

Мир ядерной физики: от водорода до нейтронных звёзд

Шнейдман Тимур Маркович,
старший научный сотрудник ЛТФ ОИЯИ

Международная
межправительственн
ая организация,
успешно занимается
фундаментальными
теоретическими и
экспериментальным
и исследованиями с
разработкой и
применением
новейших
технологий



Членами ОИЯИ
являются
19 государств
(Азербайджан, Армения,
Беларусь, Болгария, Вьетнам,
Грузия, Египет, Казахстан,
Северная Корея, Куба, Молдова,
Монголия, Польша, Россия,
Румыния, Словакия, Узбекистан,
Украина, Чешская Республика)
и
5 ассоциированных
членов
(Венгрия, Германия, Италия,
Сербия, Южная Африка)



Лаборатория физики высоких энергий
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина



<http://lhnp.jinr.ru>



Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Дзелепова



<http://dlnp.jinr.ru/ru>



Лаборатория теоретической физики
им. Н. Н. Боголюбова



http://theor.jinr.ru/lab_rus.shtml



Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка



<http://flnp.jinr.ru/ru/>



Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова



http://flerovlab.jinr.ru/flnr/index_rus.html



Лаборатория информационных технологий
им. М. Г. Мещерякова



<http://lit.jinr.ru/ru>



Лаборатория радиационной биологии



http://lrb.jinr.ru/new/olab/olab_ru.shtml

Учебно-научный центр



<http://uc.jinr.ru/ru/>

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Н.Н. Боголюбова

– является одной из семи лабораторий ОИЯИ с широкой научной программой работ в таких областях теоретической физики как квантовая теория поля, физика элементарных частиц, ядерная физика, теория конденсированных сред, современная математическая физика. Широкий спектр теоретических исследований, деловое взаимодействие и координация работ с экспериментальными лабораториями ОИЯИ обеспечивают хорошие возможности для междисциплинарных работ, прямого контакта теоретиков и экспериментаторов.

THEORETICAL PHYSICS (BLTP)

**Theory of
Fundamental
Interactions**

**Theory
of Atomic
Nucleus**

**Theory of
Condensed
Matter**

**Modern
Mathematical
Physics**

Interlaboratory cooperation

VBLHEP

Hot and dense nuclear matter in heavy-ion collisions

DLNP

Neutrino physics

MLIT

*Lattice QCD
calculations*

FLNR

*Superheavy and
exotic nuclei*

DLNP

*Few-body systems,
Exotic nuclei*

MLIT

*Computational methods for
nuclear physics and quantum chemistry*

FLNP

*Condensed Matter
Research,
Material investigations*

FLNR

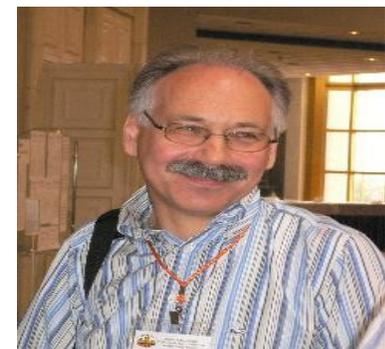
*Nanoporous 2D
membranes,
Ion irradiation*

