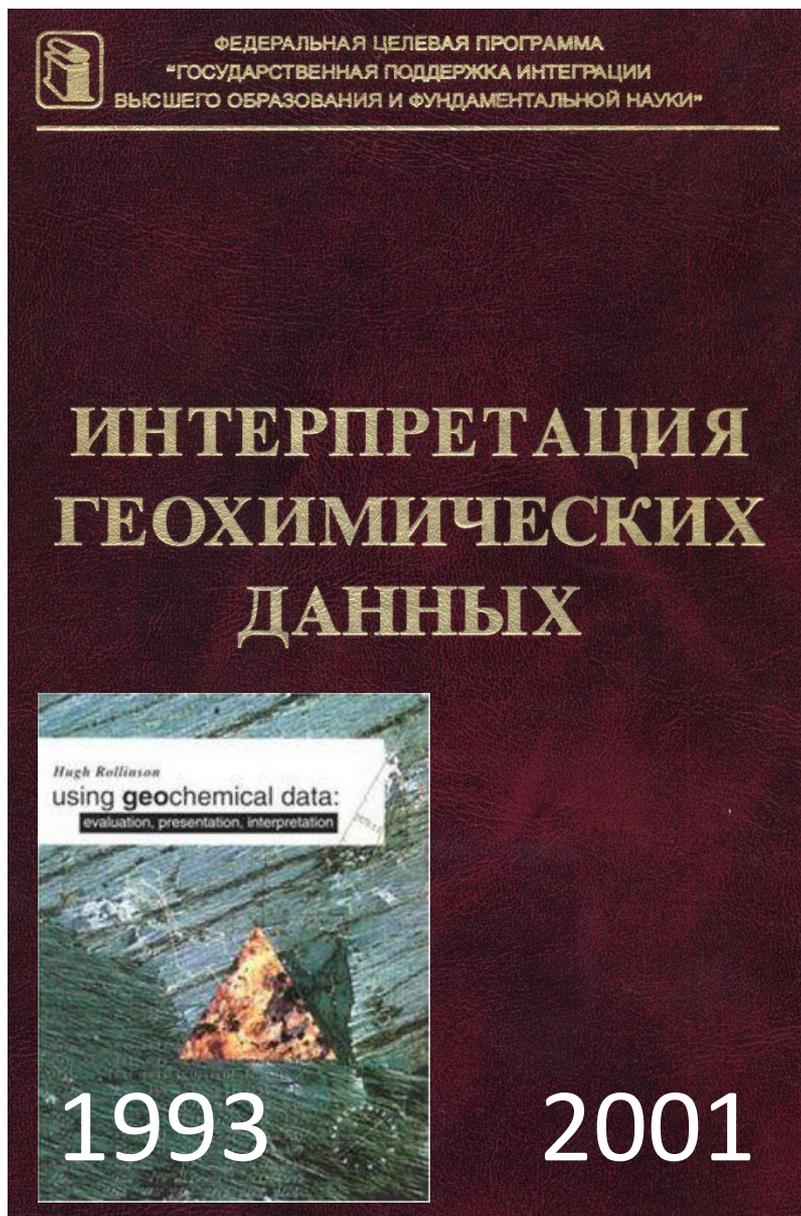
Перевод с английского  
д-ра геол.-мин. наук  
И. М. ГОРОХОВА  
и д-ра хим. наук  
Ю. А. ШУКОЛЮКОВА



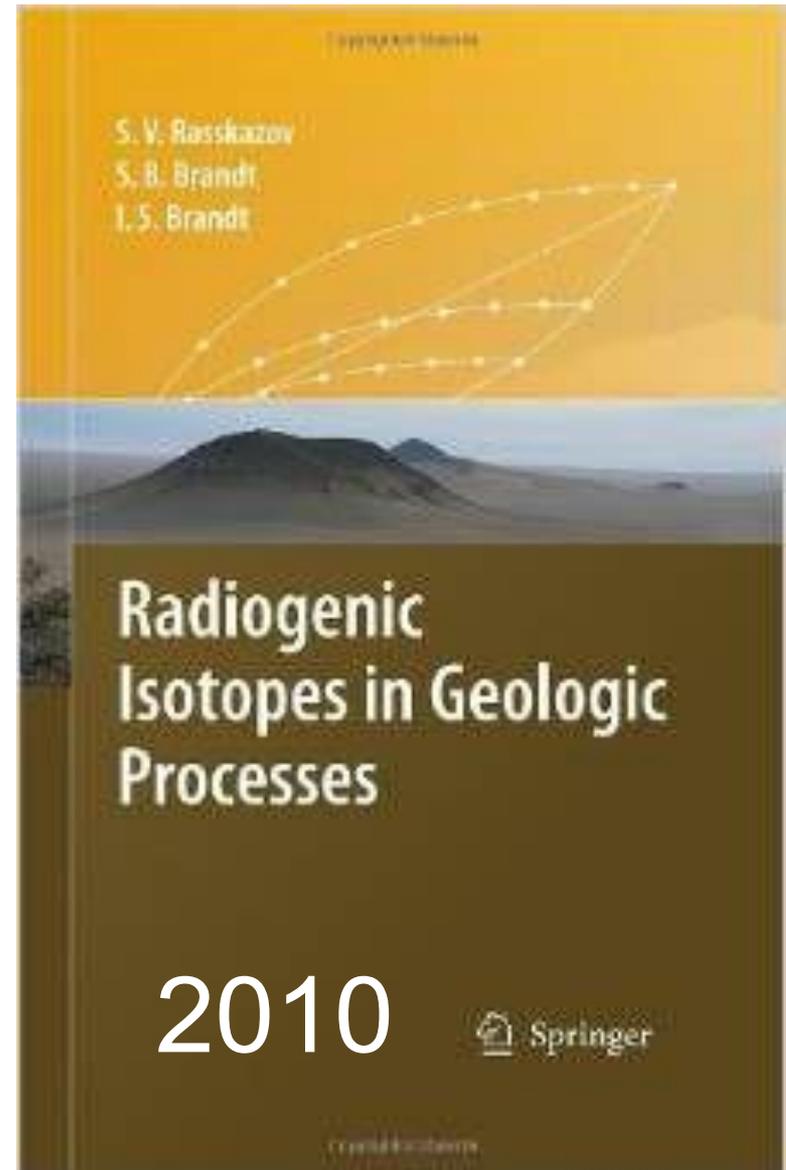
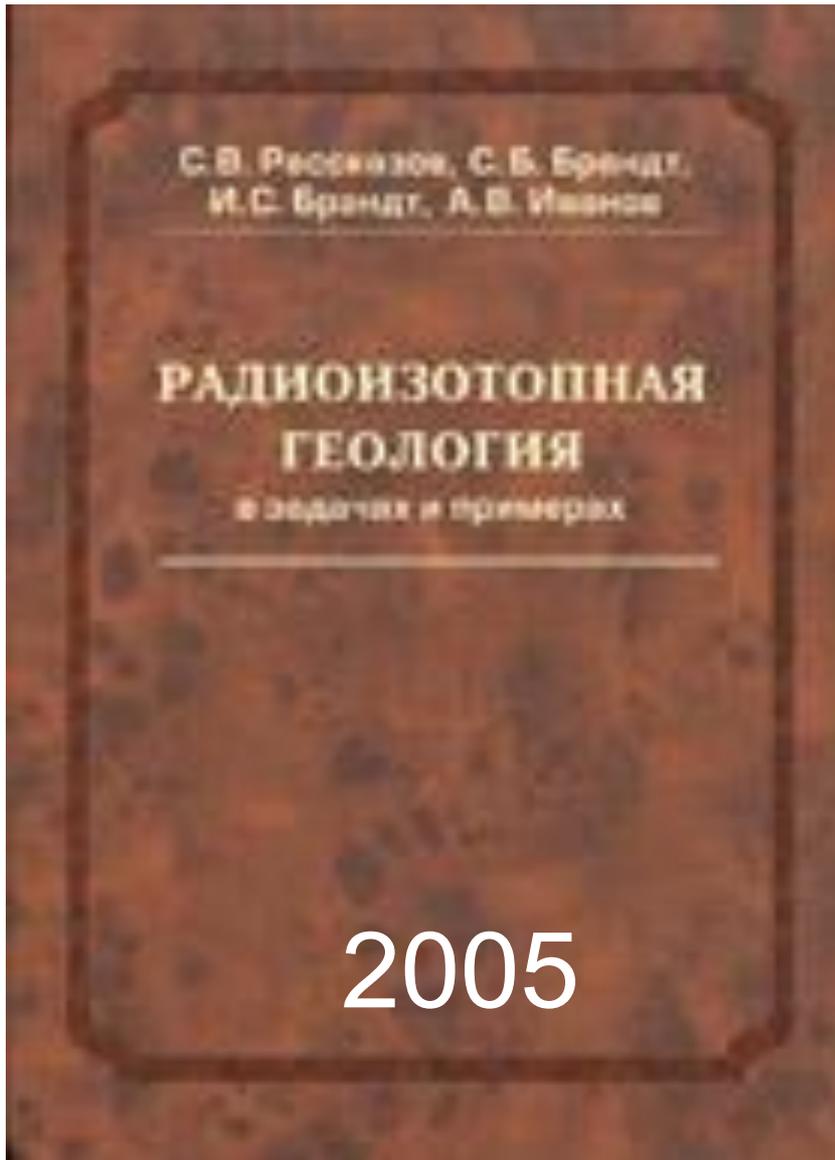
Москва «Мир» 1989



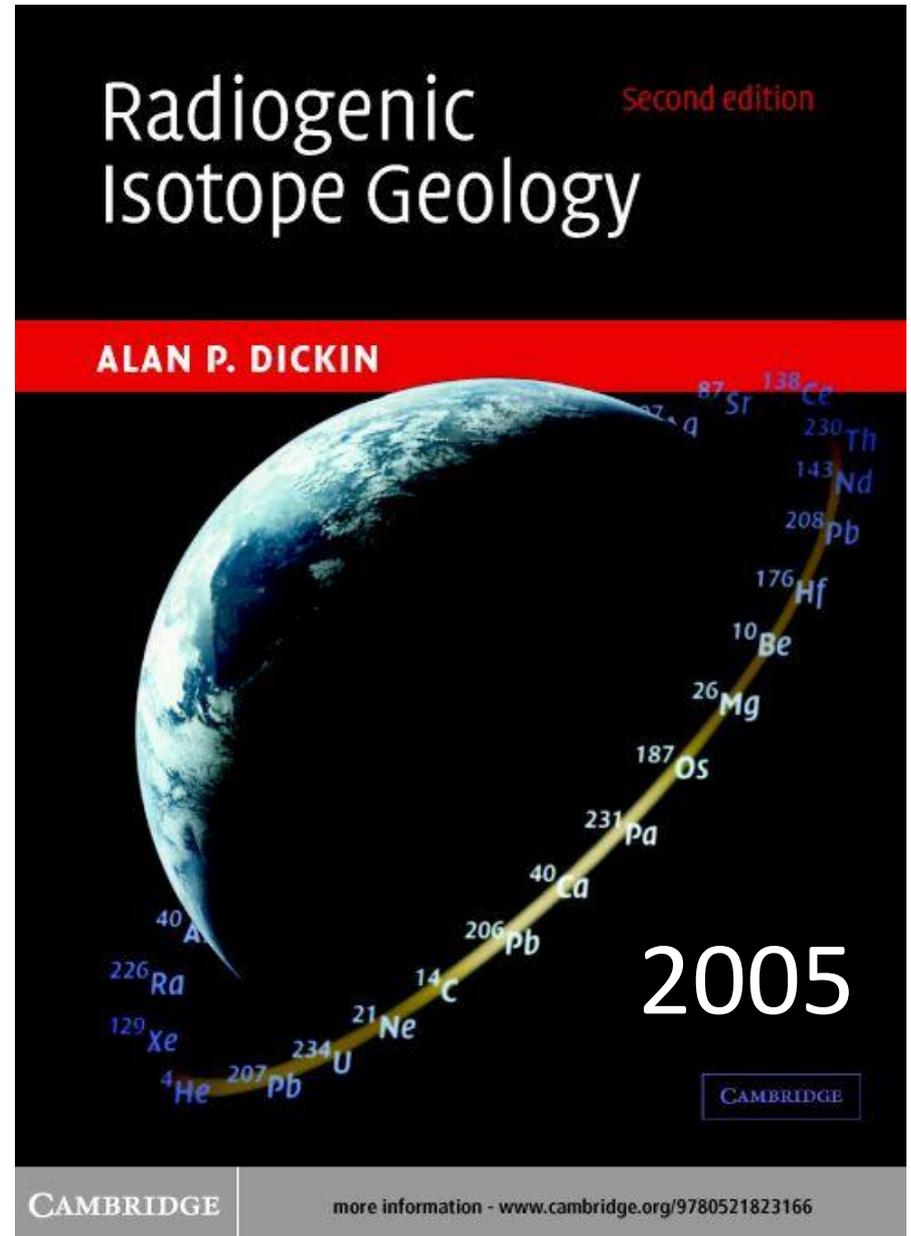
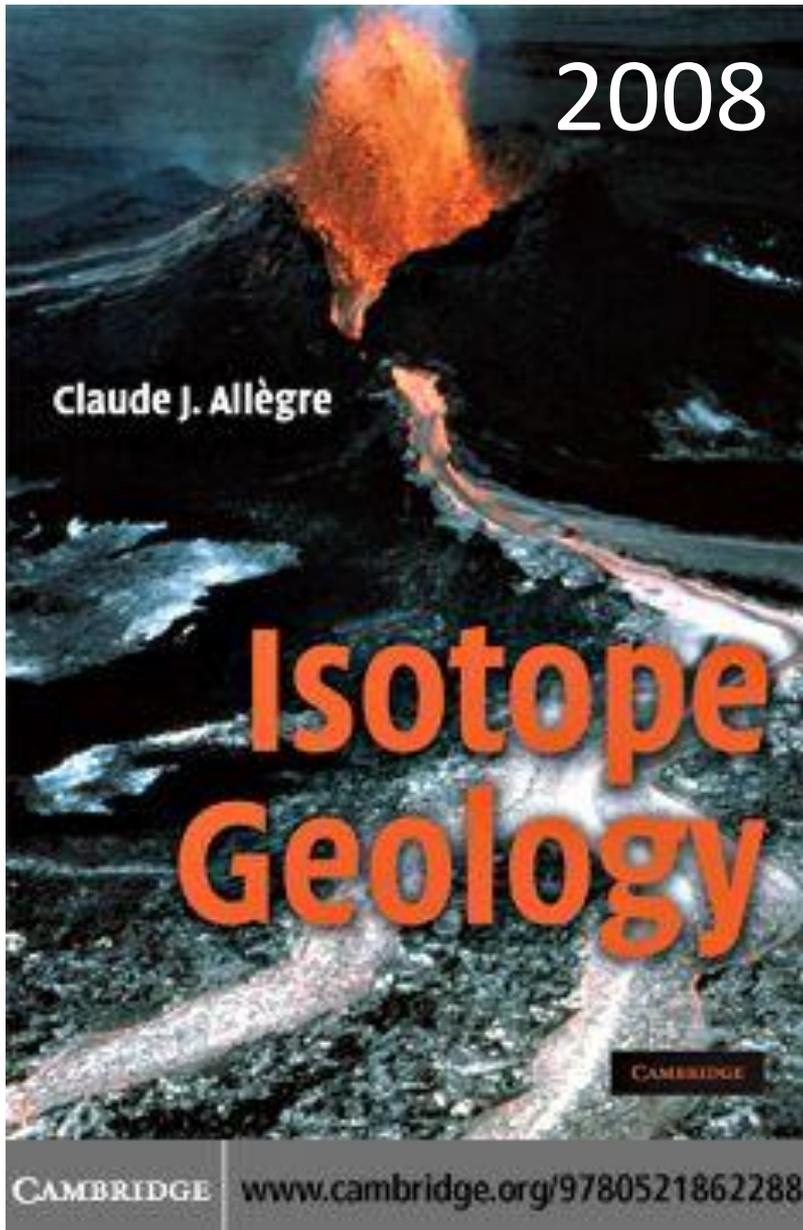
# Литература