*Research and
educational project*

DIAS-TH

*“Dubna International
Advanced School of
Theoretical Physics”*

BLTP Director – Dmitry Kazakov





Суперкомпьютер «Говорун» –

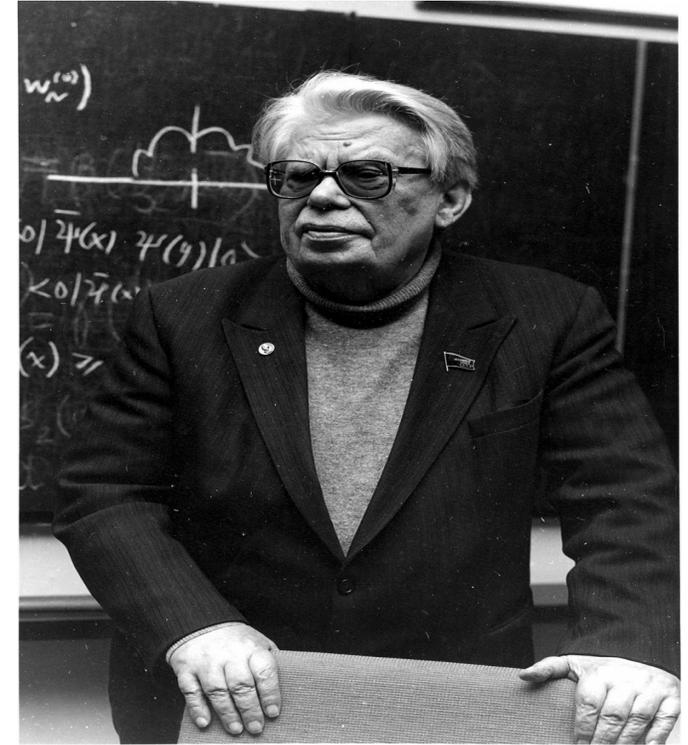
совместный проект, осуществленный Лабораторией теоретической физики и Лабораторией информационных технологий, нацеленный на значительное ускорение сложных теоретических и экспериментальных исследований в области ядерной физики и физики конденсированного вещества, в первую очередь по тематике проекта **NICA**

Nikolai Nikolaevich Bogoliubov (1909–1992) is a distinguished scientist in the field of physics and mathematics. His scientific activity began in Kyiv (1923–1947) and then continued in Moscow (since 1949) and Dubna (since 1956). Main scientific results in the fields:

- Nonlinear mechanics: asymptotic methods, stability theory ;
- Statistical physics: kinetic equations, quasiaverages for systems with spontaneously broken symmetries;
- Quantum statistics: microscopic theory of Bose-gas superfluidity, microscopic theory of superconductivity ;
- Quantum field theory: axiomatic scattering matrix, general renormalization theory, renormalization group theory, proof of dispersion relations;
- Elementary Particle Theory: "quark bag" model, quantum number "colour".

N.N. Bogoliubov's scientific activity began at the age of 14 –15. His major independent results were obtained when he was 20–25.

N.N. Bogoliubov's scientific activity is specified by considerable mathematical culture and directness to solution of concrete problems of natural science.





Dmitrii Ivanovich Blokhintsev (11.01. 1908 – 27.01.1979), one of the pioneers of atomic science and technology in USSR, the organizer and the first director of the JINR.

Main scientific results in the fields:

- Quantum mechanics
- Acoustics of an inhomogeneous moving medium
- Neutron physics
- Quantum field theory
- Particle physics

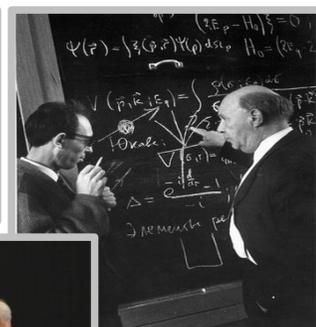
1954 – the scientific supervisor of creation and putting into operation of the world first atomic power station.

Initiated work on the creation of a nuclear rocket engine for space flights with S. P. Korolev

1960 – first pulsed reactor on fast neutrons

1956- 1965 – the JINR Director

1965 – 1979 – Director of Lab of Theoretical Physics



**BLTP:
Fundamental Science
International Cooperation,
Education**



[1996](#) | [1997](#) | [1998](#) | [1999](#) | [2000](#) | [2001](#) | [2002](#) | [2003](#) | [2004](#) | [2005](#) | [2006](#) | [2007](#) |
[2008](#) | [2009](#) | [2010](#) | [2011](#) | [2012](#) | [2013](#) | [2014](#) | [2015](#) | [2016](#) | [2017](#) | [2018](#) | [2019](#) |
2020

May 18 - 22, Almaty, Kazakhstan
International Conference
Astroparticle and Nuclear Physics

June 7 - 13, Pereslavl-Zalessky, Russia
The 21st International Seminar on High Energy Physics **Quarks-2020**