# Литература



# Литература

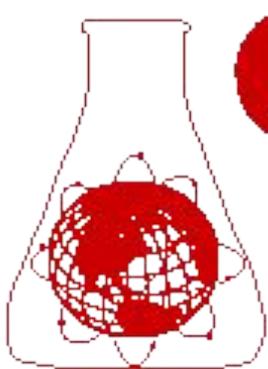


# Литература



**Geochemistry**  
William M. White  
**2013**

WILEY-BLACKWELL



**GEOCHEMISTRY**

by

**William M. White**  
Cornell University

*An On-Line Textbook, Eventually to be  
published by:* **John-Hopkins University Press**

**Isotope Geochemistry**

**Atoms and Nuclei: Their Physics and Origins**

**Chapter I**

**Spring 2011**



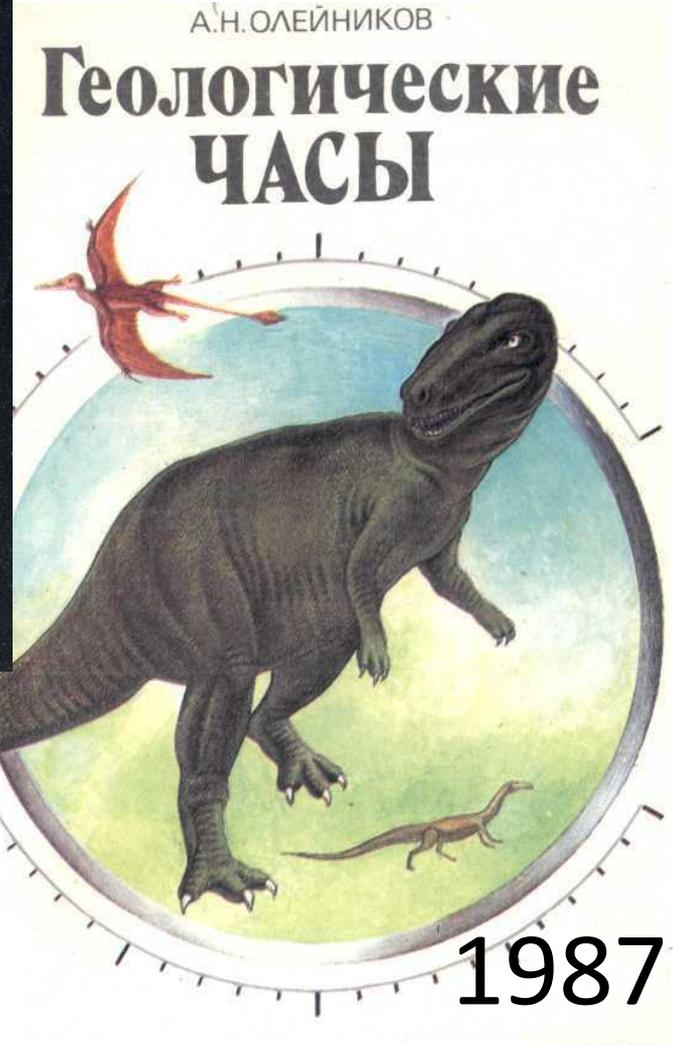
**ISOTOPE  
GEOCHEMISTRY**

William M. White

**2015**

WILEY Blackwell

# Литература



# Литература

Г. А. Вагнер

Научные методы  
датирования в геологии,  
археологии и истории

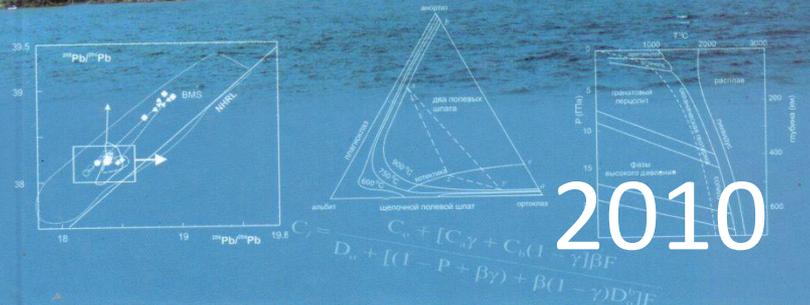


 ТЕХНОСФЕРА

2006

Ю.А. Мартынов

ОСНОВЫ  
МАГМАТИЧЕСКОЙ  
ГЕОХИМИИ



2010

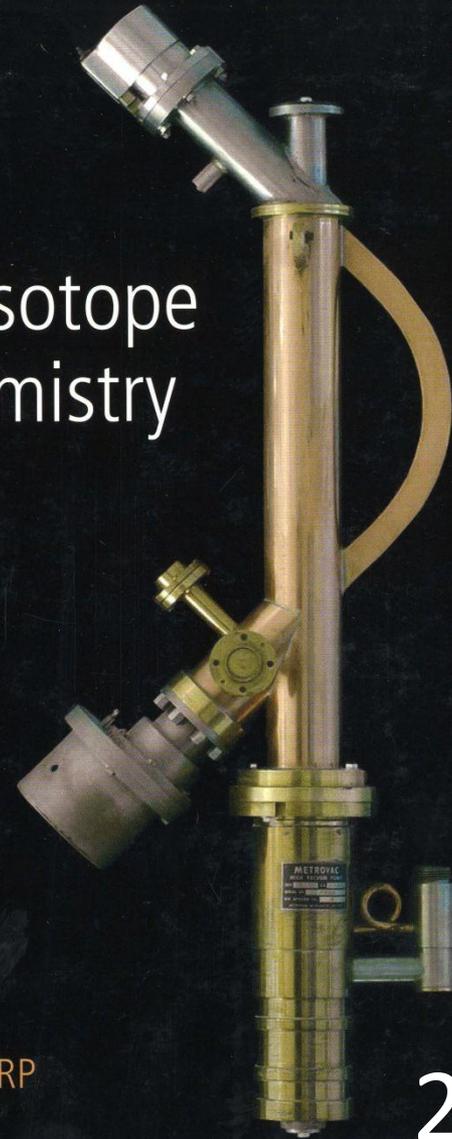
# Литература

Й. ХЁФС

## ГЕОХИМИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ

1983

## Principles of Stable Isotope Geochemistry



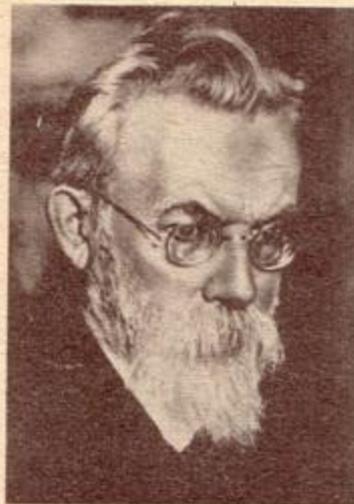
ZACHARY SHARP

2007

«лекции on-line» К.Куллеруда (перевод на русский)

<http://ansatte.uit.no/webgeology/>

**Изотопная геология – наука о происхождении и распространённости изотопов в природе, их распределении и поведении в различных геологических процессах, об использовании изотопов в решении теоретических и прикладных проблем геологии.**



Нет ничего в мире сильнее  
свободной научной мысли.

*Д. И. Менделеев*

# ИЗОТОПНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Вариации изотопного состава, вызванные **радиоактивным распадом**

Вариации изотопного состава, вызванные **фракционированием (разделением) изотопов стабильных элементов**

Изотопная геохронология

Геохимия радиогенных изотопов

Геохимия стабильных изотопов

Измерение времени, термохронология

Использование изотопов как генетических критериев при изучении строения и эволюции геосфер, как индикаторов миграции вещества в системе мантия-Кора-гидросфера-атмосфера.

Использование изотопов как генетических «меток» вещества, индикаторов миграции, палеотермометров, в реконструкции физико-химических условий геологических процессов

## А) Попытки измерять абсолютное время

Геродот, V в. до н.э. – *определение возраста осадочных пород р.Нил:*

$t=h/v$ , где  $h$  – толщина отложений,  $v$  – предполагаемая скорость осадконакопления

Епископ Ашшер, Англия, 1650 г.– *из анализа Библии: возраст Земли 4004 г. до н.э.*

И.Ньютон, Англия– *из анализа Библии: возраст Земли ≈4300 г. до н.э.*

Галлей, Англия (1656-1742) – *определение возраста мирового океана:*

$t=h/v$ , где  $h$  – количество соли в океане,  $v$  – предполагаемая скорость растворения соли из пород. **Возраст океана ≈100 тыс. лет**

Бюффон, Франция, 1779 г. – *моделирование времени остывания Земли с помощью нагретых пушечных ядер:  $t=(T_0-T_1)/w$ , где  $T_0$  и  $T_1$  – начальная и конечная температура,  $w$  – скорость остывания. **Возраст Земли ≈75 тыс. лет***

Разные исследователи, XIX в. – *расчеты возраста пород по скорости*

*осадконакопления и толщине отложений осадочных пород:  $t=h/v$ , где  $h$  – толщина отложений,  $v$  – предполагаемая скорость осадконакопления. **Возраст пород 300 млн.- 1 млрд лет***

Кельвин, Англия, конец XIX в. – *термодинамический расчет времени остывания до современной  $T$  изначально раскаленной Земли:  $t=(T_0-T_1)/w$ , где  $T_0$  и  $T_1$  – начальная и современная температура,  $w$  – скорость остывания. **Возраст Земли 25-100 млн. лет.***

# ПРЕЖНИЕ ПОПЫТКИ РАЗРАБОТАТЬ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ:

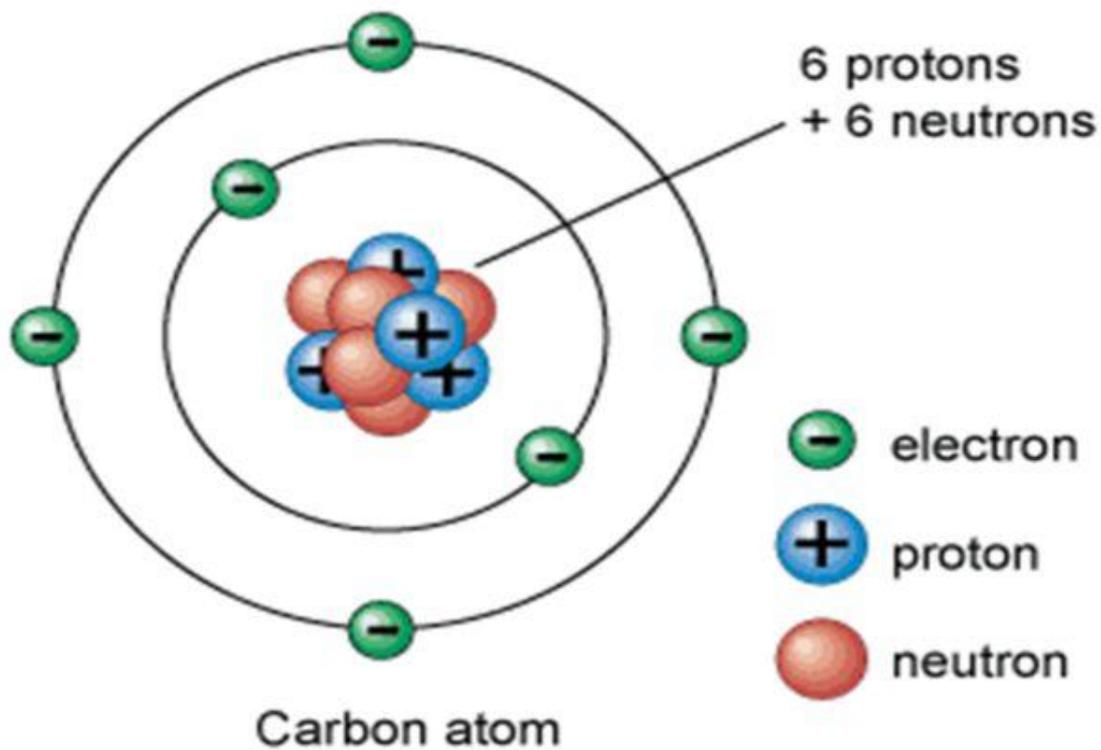
Б) Установление *относительной* последовательности событий

Ж. Кювье ( 1769-1832 г.г)		Франция	
А.Броньяр ( 1769-1839 г.г)			
Ч.Лайель ( 1797- 1875 г.г)			
Э.Эйхвальд ( 1768-1833 г.г)			Россия
Смит (1779-1839 г.г)			Англия

## Первая геохронологическая шкала (середина XIX в.):

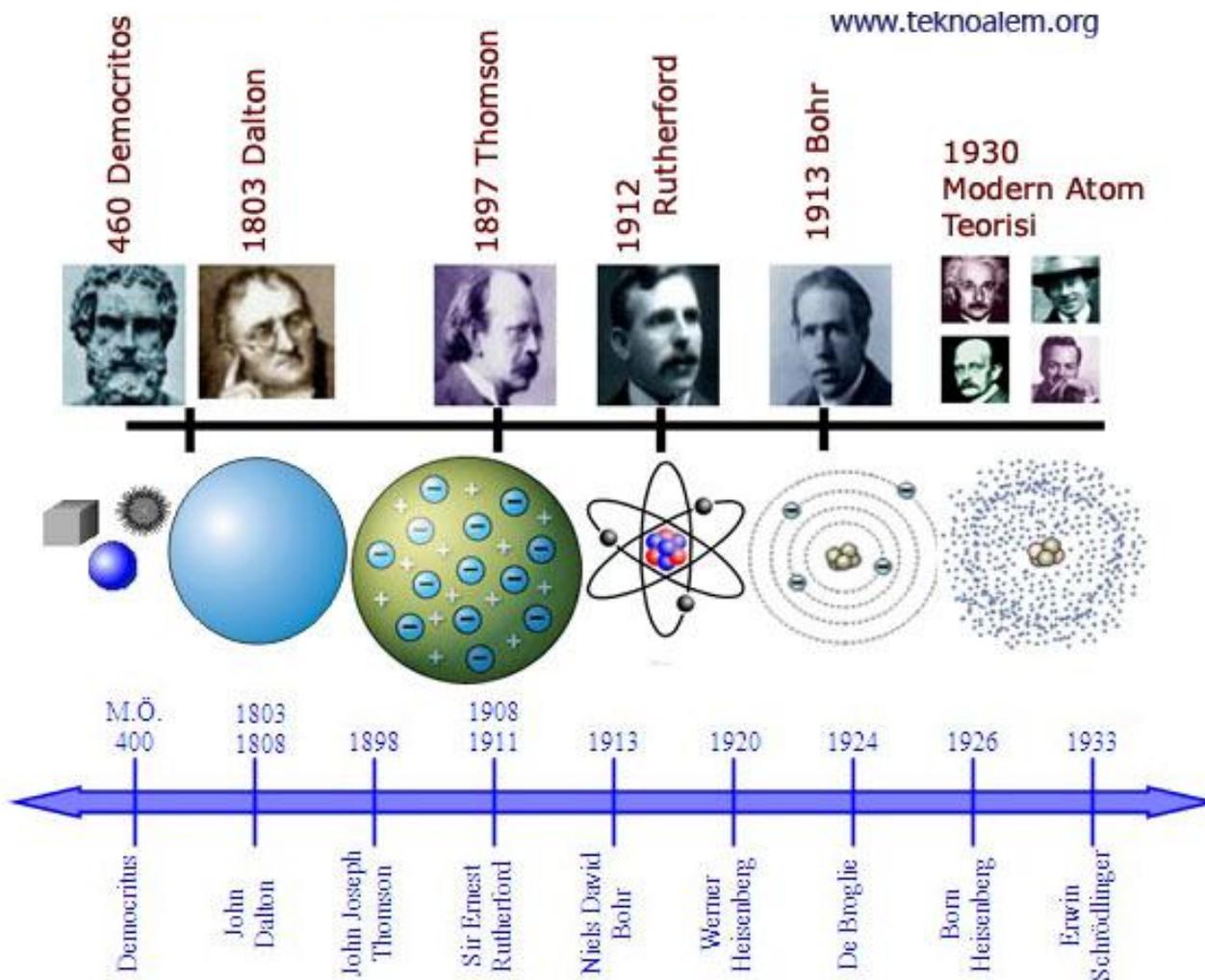
<u>Эры</u>	<u>Периоды</u>
Кайнозой	<i>Антропоген</i>
	<i>Неоген</i>
	<i>Палеоген</i>
Мезозой	<i>Мел</i>
	<i>Юра</i>
	<i>Триас</i>
Палеозой	<i>Пермь</i>
	<i>Карбон</i>
	<i>Девон</i>
	<i>Силур</i>
Протерозой	<i>Ордовик</i>

# Строение атома

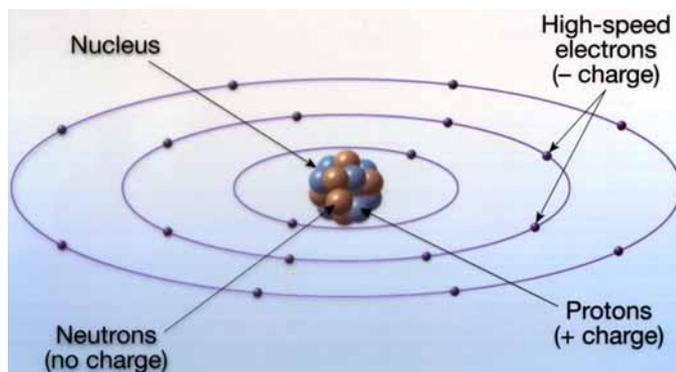


# Строение атома.

## Эволюция представлений о строении атома.



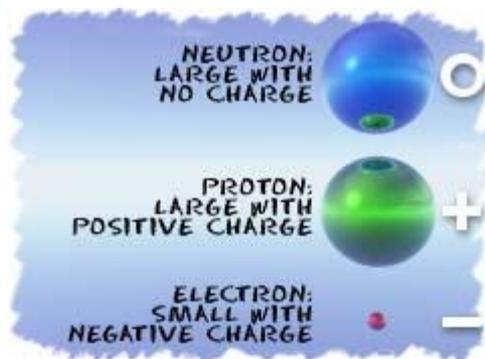
# Строение атома.



Атомы состоят из положительно заряженного ядра и оболочки отрицательно заряженных электронов.

Ядро состоит из нуклонов – элементарных частиц: положительно заряженных протонов и нейтронов.

Масса нуклона отвечает одной атомной единице массы (АЕМ)



нейтрон –  $1,675 \times 10^{-24}$  г

протон -  $1,673 \times 10^{-24}$  г

электрон -  $9.109 \times 10^{-28}$  г

# Структура атома.

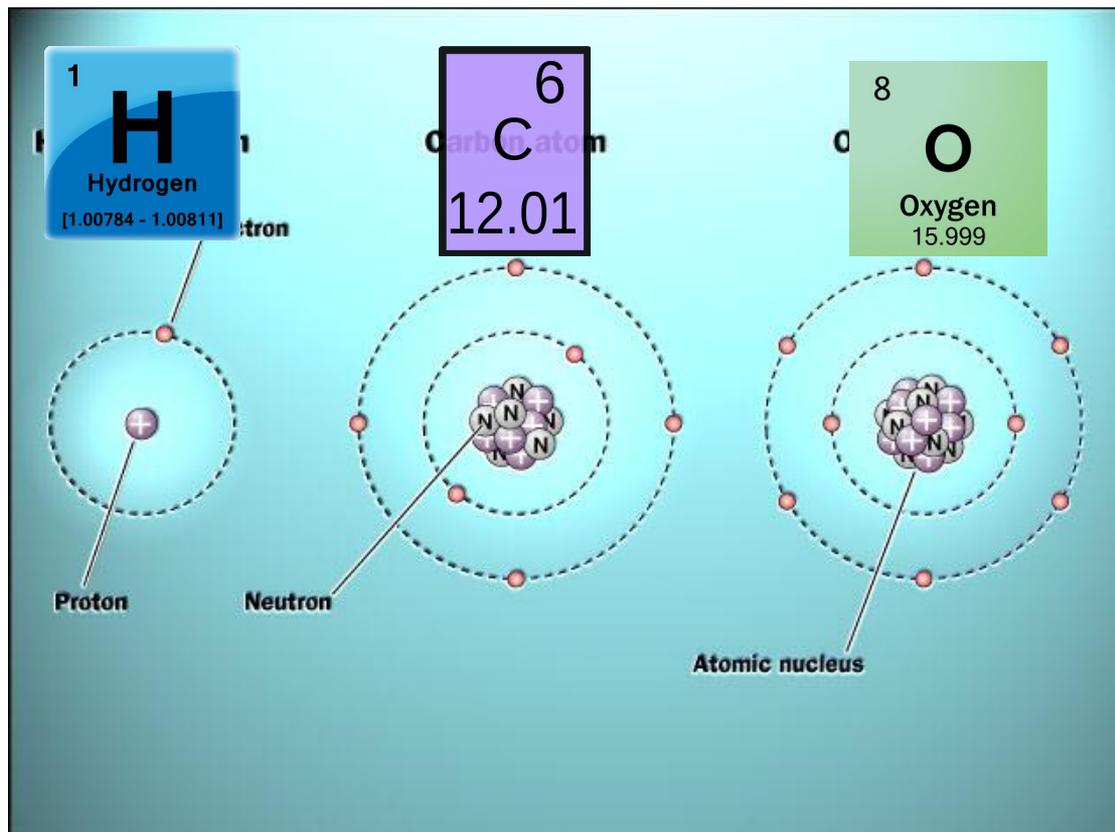
Число протонов, входящих в состав ядра, определяет величину его положительного заряда и называется **атомным числом Z**.

Атомное число соответствует порядковому номеру химического элемента в периодической таблице Менделеева.

Химические элементы с различными атомными номерами характеризуются различными химическими свойствами.

Сумма нейтронов и протонов определяет **массу атома (массовое число):  $Z+N=A$** .

Атомы одинаковым числом протонов и разным числом нейтронов, представляющие один и тот же химический элемент называются **изотопами**.



# 1) Что такое изотопы?

- каждый атом состоит из *нуклонов* – протонов и нейтронов, имеющих примерно одинаковую массу, близкую 1 атомной единице массы.

- число *протонов*  $Z$  в атомных ядрах данного элемента – постоянно.

- число *нейтронов*  $N$  может вариировать. Из-за этого варьирует и *массовое число*  $A=Z+N$ .

Изотопы – **виды атомов одного химического элемента**, отличающиеся числом нейтронов в атомных ядрах, поэтому и массовым числом.

Например в атомных ядрах *гелия* всегда 2 протона, а нейтронов 1 или 2. Соответственно:



в атомных ядрах *кислорода* всегда 8 протонов, а нейтронов 8, 9 или 10. Соответственно:



в атомных ядрах *стронция* всегда 38 протонов, а нейтронов 46, 48, 49 или 50.

Соответственно:



Для простоты в изотопной геологии обычно пишут:

изотопы гелия  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$ , изотопы кислорода –  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  и  ${}^{18}\text{O}$

изотопы стронция –  ${}^{84}\text{Sr}$ ,  ${}^{86}\text{Sr}$ ,  ${}^{87}\text{Sr}$ ,  ${}^{88}\text{Sr}$  и т.д.

**Изотопы** – атомы с одним и тем же числом протонов  $Z$ , но с разным числом нейтронов  $N$ . Массовое число  $A=Z+N$



$Z$  – постоянно,  $N$  и  $A$  – переменны

Изотопы - от греч.  $\text{ισος}$  — «равный», «одинаковый», и  $\text{τόπος}$  — «место». Название связано с тем, что изотопы находятся в одном и том же месте (в одной клетке) таблицы Д.И. Менделеева.

**Изотоны** - атомы с одним и тем же числом нейтронов, но с разным числом протонов.

**Изобары** – атомы с одинаковым массовым числом, но с разным числом нейтронов и протонов.

Впервые возможность колебаний изотопного состава подтверждена английскими физиками Бриско и Робинсоном в 1925г.

Масса любого ядра  $M_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Z_{\text{mp}} + N_{\text{mn}}$$

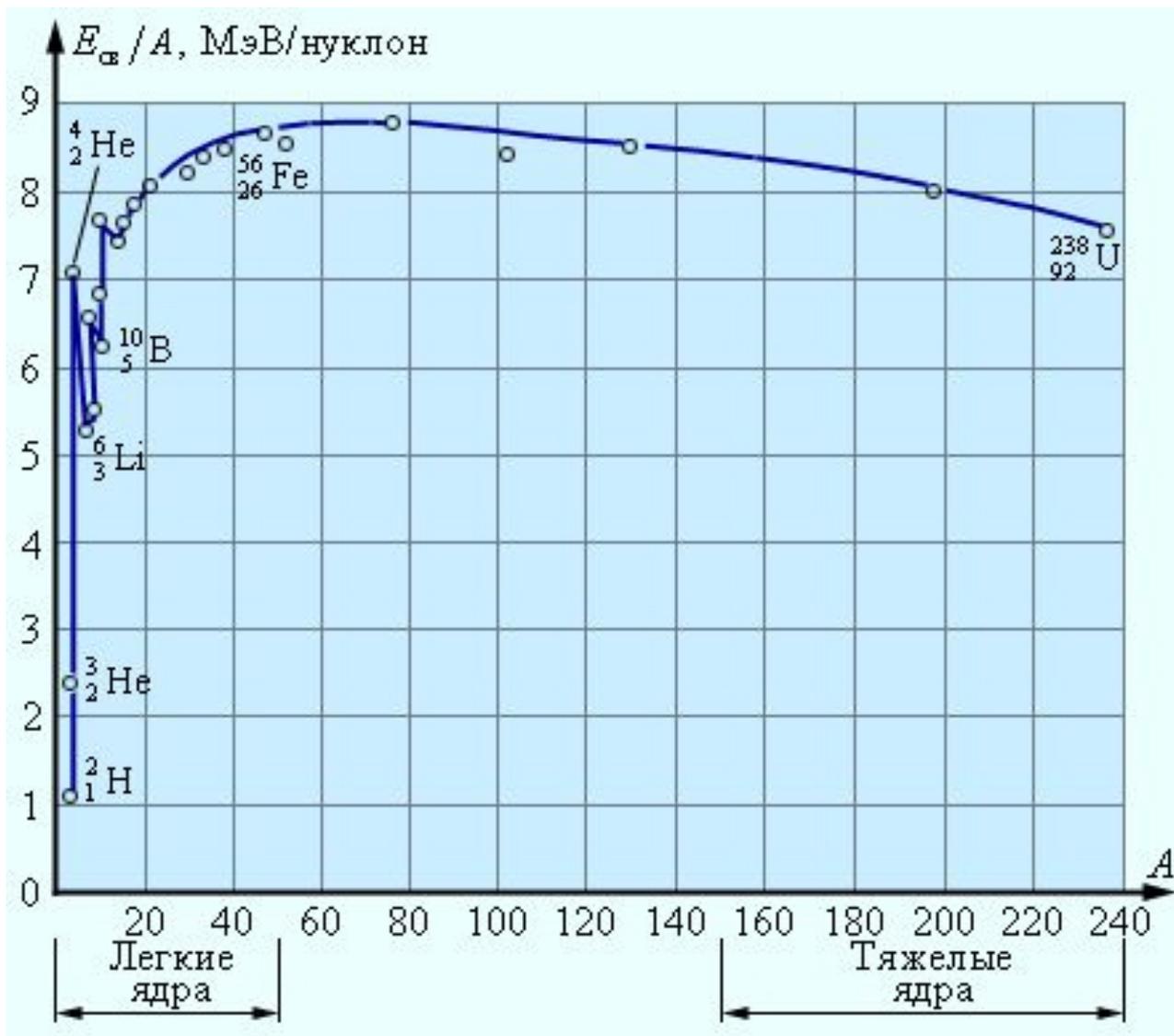
	<b>N p</b>	<b>N n</b>	<b>масса изотопа (а.е.м.)</b>
$^{84}\text{Sr}$	38	46	83,913425
$^{86}\text{Sr}$	38	48	85,9092602
$^{87}\text{Sr}$	38	49	86,9088771
$^{88}\text{Sr}$	38	50	87,9056121

$$\Delta M = Z_{\text{mp}} + N_{\text{mn}} - M_{\text{я}}$$

$$E = mc^2$$

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Z_{\text{mp}} + N_{\text{mn}} - M_{\text{я}}) c^2.$$

Энергия связи в ядра атомов равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы. .



Сейчас известно **276 стабильных изотопов**, причем стабильные изотопы встречаются только у элементов с атомным номером  $Z \leq 83(\text{Bi})$ .

Число **нестабильных изотопов превышает 2000**, подавляющее большинство их получено искусственным путем в результате осуществления различных ядерных реакций.

Число радиоактивных изотопов у многих элементов очень велико и может превышать два десятка.

Число стабильных изотопов существенно меньше. Некоторые химические элементы состоят лишь из одного стабильного изотопа (Be, F, Na, Al, P, Mn, Au и ряд других элементов). Наибольшее число стабильных изотопов – 10 обнаружено у олова, у Fe, например, их 4, у Hg – 7.

# Некоторые закономерности изотопного состава (относительной распространенности изотопов) химических элементов.

1) Вероятность существования четно-четных изотопов максимальна, нечетно-нечетных – минимальна:

Z	N	A=Z+N	число	доля изотопов в природе
Четное	Четное	Четное	157	59 %
Четное	Нечетное	Нечетное	53	20 %
Нечетное	Четное	Нечетное	50	19 %
Нечетное	Нечетное	Четное	4	1.5 %

2) Распространенность химических элементов с четными Z гораздо больше, чем соседних элементов с нечетными Z :

Z (номер клетки в Периодической системе)	элемент	космическая распространенность, усл. ед.
8	O	$2.01 \cdot 10^7$
9	F	$8.43 \cdot 10^2$
10	Ne	$3.76 \cdot 10^6$
11	Na	$5.70 \cdot 10^4$
12	Mg	$1.08 \cdot 10^6$
13	Al	$8.49 \cdot 10^4$
14	Si	$1.00 \cdot 10^6$
.....	.....	.....