June 29 - July 3
International Conference
Low Dimensional Materials: Theory, Modelling and Experiment

July 6 - 10, Prague, Czech Republic
The XXVIIth International Conference on
Integrable Systems and Quantum Symmetries

July 13 - 18, Yeosu, Republic of Korea
14th International Workshop
Modern problems in nuclear and elementary particle physics

July 20 - 24, Yerevan, Armenia
XVIIIth International Conference
Symmetry Methods in Physics (SYMPHYS)

July 26 - 31, Gyumri, Armenia
BLTP/JINR - KLTP/CAS Joint Workshop
Physics of Strong Interacting Systems

July 26 - 31
International School
Advanced Methods of Modern Theoretical Physics: Integrable and Stochastic Systems

August 16 - 26
Helmholtz International Summer School
Matter under Extreme Conditions in Heavy-Ion Collisions and Astrophysics

August 27 - September 5
Helmholtz International Summer School
Hadron Structure, Hadron Matter and Lattice QCD

August 31 - September 4, Saint-Petersburg, Russia
The 7th International Conference
Models in Quantum Field Theory
dedicated to the 80-th anniversary of professor A.N.Vasiliev

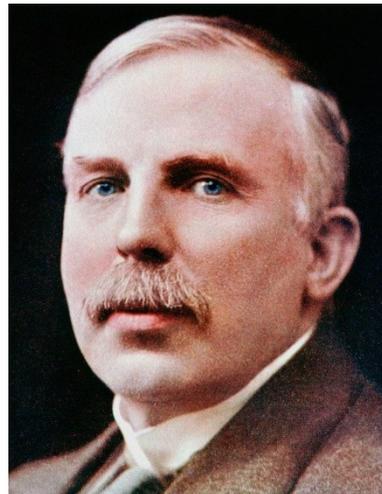
September 8 - 10
III International Workshop
Lattice and Functional Techniques for QCD

September 14 - 19
XXVth International Baldin Seminar
Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics

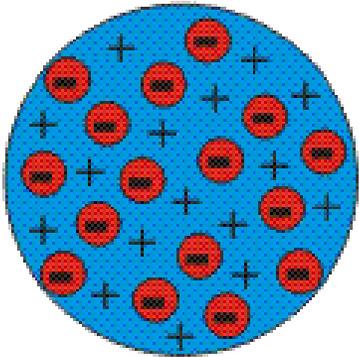
September 21 - 25
II International Workshop
Infinite and Finite Nuclear Matter (INFINUM-2020)

September 21 - 25, Khabarovsk, Russia
IVth International Workshop on
Few-Body Systems