3) Распространенность изотопов с «магическими числами» Z и N (2, 8, 20, 54, 82, 126) гораздо больше, чем соседних изотопов тех же элементов, например:

${}^4\text{He}$  Z=2 и N=2 – «дважды магическое атомное ядро»

${}^3\text{He}$  Z=2, N=1 – нет,

${}^{16}\text{O}$  Z=8 и N=8 – «дважды магическое атомное ядро»

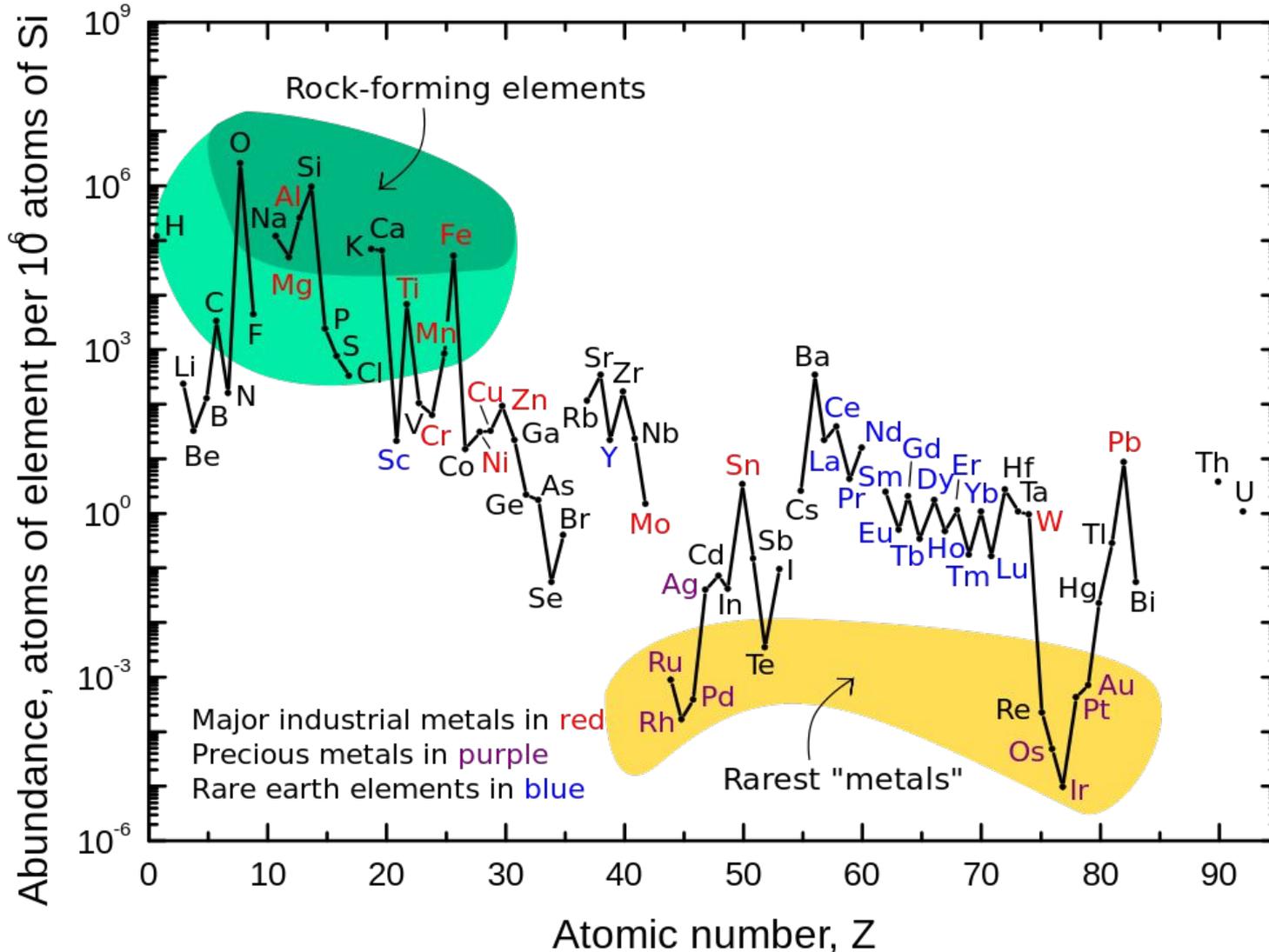
${}^{17}\text{O}$  Z=8 и N=9 – нет,

поэтому  $\frac{{}^4\text{He}}{{}^3\text{He}} = n \cdot 10^4$

поэтому  $\frac{{}^{16}\text{O}}{{}^{17}\text{O}} = 2.7 \cdot 10^3$

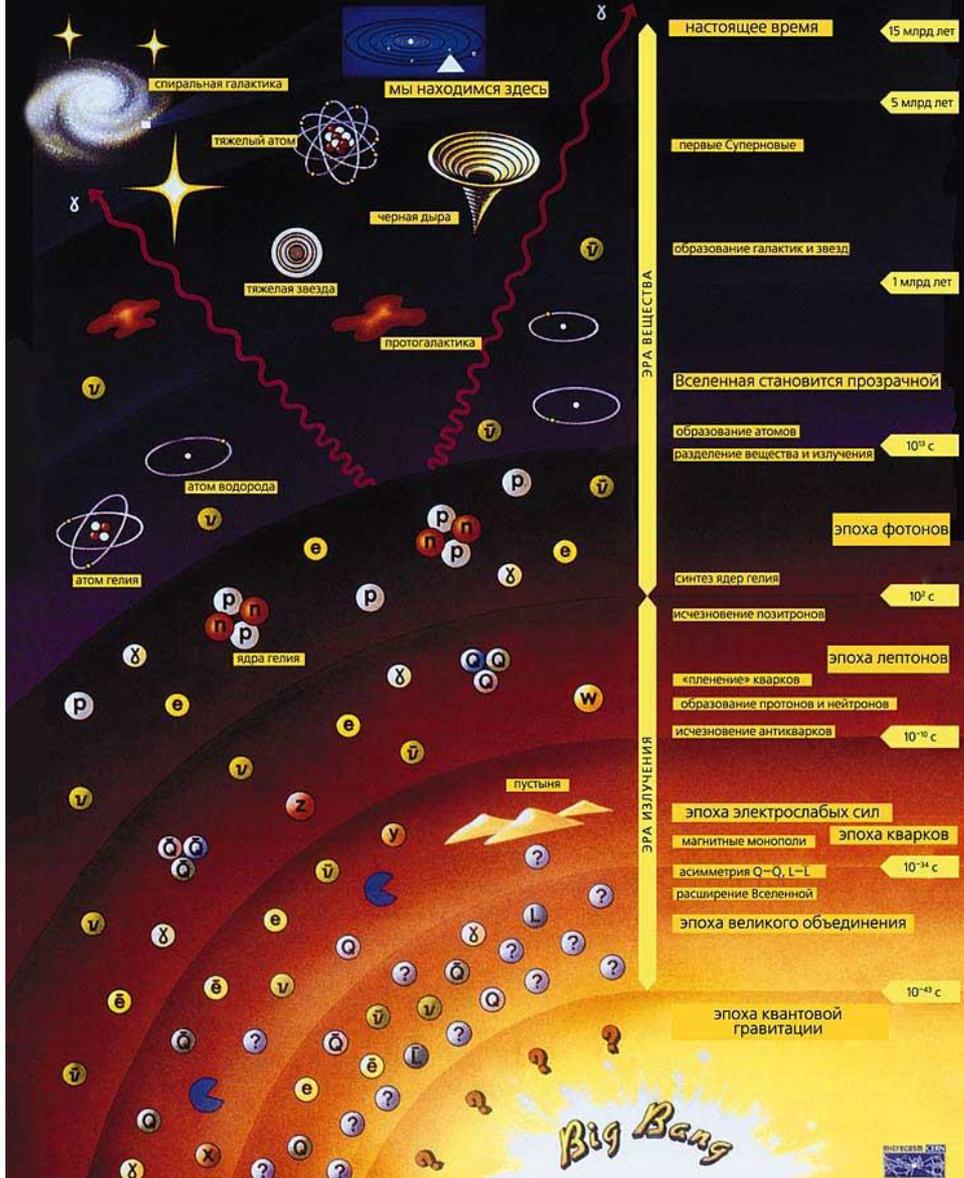
Согласно числу протонов  $Z$ , определяющему атомный номер химического элемента, сами элементы в солнечной системе также имеют различную распространённость.

Элементы с чётными атомными номерами более распространены, чем элементы с нечётными атомными номерами.



1. Вещество во Вселенной в основном состоит из водорода  $H$  –  $\sim 90\%$  всех атомов.
2. По распространенности гелий  $He$  занимает второе место, составляя  $\sim 10\%$  от числа атомов водорода.
3. Существует глубокий минимум, соответствующий химическим элементам литий  $Li$ , бериллий  $Be$  и бор  $B$ .
4. Сразу за глубоким минимумом  $Li$ ,  $Be$ ,  $B$  следует максимум, обусловленный повышенной распространенностью углерода  $C$  и кислорода  $O$ .
5. Вслед за кислородным максимумом идет скачкообразное падение распространенности элементов вплоть до скандия ( $A = 45$ ).
6. Наблюдается резкое повышение распространенности элементов в районе железа  $A = 56$  (группа железа).
7. После  $A = 60$  уменьшение распространенности элементов происходит более плавно.
8. Наблюдается заметное различие между химическими элементами с четным и нечетным числом протонов  $Z$ . Как правило, химические элементы с четными  $Z$  являются более распространенными.

# Эволюция материи во Вселенной.



$t = 0$  Большой взрыв. Рождение Вселенной  
 $t = 10^{-43}$  с - Эра квантовой гравитации.

Струны

$\rho = 10^{90}$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 10^{32}$  К

$t = 10^{-35}$  с - Кварк-глюонная среда

$\rho = 10^{75}$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 10^{28}$  К

**$t = 1$  мкс - Кварки объединяются в нейтроны и протоны**

**$\rho = 10^{17}$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 6 \cdot 10^{12}$  К**

$t = 100$  с - Образование дозвездного <sup>4</sup>He

$\rho = 50$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 10^9$  К

$t = 380$  тыс. лет - Образование нейтральных атомов

$\rho = 0.5 \cdot 10^{-20}$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 3 \cdot 10^3$  К

$t = 10^8$  лет - **Первые звезды**

Горение водорода в звездах

$\rho = 10^2$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 2 \cdot 10^6$  К

Горение гелия в звездах

$\rho = 10^3$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 2 \cdot 10^8$  К

Горение углерода в звездах

$\rho = 10^5$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 8 \cdot 10^8$  К

Горение кислорода в звездах

$\rho = 10^5 \div 10^6$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 2 \cdot 10^9$  К

Горение кремния в звездах

$\rho = 10^6$  г/см<sup>3</sup>,  $T = (3 \div 5) \cdot 10^9$  К

$t = 13.7$  млрд. лет - Современная Вселенная

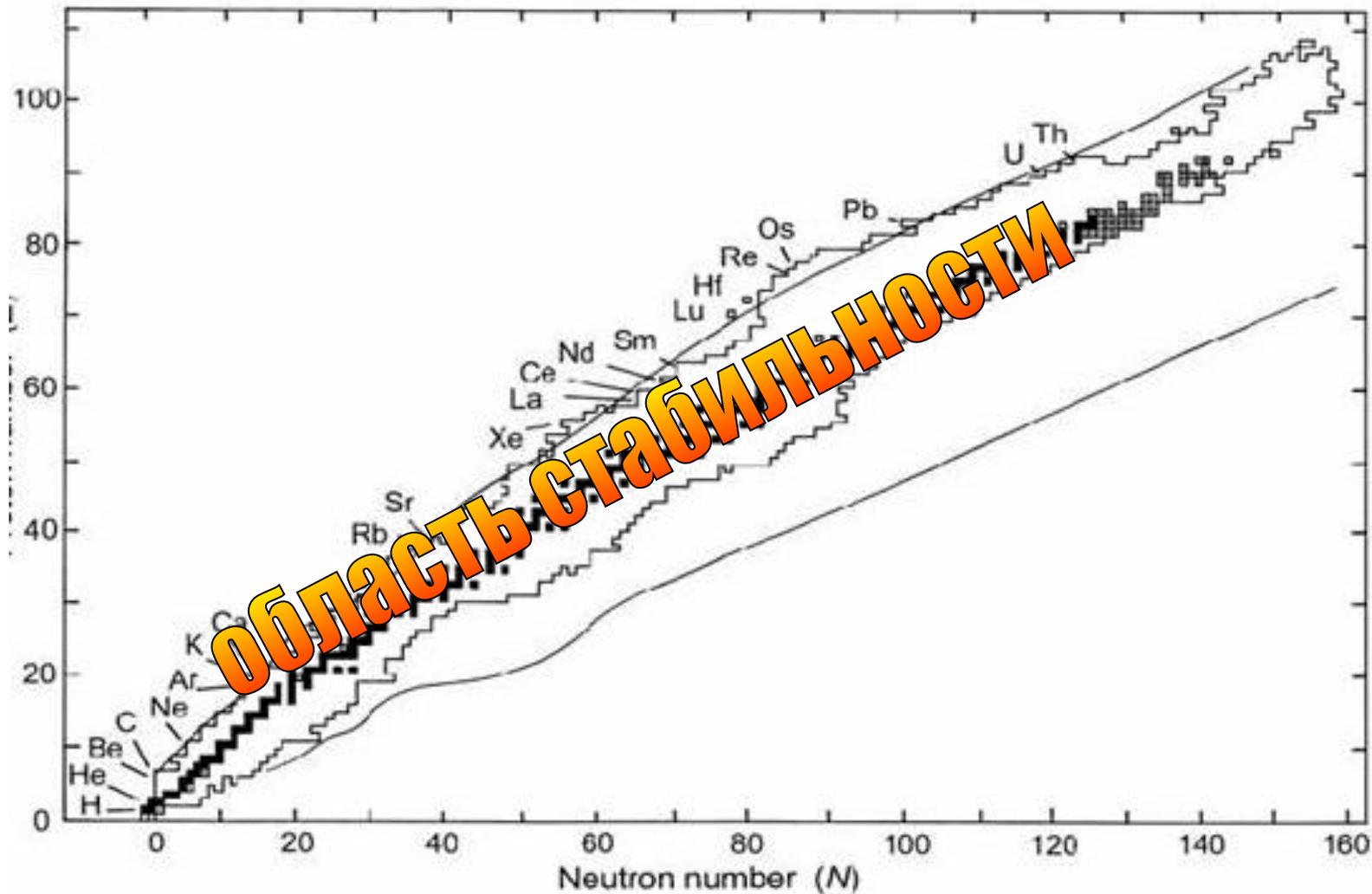
$\rho = 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>,  $T = 2.73$  К

# Фрагмент таблицы известных нуклидов

p →	1	2																	
n ↓	H	He	3	4															
0	<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> He	Li	Be	5	6													
1	<sup>2</sup> D	<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> Li	<sup>5</sup> Be	B	C	7												
2	<sup>3</sup> T	<sup>4</sup> He	<sup>5</sup> Li	<sup>6</sup> Be	<sup>7</sup> B	<sup>8</sup> C	N	8											
3	<sup>4</sup> H	<sup>5</sup> He	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Be	<sup>8</sup> B	<sup>9</sup> C	<sup>10</sup> N	O	9	10									
4	<sup>5</sup> H	<sup>6</sup> He	<sup>7</sup> Li	<sup>8</sup> Be	<sup>9</sup> B	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> N	<sup>12</sup> O	F	Ne									
5	<sup>6</sup> H	<sup>7</sup> He	<sup>8</sup> Li	<sup>9</sup> Be	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> C	<sup>12</sup> N	<sup>13</sup> O	<sup>14</sup> F	<sup>15</sup> Ne	11								
6	<sup>7</sup> H	<sup>8</sup> He	<sup>9</sup> Li	<sup>10</sup> Be	<sup>11</sup> B	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> N	<sup>14</sup> O	<sup>15</sup> F	<sup>16</sup> Ne	Na	12	13	14					
7	<sup>9</sup> He	<sup>10</sup> Li	<sup>11</sup> Be	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> C	<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> O	<sup>16</sup> F	<sup>17</sup> Ne	<sup>18</sup> Na	Mg	Al	Si	15					

Распространенность изотопов химических элементов в Солнечной системе  
Стабильными являются ядра в которых число нейтронов и протонов  
приблизительно одинаково.

**Ядра с х.э. избытком или дефицитом нейтронов являются  
нестабильными и распадаются в стабильные ядра других х.э. с  
выделением энергии.**



Стабильность ядер определяется балансом притягивающих ядерных сил между нуклонами: нейтронами (n) и протонами (p), и отталкивающих кулоновских сил, которые действуют между заряженными протонами.

В ядре осуществляются разного типа взаимодействия - (n-p), (n-n), (p-p).

Наиболее сильными являются (n-p)-взаимодействия.

Нестабильны системы, состоящие из малого числа протонов и большого числа нейтронов, и наоборот

Наиболее стабильными и распространёнными являются атомы с чётным числом протонов и нейтронов, а также равным числом протонов и нейтронов.

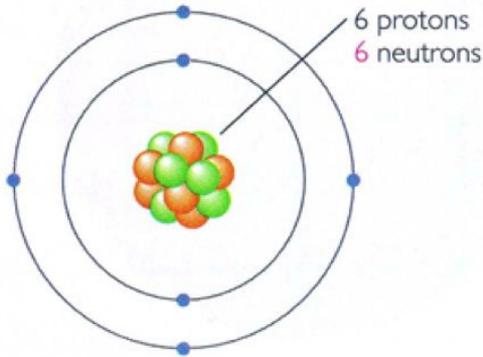
Максимально распространены изотопы в которых количество протонов и нейтронов отвечает магическим числам: 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126.

## Относительная распространённость изотопов углерода.

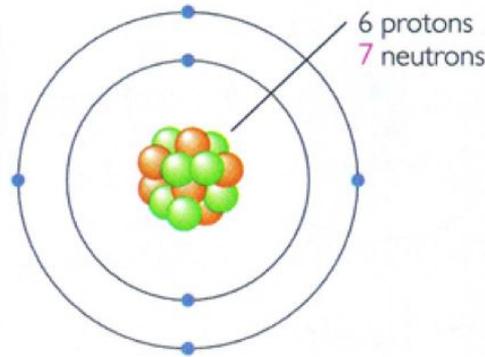
98.9%

1.1%

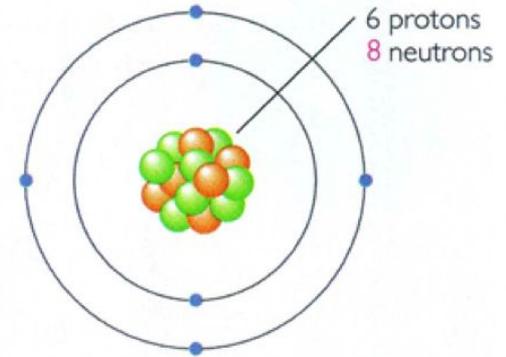
<0.0001%



Carbon-12  
(6P + 6N)  
Atomic weight = 12



Carbon-13  
(6P + 7N)  
Atomic weight = 13

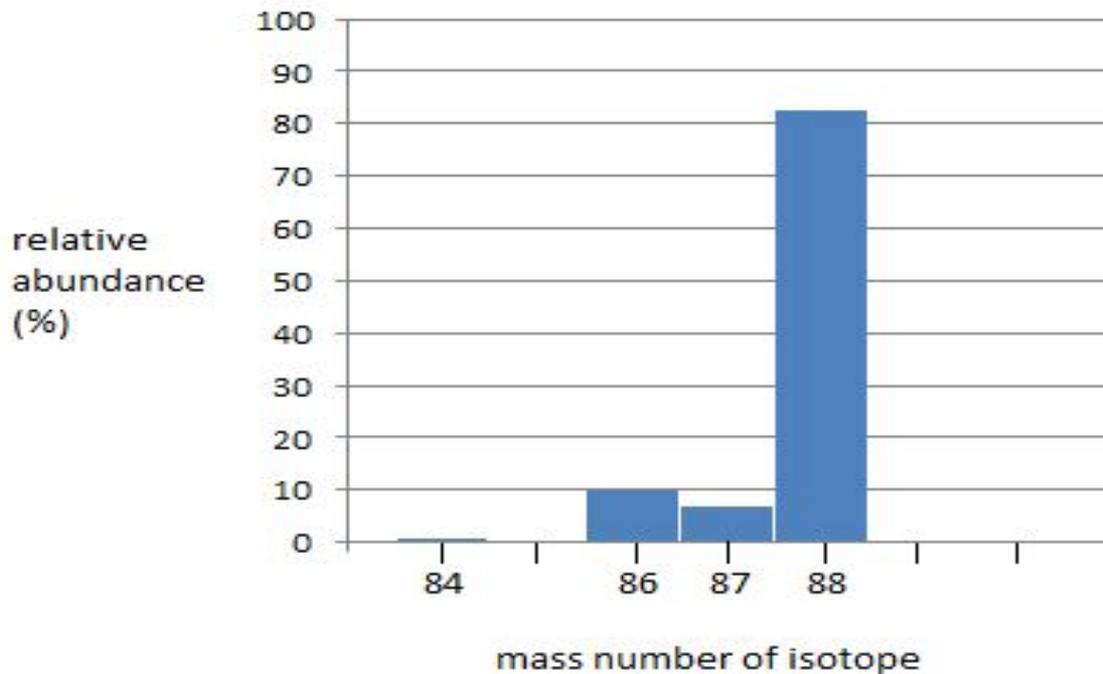


Carbon-14  
(6P + 8N)  
Atomic weight = 14

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

# Относительная распространённость изотопов стронция

The mass spectrum for strontium



**A = 38**

<b><sup>84</sup>Sr</b> 83.913426 0.56%	<b><sup>86</sup>Sr</b> 85.909265 9.86%	<b><sup>87</sup>Sr</b> 86.908882 7.00%	<b><sup>88</sup>Sr</b> 87.905617 82.58%
Stable	Stable	Stable	Stable

**N =**  
**50**

**46**

**48**

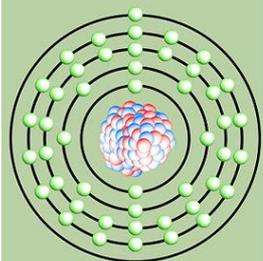
**49**

Атомарная масса химического элемента  $M_A$

Масса изотопа  $M_i$

Относительная распространённость изотопа  $Ab_i$  – доля количества изотопа  $i$  от бщего количества изотопов атома

$$M_A = \sum M_i \times Ab_i$$



47
<b>Ag</b>
СЕРЕБРО
107,868
4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>

	atomic mass	abundance
107Ag	106.90509 amu	51.86%
109Ag	108.90470 amu	48.14%
		<u>100%</u>

$$51.86\% \rightarrow 0.5186$$

$$48.14\% \rightarrow 0.4814$$

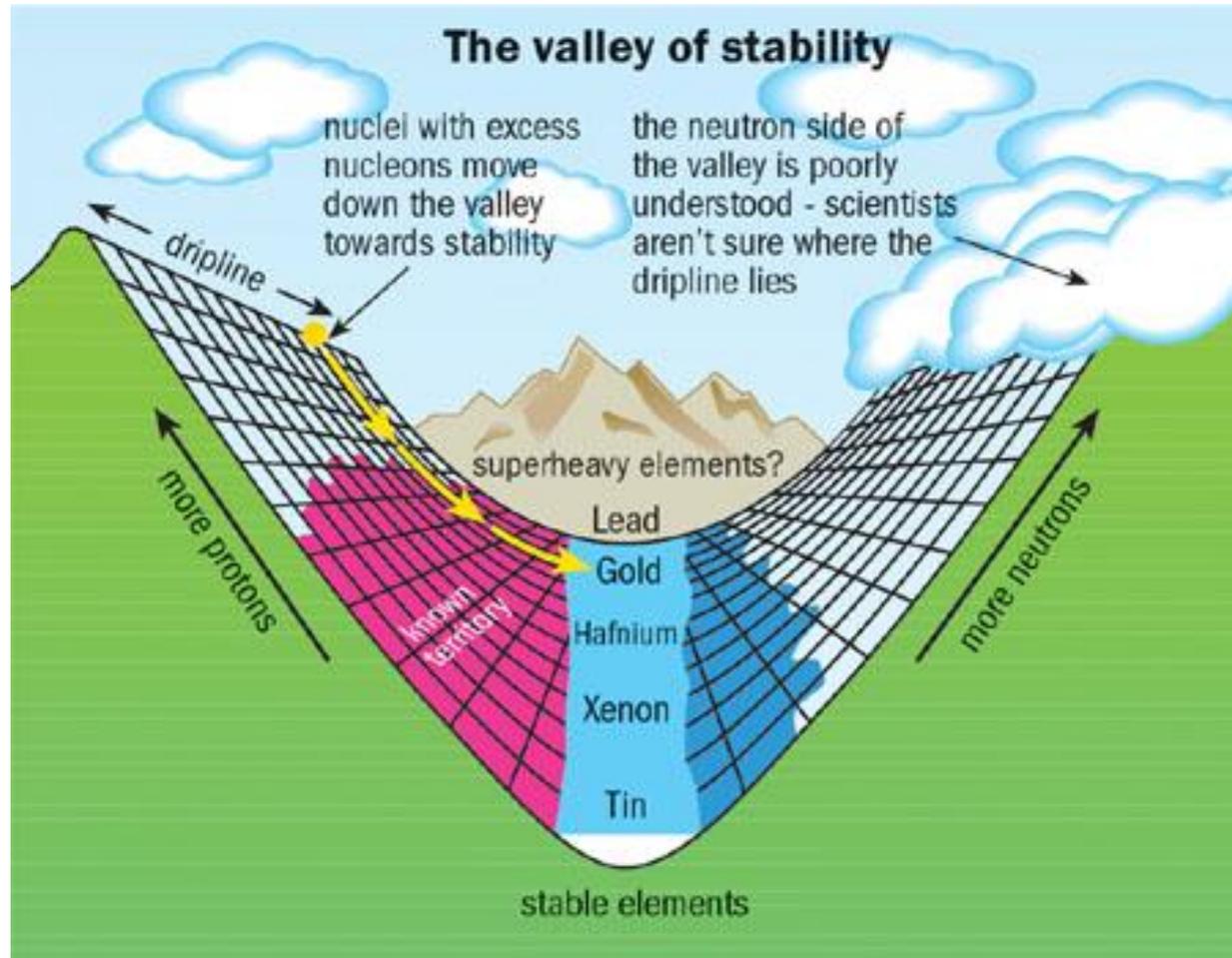
$$= (106.90509 \times 0.5186)$$

$$+ (108.90470 \times 0.4814)$$

$$= 55.4409 + 52.4267$$

$$= \mathbf{107.8676 \text{ amu}}$$

Различные сочетания нуклонов характеризуются различной степенью стабильности. Большинство сочетаний нежизнеспособны. Далее идут ядра с ограниченной жизнеспособностью. Наконец существует область стабильного состояния, «долина стабильности».



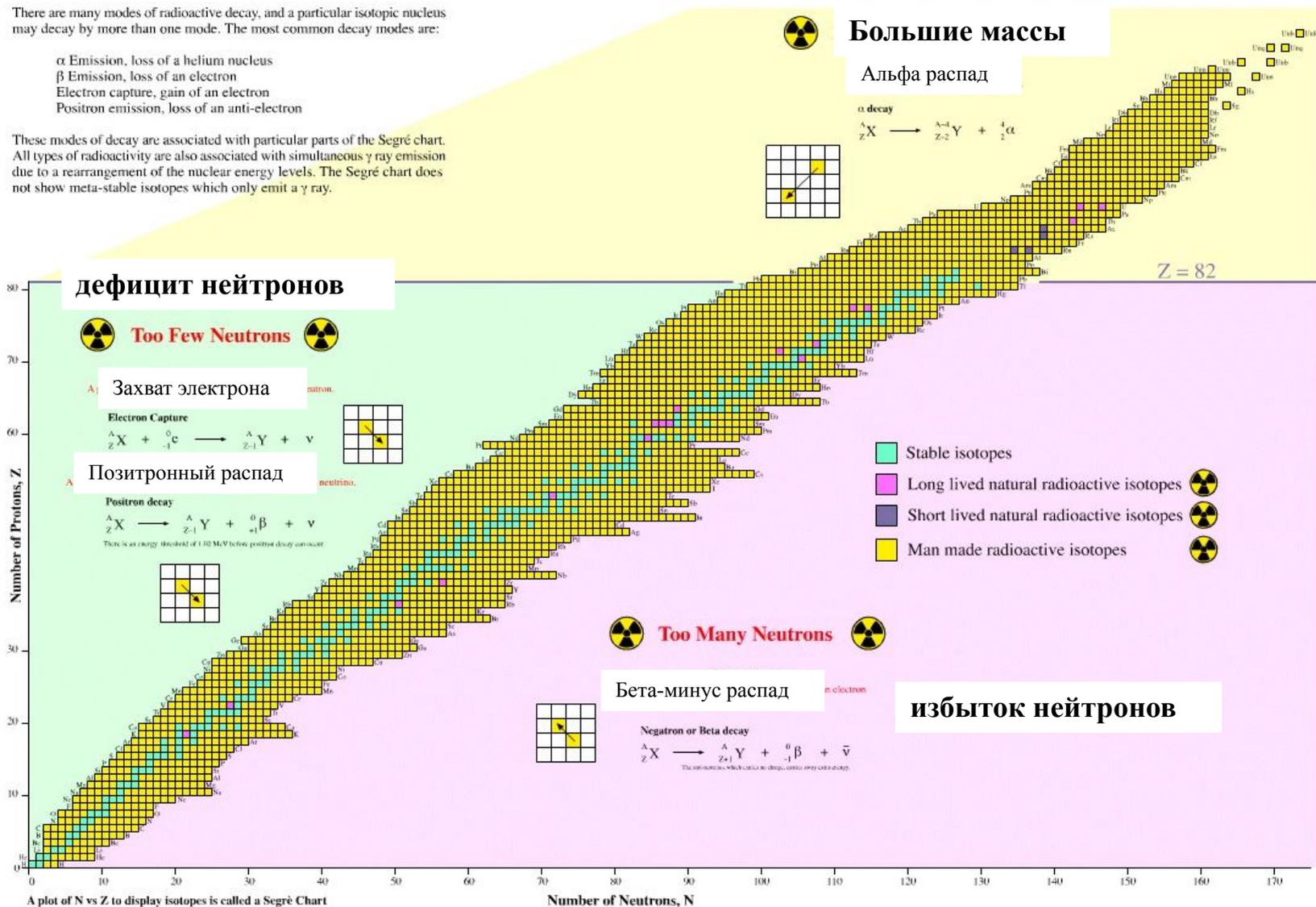
# Радиоактивный распад.

## Radioactivity

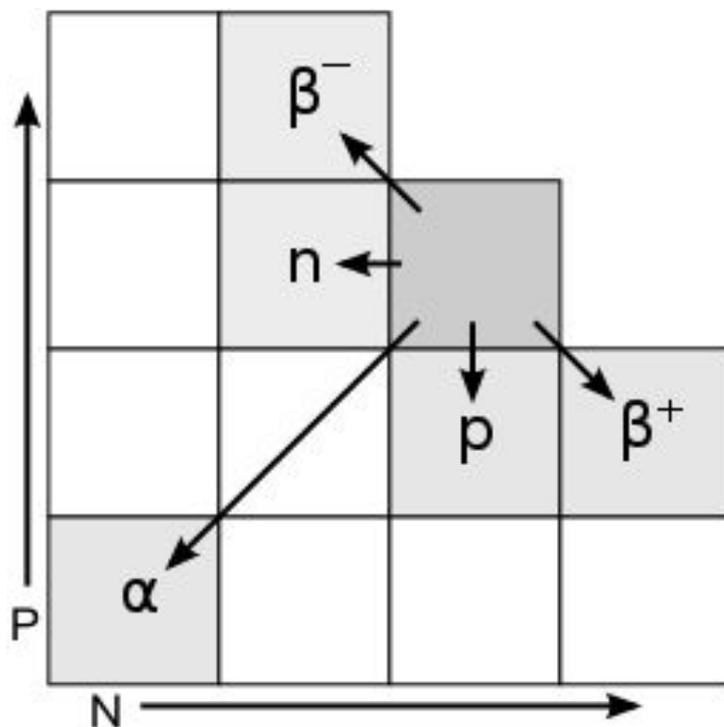
There are many modes of radioactive decay, and a particular isotopic nucleus may decay by more than one mode. The most common decay modes are:

- α Emission, loss of a helium nucleus
- β Emission, loss of an electron
- Electron capture, gain of an electron
- Positron emission, loss of an anti-electron

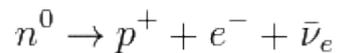
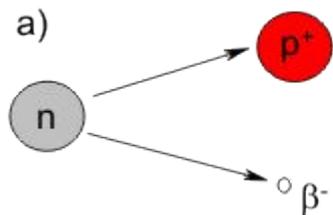
These modes of decay are associated with particular parts of the Segrè chart. All types of radioactivity are also associated with simultaneous γ ray emission due to a rearrangement of the nuclear energy levels. The Segrè chart does not show meta-stable isotopes which only emit a γ ray.



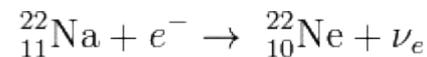
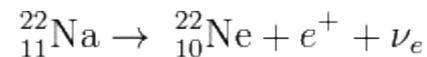
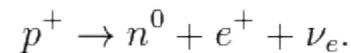
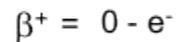
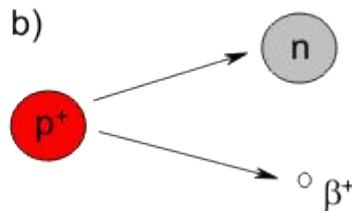
Нестабильные ядра стремятся к более стабильному состоянию путём изменения соотношения протонов и нейтронов. Существует несколько механизмов такого изменения, называемых радиоактивным распадом, или превращением.