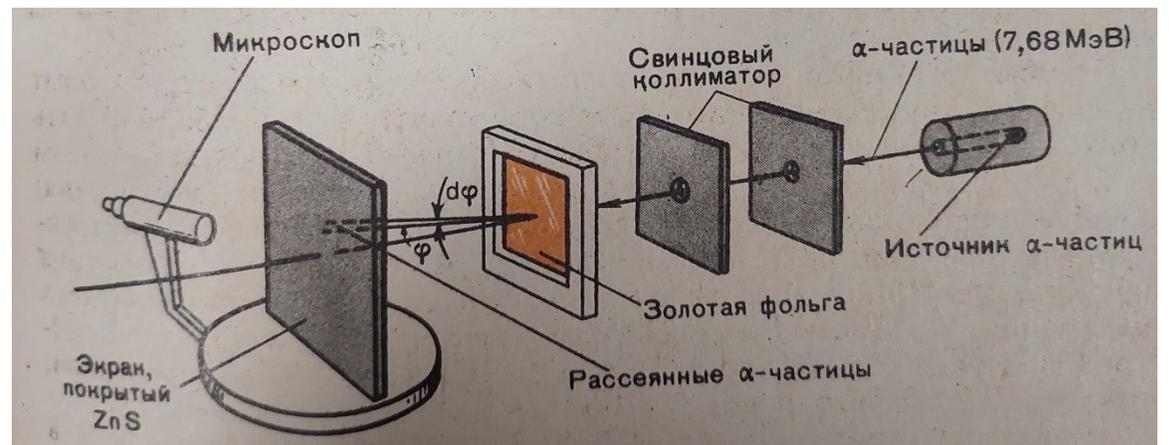
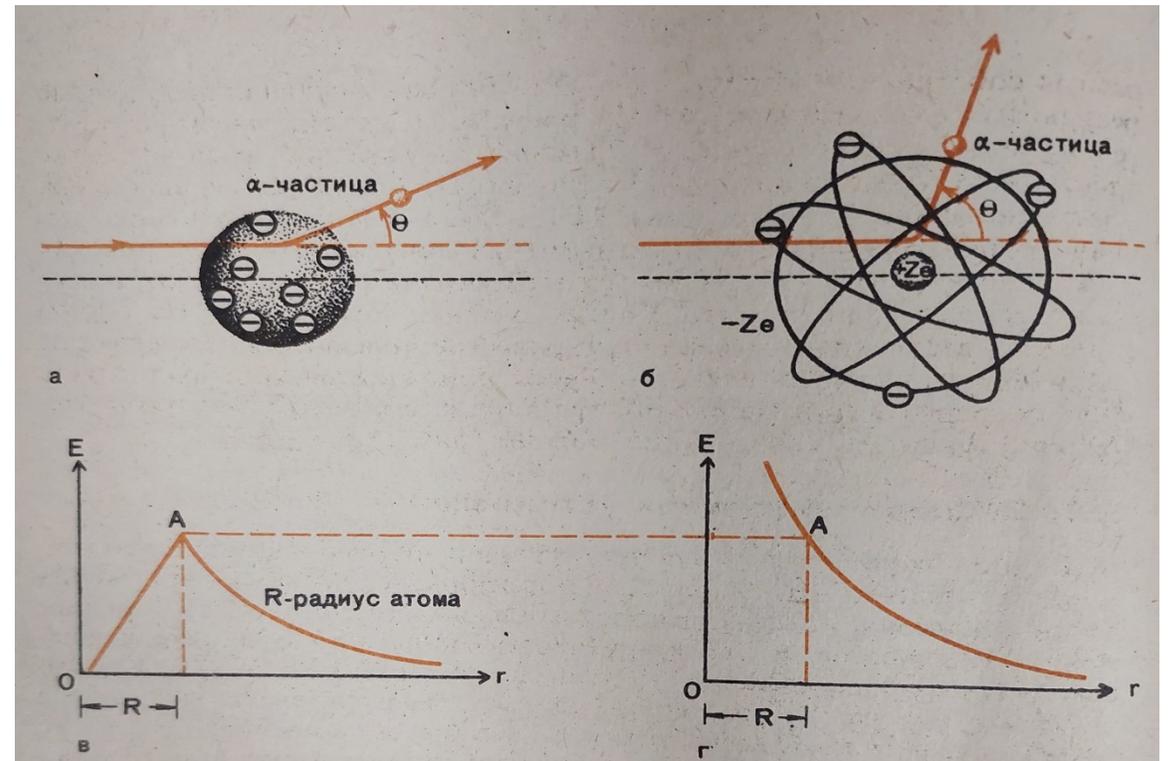
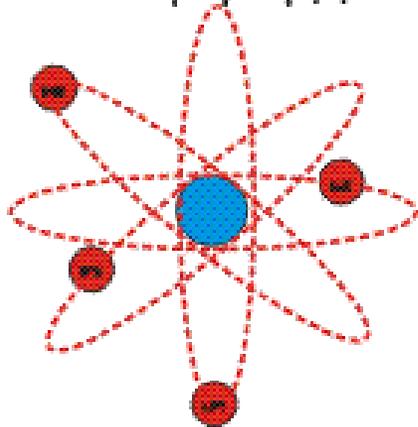
Эксперимент Резерфорда