## Бета-минус-распад



## Позитронный распад и электронный захват



При бета-распаде происходит изотопное превращение с сохранением числа нуклонов или массы ядра – изобарный переход.

Изобары – химически разные атомы, имеющие одинаковую массу.

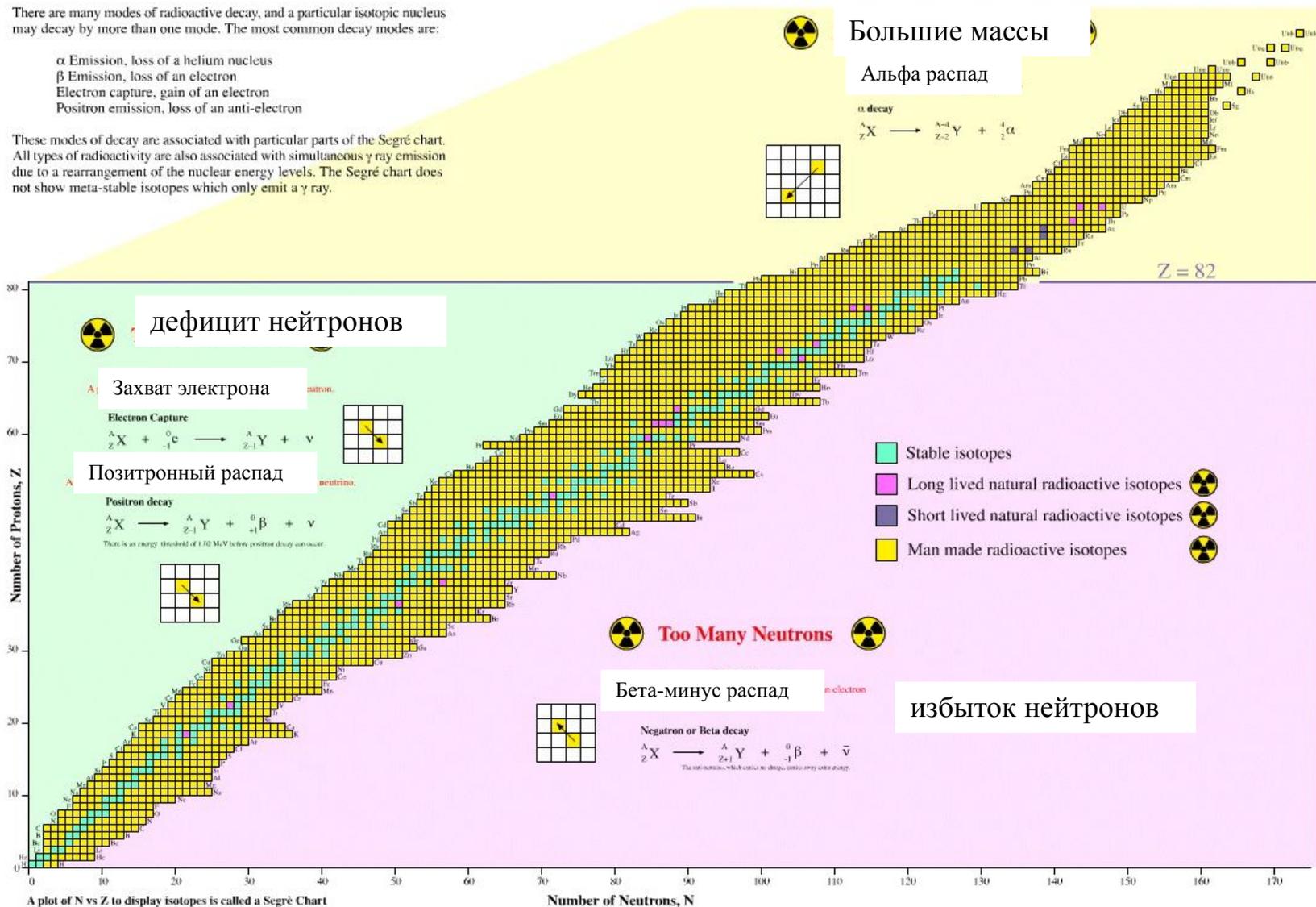
# Радиоактивный распад.

## Radioactivity

There are many modes of radioactive decay, and a particular isotopic nucleus may decay by more than one mode. The most common decay modes are:

- α Emission, loss of a helium nucleus
- β Emission, loss of an electron
- Electron capture, gain of an electron
- Positron emission, loss of an anti-electron

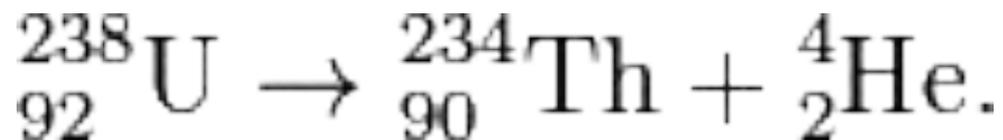
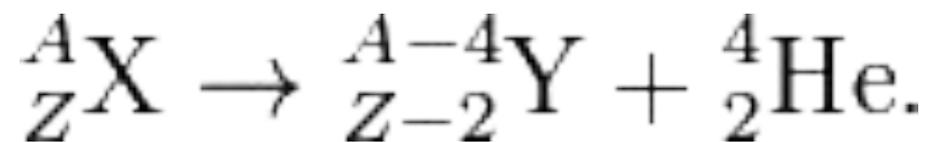
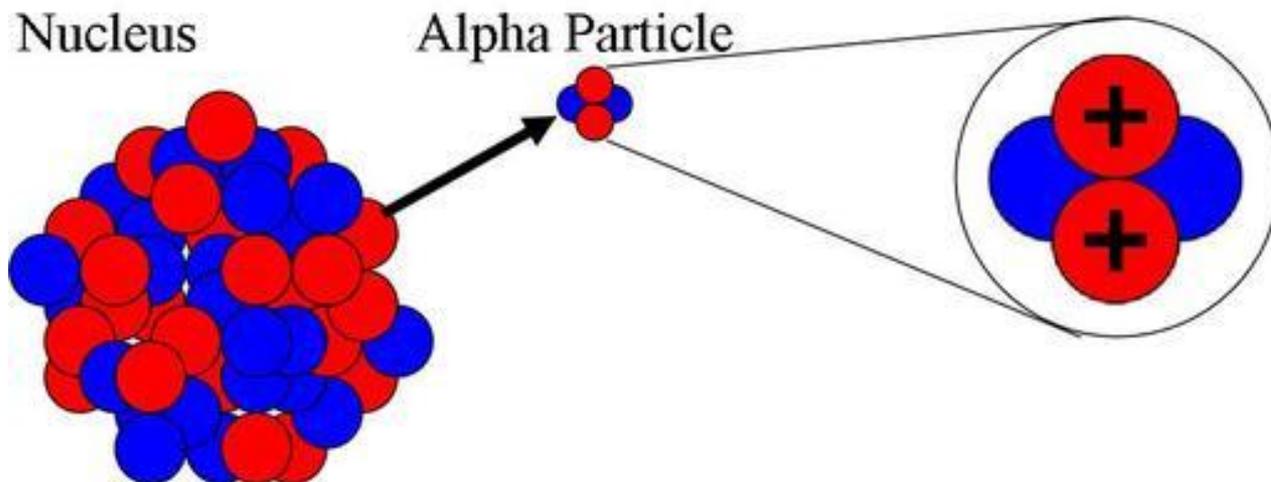
These modes of decay are associated with particular parts of the Segré chart. All types of radioactivity are also associated with simultaneous γ ray emission due to a rearrangement of the nuclear energy levels. The Segré chart does not show meta-stable isotopes which only emit a γ ray.



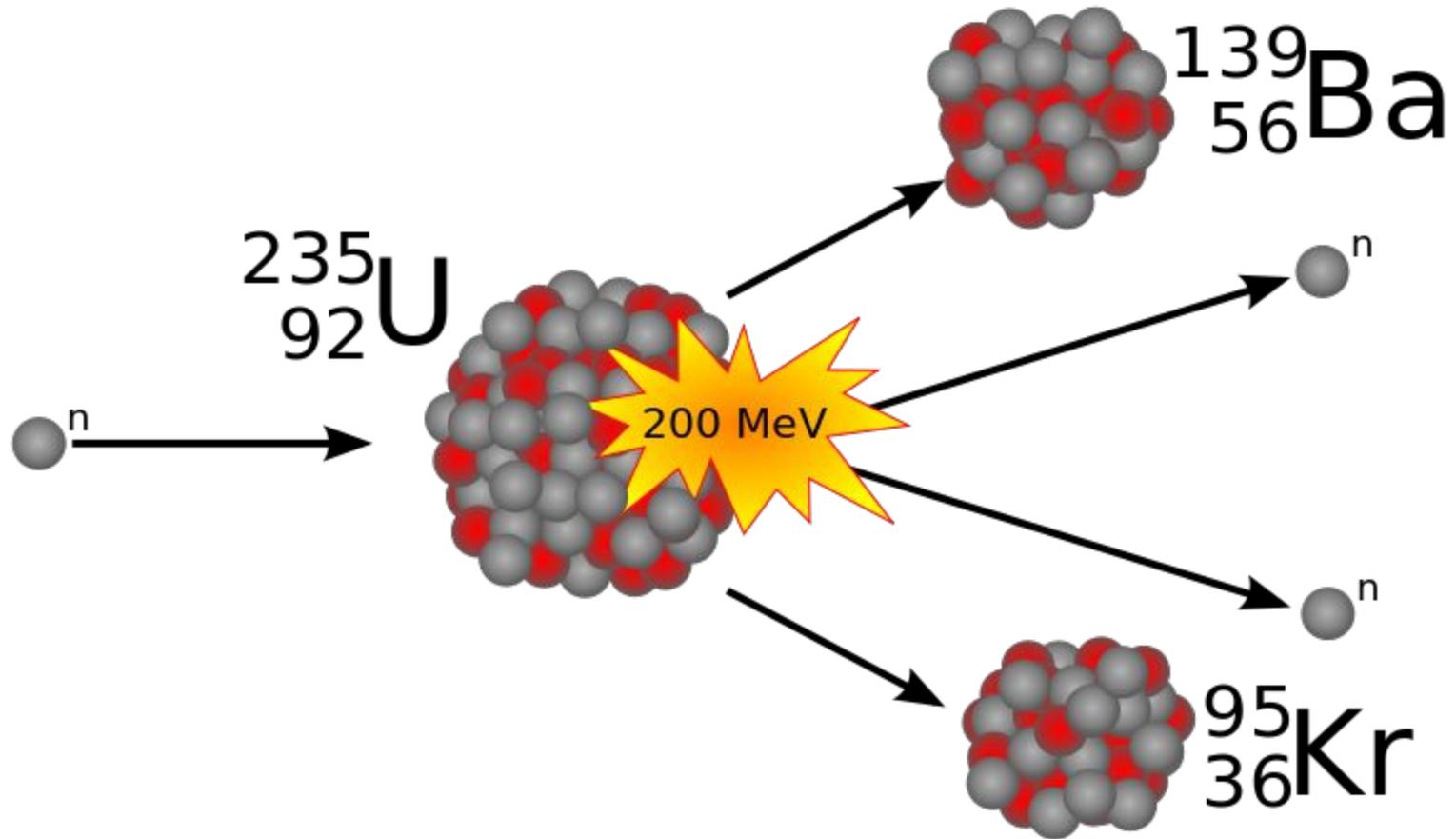
A plot of N vs Z to display isotopes is called a Segré Chart

Number of Neutrons, N

## Альфа-распад

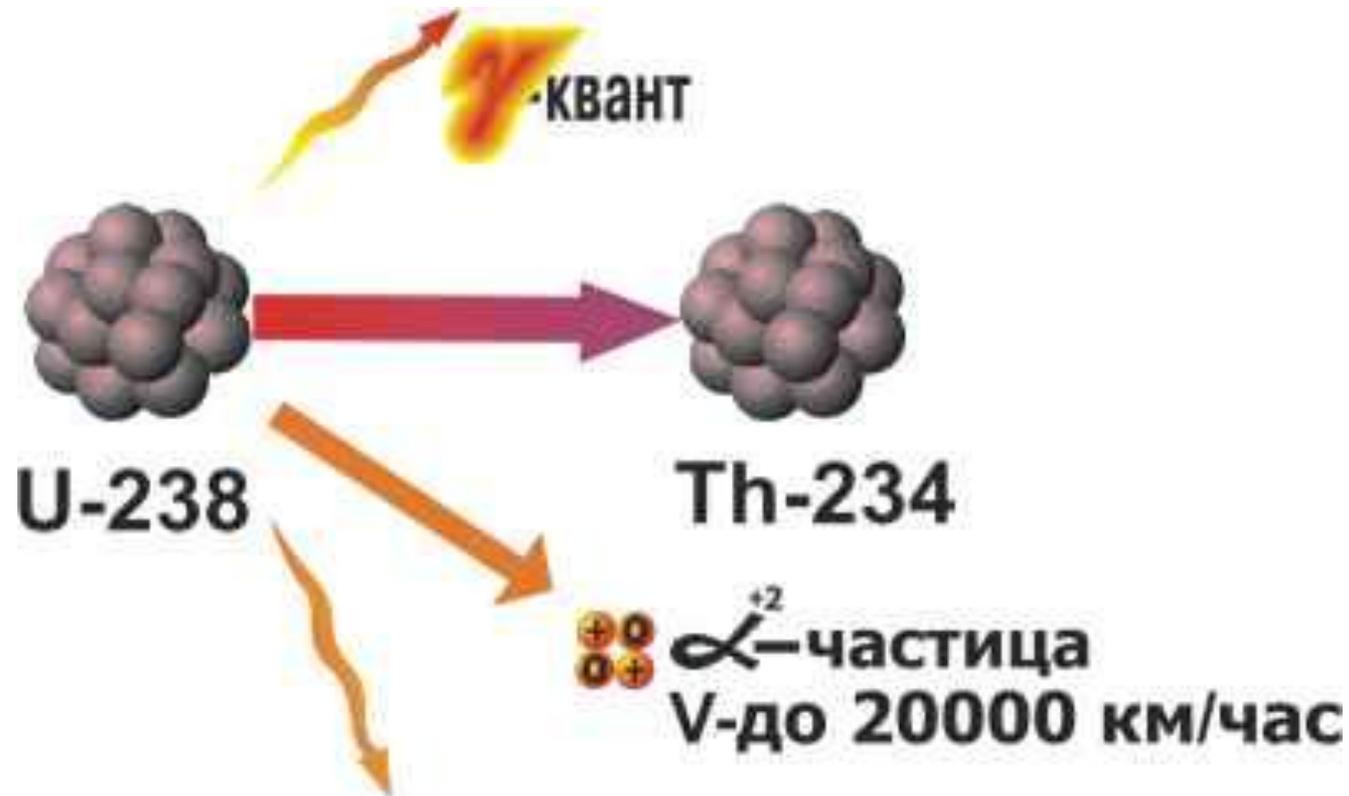


# Деление тяжёлых ядер



При радиоактивном распаде выделяется квант энергии.  
Чем выше скорость радиоактивного распада и масса ядра, тем большее количество энергии выделяется при радиоактивном распаде в единицу времени.

Существование короткоживущих радионуклидов в составе земного вещества – причина высоких температур на раннем этапе истории Земли.

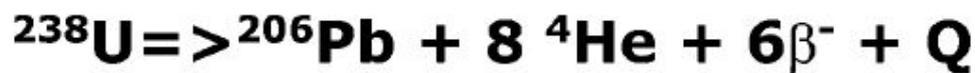
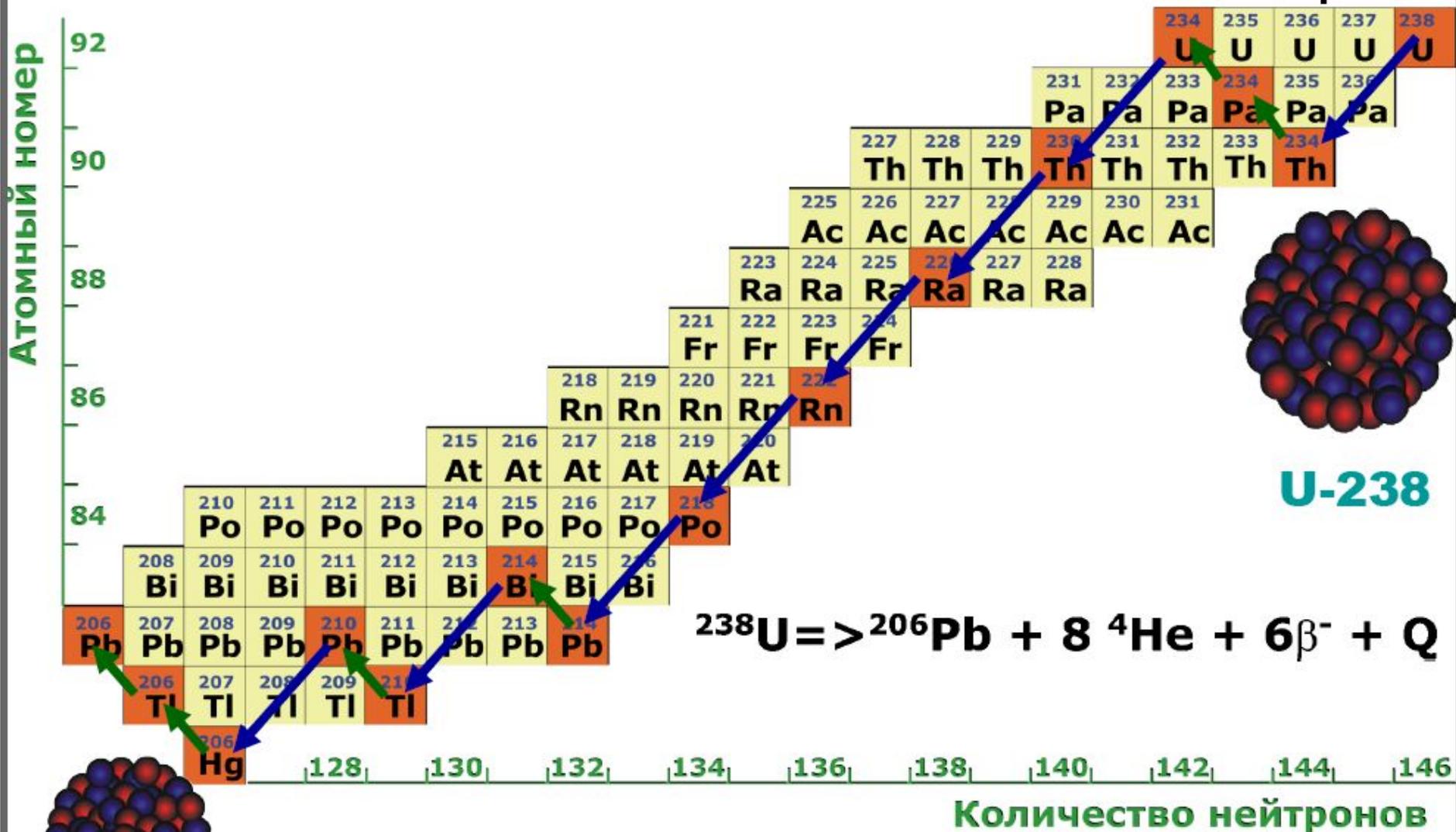


# Распад нестабильных ядер – радиоактивный распад

## Типы природной радиоактивности

Тип распада	Испускаемая частица	Изменение числа протонов в распадающемся ядре	Изменение числа нейтронов в распадающемся ядре
$\alpha$ -распад	ядро атома гелия	уменьшение на 2	уменьшение на 2
$\beta$ -распад	1 электрон	увеличение на 1	уменьшение на 1
$2\beta$ -распад	2 электрона одновременно	увеличение на 2	уменьшение на 2
$K$ -захват	захват ядром электрона с ближайшей орбиты	уменьшение на 1	увеличение на 1
Спонтанное деление	2 осколка - ядра с массами $\approx 90$ и $\approx 140$	ядро перестает существовать	ядро перестает существовать
Сильно асимметричное деление	атомные ядра углерода, азота, неона и др.	на $\approx 6 \div \approx 10$	на $\approx 6 \div \approx 10$

# U-Th-Pb изотопная система – $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ серия



U – уран; Pa – протоактиний; Th – торий; Ac – актиний; Ra – радий; Fr – франций; Rn – родон; At – аstat; Po – полоний; Bi – висмут; Tl – талий; Hg – ртуть; Pb – свинец.



# Ряды распада

## Ряд урана-238

Ряд	$^{238}\text{U}_{92} \xrightarrow{\alpha} ^{234}\text{Th}_{90} \xrightarrow{\beta} ^{234}\text{Pa}_{91} \xrightarrow{\beta} ^{234}\text{U}_{92} \xrightarrow{\alpha} ^{230}\text{Th}_{90} \xrightarrow{\alpha} ^{226}\text{Ra}_{88} \xrightarrow{\alpha} ^{222}\text{Rn}_{86} \rightarrow \dots ^{206}\text{Pb}_{82} + 8 ^4\text{He}_2$
$T_{1/2}$	$4,5 \cdot 10^9$ л    24 сут    6,7 ч $2,48 \cdot 10^5$ л $8 \cdot 10^4$ л    1602 г    3,825 сут    стабильные

## Ряд тория-232

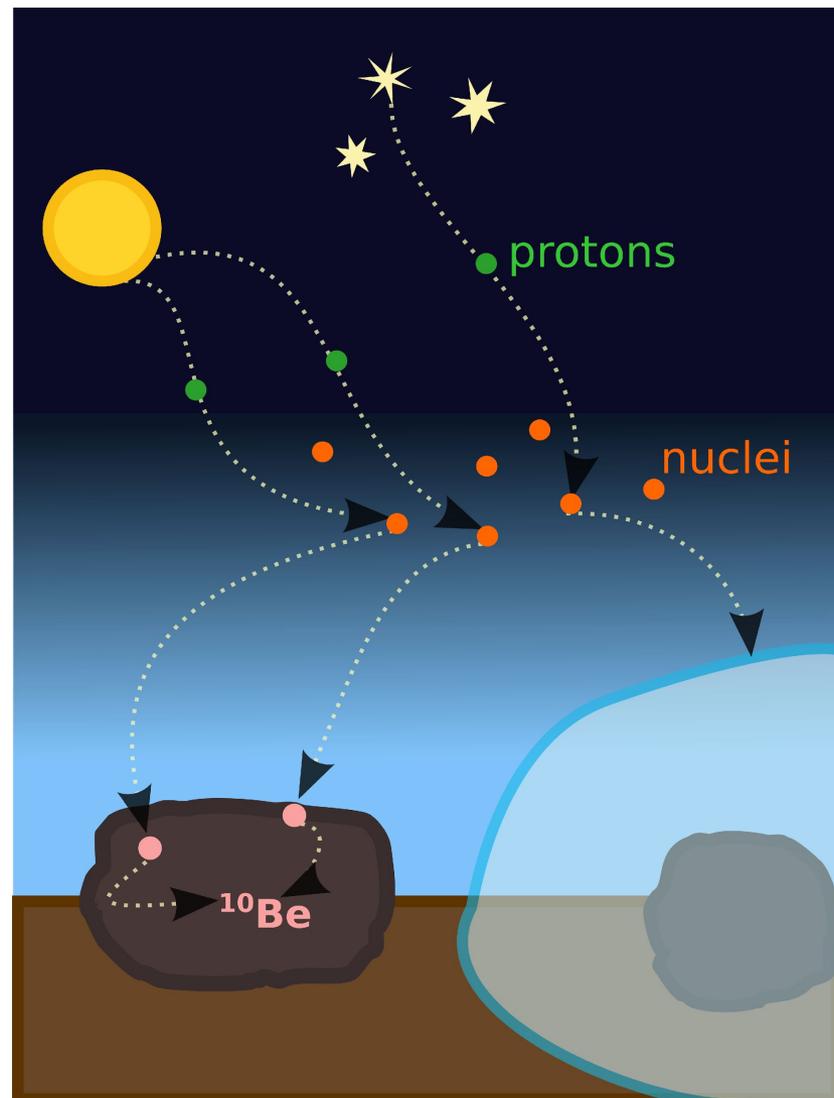
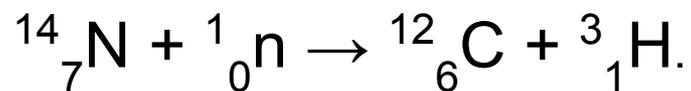
Ряд	$^{232}\text{Th}_{90} \xrightarrow{\alpha} ^{228}\text{Ra} \xrightarrow{\beta} ^{228}\text{Ac} \xrightarrow{\beta} ^{228}\text{Th} \xrightarrow{\alpha} ^{224}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} ^{220}\text{Rn} \rightarrow \dots ^{208}\text{Pb}_{82} + 6 ^4\text{He}_2$
$T_{1/2}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ л    5,75 л    6,13 ч    1,9 л    3,6 сут    4,5 сек    стабильные

†

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

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{T_{1/2}^{(1)}}{T_{1/2}^{(2)}} \quad (9)$$

**Космогенные радионуклиды** – образуются в результате ядерных реакций протонов и нейтронов, входящих в состав первичного и вторичного космического излучения, с ядрами элементов воздуха (N, O, Ar и др.). К космогенным радионуклидам относятся 14 изотопов – T, D,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{Cl}$ ,  $^{26}\text{Al}$  и др.



# Закон радиоактивного распада

Число атомов радиоактивного элемента распадающихся в единицу времени пропорционально общему количеству радиоактивных атомов в системе

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = A,$$

Период полураспада – время за которое распадётся половина всех изначально присутствовавших в системе радиоактивных атомов

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$



# Принцип действия изотопных «часов»:



Обратимся к закону **радиоактивного распада**:

$$\frac{dM}{dt} = -\lambda \cdot M_t \qquad M_t = M_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

(Концентрации радиоактивного изотопа :  $M_t$  – в момент времени  $t$ ,  $M_0$  – начальная.)

Отсюда два основных уравнения для измерения времени  $t$  «изотопными часами»:

$$D_t = M_0 - M_t = M_t \cdot e^{\lambda t} - M_t = M_t \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

Период полураспада

$$\frac{D_t}{M_t} = e^{\lambda \cdot t} - 1 \qquad \frac{D_t}{M_t} + 1 = e^{\lambda \cdot t}$$

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

или

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left( \frac{M_0}{M_t} \right)$$

# Не меняется ли скорость хода «изотопных часов»?

I. Не изменяется ли скорость радиоактивного распада *с течением времени*?

A. Вследствие возможного *непостоянства мировых констант*?

В пределах  $\pm 0.001\%$  - НЕТ

Б. Вследствие возможного *нарушения статистического характера радиоактивного распада при существенном превышении измеряемого времени над средней продолжительностью «жизни» радиоактивных атомов*?

Для всех используемых в геохронологии изотопов – НЕТ

I. Не изменяется ли скорость радиоактивного распада *вследствие внешних воздействий*?

A. При действии *физических факторов*, возможных в условиях Земли, Луны, Марса и астероидов-малых планет (температура, давление, гравитационные поля и т.д.)?

В пределах  $\pm 0.001\%$  - НЕТ

Б. Под влиянием *химических условий*?

Скорость  $\alpha$ -распада,  $\beta$ -распада,  $2\beta$ -распада,  $K$ -захвата и спонтанного деления ядер изотопов, используемых в геохронологии, в пределах  $\pm 0.001\%$  - НЕТ

Итак, константы скорости распада – действительно постоянные величины в пределах  $\pm 0.001\%$  !

**«Вымершие» радиоактивные изотопы,  
образованные при взрыве сверхновой звезды в  
окрестностях Солнечной системы, и продукты их  
распада: **Короткоживущие изотопы****

«Вымерший» изотоп	Вид радиоактивного распада	Среднее время жизни «вымерших» атомов, млн. лет	Продукты распада
самарий $^{146}\text{Sm}$	$\alpha$	150	неодим $^{143}\text{Nd}$
плутоний $^{244}\text{Pu}$	спонтанное деление	118	ксенон $^{136}\text{Xe}$ - $^{131}\text{Xe}$ , $^{129}\text{Xe}$
йод $^{129}\text{I}$	$\beta^-$	24	ксенон $^{129}\text{Xe}$
вольфрам $^{182}\text{W}$	$\beta^-$	13	гафний $^{182}\text{Hf}$
палладий $^{107}\text{Pd}$	$\beta^-$	8.7	серебро $^{107}\text{Ag}$
марганец $^{53}\text{Mn}$	$\beta^-$	5.3	хром $^{53}\text{Cr}$
гадолиний $^{150}\text{Gd}$	$\alpha$	2.6	самарий $^{146}\text{Sm}$
алюминий $^{26}\text{Al}$	$\beta^-$	1.0	магний $^{26}\text{Mg}$
кальций $^{41}\text{Ca}$	$\beta^-$	0.14	калий $^{41}\text{K}$
железо $^{60}\text{Fe}$	$\beta^-$	0.14	кобальт $^{60}\text{Co}$

# ПРИРОДНЫЕ ДОЛГОЖИВУЩИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ И СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ – ПРОДУКТЫ ИХ РАСПАДА:

Элемент и его радиоактивный изотоп	Тип радиоактивности	Среднее «время жизни» атомов, годы	Радиогенные изотопы
уран $^{238}\text{U}$	$\alpha$	$6.45 \cdot 10^9$	свинец $^{206}\text{Pb}$
уран $^{235}\text{U}$	$\alpha$	$1.02 \cdot 10^9$	свинец $^{207}\text{Pb}$
торий $^{232}\text{Th}$	$\alpha$	$20.2 \cdot 10^9$	свинец $^{208}\text{Pb}$
самарий $^{147}\text{Sm}$	$\alpha$	$1.53 \cdot 10^{14}$	неодим $^{143}\text{Nd}$
рубидий $^{87}\text{Rb}$	$\beta^-$	$70.4 \cdot 10^9$	стронций $^{87}\text{Sr}$
рений $^{187}\text{Re}$	$\beta^-$	$65.8 \cdot 10^9$	осмий $^{187}\text{Os}$
лютеций $^{176}\text{Lu}$	$\beta^-$	$51.5 \cdot 10^9$	гафний $^{176}\text{Hf}$
лантан $^{138}\text{La}$	$\beta^-$	$3.88 \cdot 10^{11}$	церий $^{138}\text{Ce}$
калий $^{40}\text{K}$	$\beta^-$	$1.80 \cdot 10^9$	кальций $^{40}\text{Ca}$
теллур $^{130}\text{Te}$	$2\beta^-$	$5.8 \cdot 10^{21}$	ксенон $^{130}\text{Xe}$
калий $^{40}\text{K}$	<i>K-захват</i>	$1.80 \cdot 10^9$	аргон $^{40}\text{Ar}$
лантан $^{138}\text{La}$	<i>K-захват</i>	$2.18 \cdot 10^{11}$	барий $^{138}\text{Ba}$
уран $^{238}\text{U}$	спонтанное деление	$9.4 \cdot 10^{15}$	$^{136}\text{Xe}$ - $^{131}\text{Xe}$ , $^{29}\text{Xe}$ треки – следы осколков деления