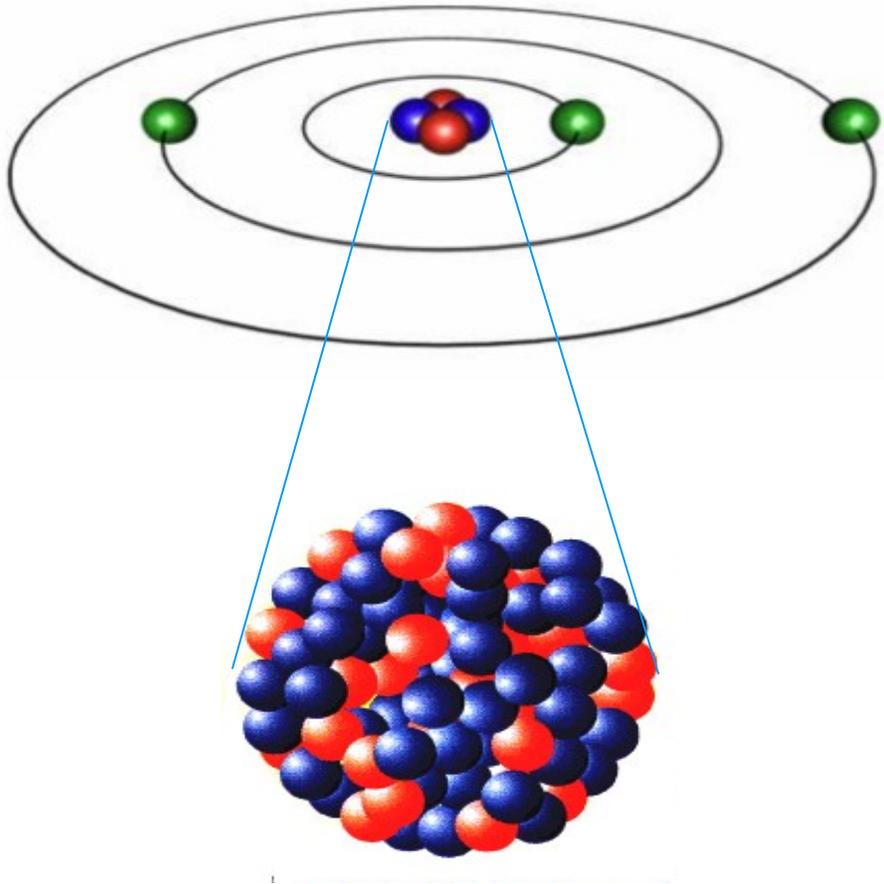
Модель атома Томсона



Модель атома Резерфорда



Атомное ядро



Атом:

Характерный размер: $\approx (0.6 - 2.5) * 10^{-10} \text{ m}$

$$10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$$

Характерные энергии: $\text{eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$

Ядро:

Характерный размер: $\approx (1 - 7) * 10^{-15} \text{ m}$

$$10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

Характерные энергии: $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$

По сравнению с атомом ядро очень маленькое и содержит колоссальное количество энергии!