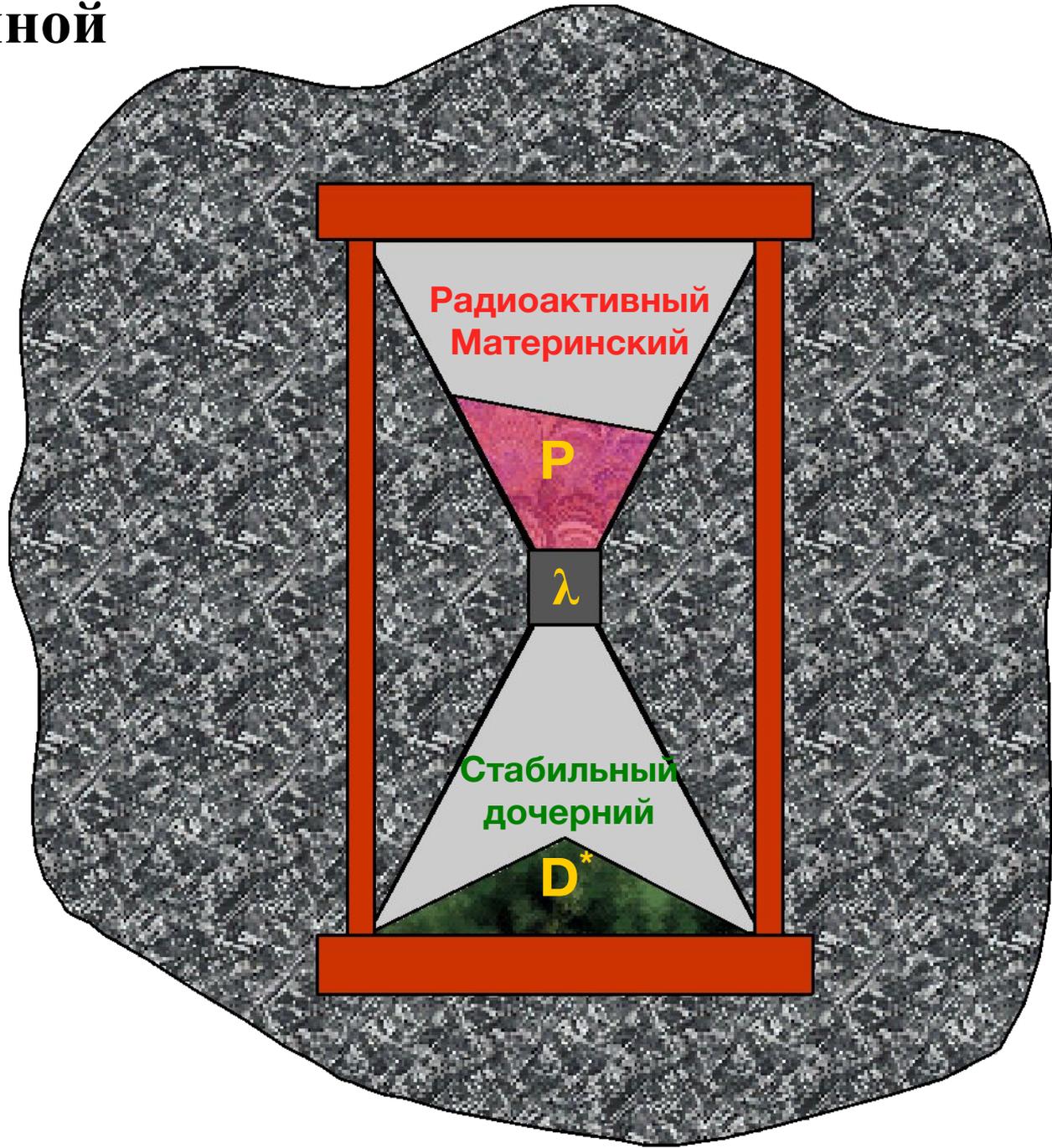
# Концепция изотопной геохронологии

Процесс радиоактивного распада

$$t = \frac{\ln(D^*/P + 1)}{\lambda}$$

$$D^* = D - D_0$$

$D^*$  - радиогенный  
 $D_0$  - начальное количество  
изотопа в системе



# Долгоживущие радиоактивные изотопы и изотопные системы

$T_{1/2} * 10^9$  лет

$^{40}\text{K}$	<input type="checkbox"/>	$^{40}\text{Ar}$	1.25
$^{87}\text{Rb}$	<input type="checkbox"/>	$^{87}\text{Sr}$	48.8
$^{238}\text{U}$	<input type="checkbox"/>	$^{206}\text{Pb}$	4.47
$^{235}\text{U}$	<input type="checkbox"/>	$^{207}\text{Pb}$	0.704
$^{147}\text{Sm}$	<input type="checkbox"/>	$^{143}\text{Nd}$	106
$^{176}\text{Lu}$	<input type="checkbox"/>	$^{176}\text{Hf}$	36
$^{187}\text{Re}$	<input type="checkbox"/>	$^{187}\text{Os}$	41.2

Область применения – древние геологические процессы: архей до кайнозоя

# Короткоживущие радиоактивные изотопы

		T 1/2	
		лет	
$^3\text{H}$	<input type="checkbox"/>	$^3\text{He}$	12.43
$^{10}\text{Be}$	<input type="checkbox"/>	$^{10}\text{B}$	1.51 млн.
$^{14}\text{C}$	<input type="checkbox"/>	$^{14}\text{N}$	5730
$^{26}\text{Al}$	<input type="checkbox"/>	$^{26}\text{Mg}$	705000
$^{210}\text{Pb}$	<input type="checkbox"/>	$^{210}\text{Bi}$	22.3
$^{234}\text{U}$	<input type="checkbox"/>	$^{234}\text{Ra}$	245000
$^{230}\text{Th}$	<input type="checkbox"/>	$^{226}\text{Ra}$	75400

Область применения – молодые и современные геологические и климатические процессы, археология

## Способы выражения изотопного состава(относительной распространенности изотопов) химических элементов.

### 1) Атомные проценты

Сумма распространенностей принимается за 100%,  
рассчитывается распространенность каждого изотопа, например,

$$\text{изотопов аргона: } {}^{40}\text{Ar} = 99.60\%$$

$${}^{38}\text{Ar} = 0.063\%$$

$${}^{36}\text{Ar} = 0.337\%$$

---

$$\text{сумма} = 100\%$$

### 2) Изотопные отношения

Относительная распространенность одного из изотопов принята равной 1:

$$R_{40/36} = \frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{36}\text{Ar}} = 295.6 \quad R_{38/36} = \frac{{}^{38}\text{Ar}}{{}^{36}\text{Ar}} = 0.187,$$

$$\text{то есть } {}^{40}\text{Ar} = 295.6 \quad {}^{38}\text{Ar} = 0.187 \quad {}^{36}\text{Ar} \equiv 1.000$$

### 3) Условные единицы

Для сокращения используемых значащих цифр в расчетах применяют условные единицы относительно общепринятого стандартного образца:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{образец}}}{R_{\text{стандарт}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ ‰}$$

промили

$$\varepsilon = \left( \frac{R_{\text{образец}}}{R_{\text{стандарт}}} - 1 \right) \cdot 10^4$$

единицы  $\varepsilon$

**Изотопная система** – физическая среда, имеющая реальные или условные границы, в пределах которых изотопный состав того или иного атома является или принимается однородным. При переходе этих границ изотопные характеристики атома изменяются.

Например:

U-Pb изотопная система циркона

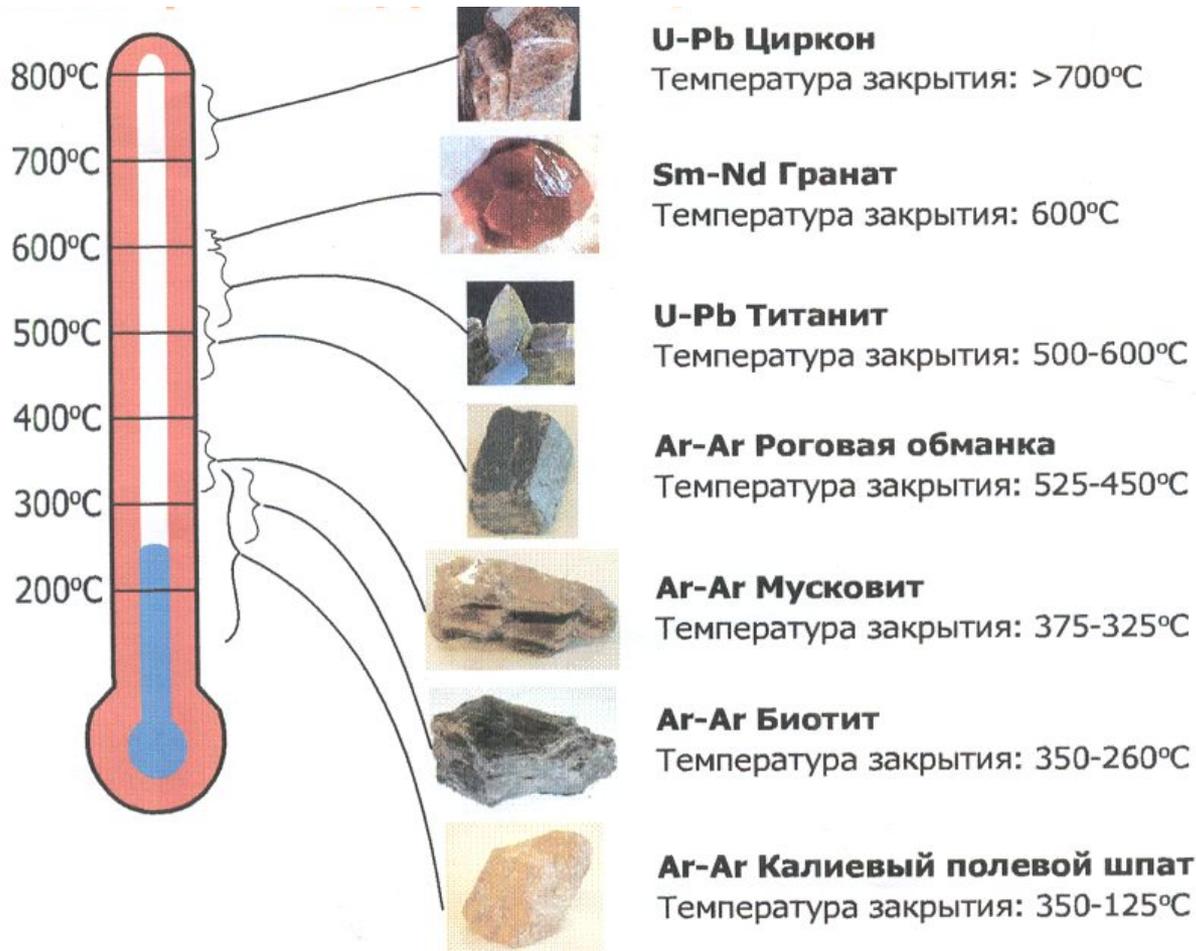
Rb-Sr изотопная система гранита

Изотопная система кислорода в карбонате

Изотопная система является **закрытой** когда между ней и внешней средой не происходит обмена изотопами.

Открытие системы происходит в следствие химического или диффузионного обмена элементами между минералами или породами. **Причина** – метаморфизм, метасоматоз, выветривание. **Следствие** – частичное или полное обнуление изотопного возраста, изменение исходного изотопного состава.

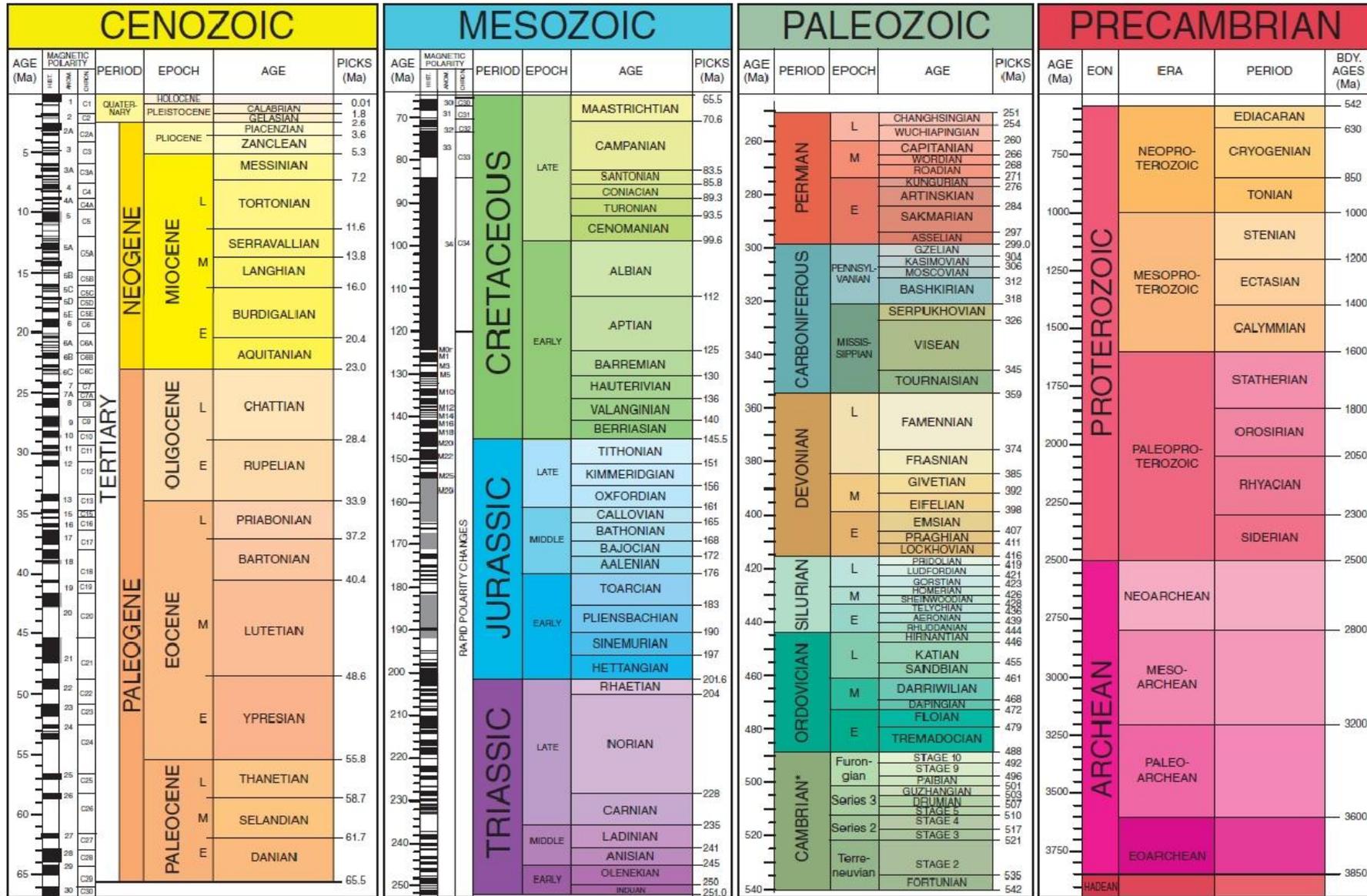
Различные температуры закрытия разных изотопных систем в разных минералах- геохронометрах позволяют оценить температурно-временную эволюцию пород. Важнейшим природным геохронометром является акцессорный циркон.



Температуры закрытия различных минералов отличаются друг от друга. Кроме того, температуры закрытия разных изотопных систем также различны. Поэтому датировка различных

Pb методом, то полученный возраст вероятно соответствует времени кристаллизации породы. Если вы продатируете биотит из этой же породы с помощью Ar-Ar метода, то вероятно получите

# 2009 GEOLOGIC TIME SCALE



## Время в геологии - основные результаты изотопного датирования:

- образование Солнечной системы - 4600 млн.лет
- образование планет – 4550 млн.лет
- атмосфера и гидросфера Земли – 4400 млн.лет
- древнейшие сохранившиеся  
горные породы – 3900 млн.лет
- древнейшие осадочные породы с  
простейшими организмами – 3000 млн.лет
- осадочные породы с организмами,  
строящими скелет (палеонтология) – 550 млн.лет
- древнейшие наземные позвоночные - 150 млн.лет
- появление homo sapiens – 2 млн.лет
- современная цивилизация –  $4 \times 10^{-3}$  млн.лет

... Кроме того, два изотопа одного атома являются химическими элементами с **абсолютно одинаковыми** химическими свойствами.

Следовательно, на соотношение этих элементов существенно не влияют условия протекания геологических процессов, **при условии что разница в массах между этими изотопами достаточно мала.**

**Соотношения изотопов**, таким образом, в отличие от химического состава пород, отражают химические характеристики **источника** или источников образующихся пород.