Атомное ядро

Z – число протонов в ядре

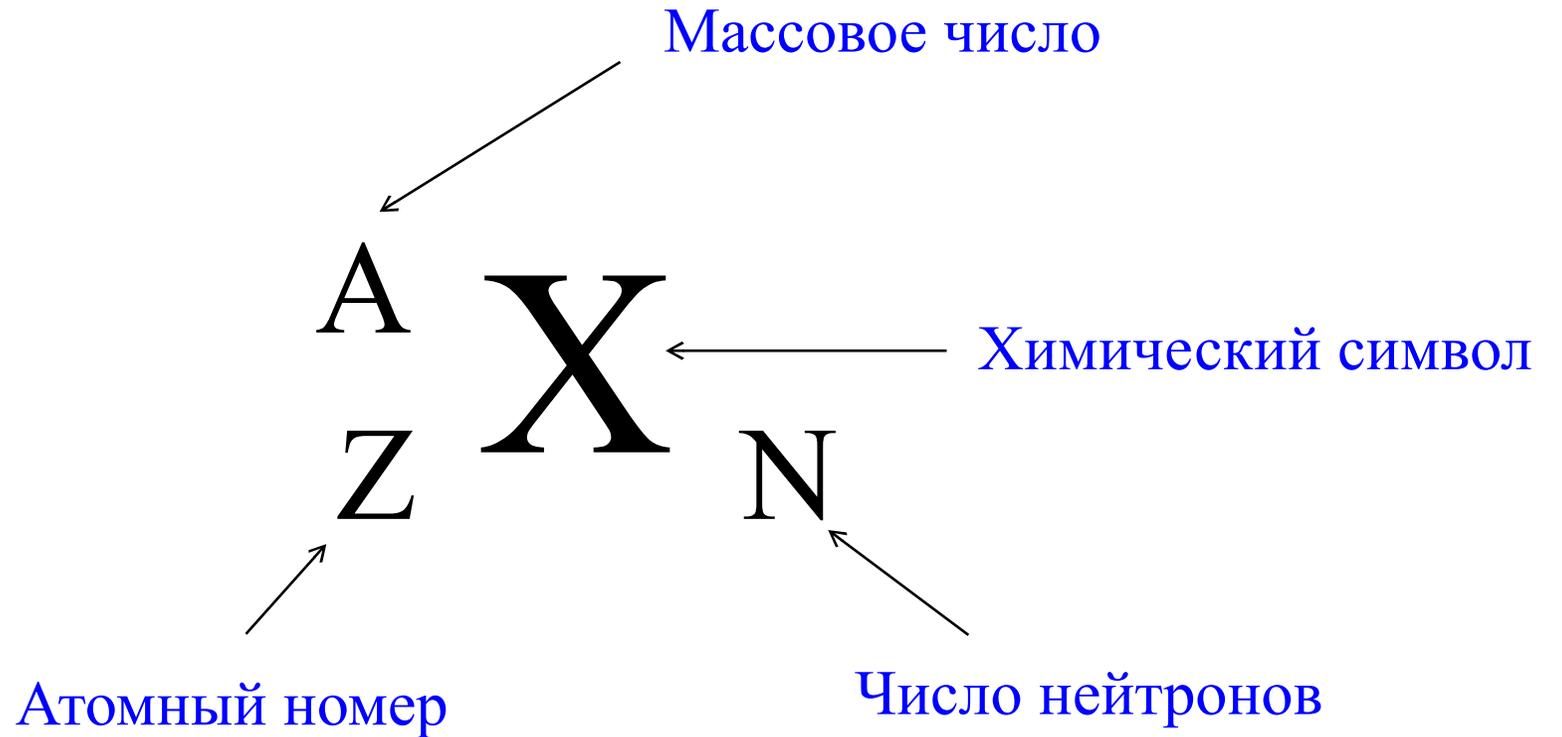
N – число нейтронов ядре

$A=Z+N$ – массовое число

$$M_p = 938.27 \text{ MeV}/c^2 \\ (1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$$

$$M_n = 939.56 \text{ MeV}/c^2 \\ (1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$$

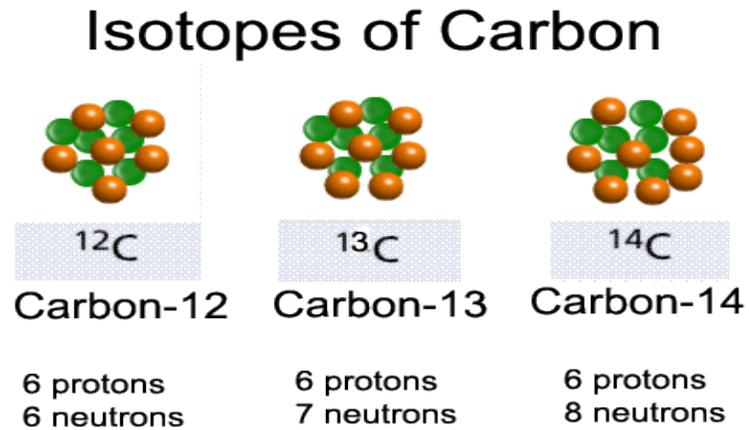
$$M_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2 \\ (9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$$



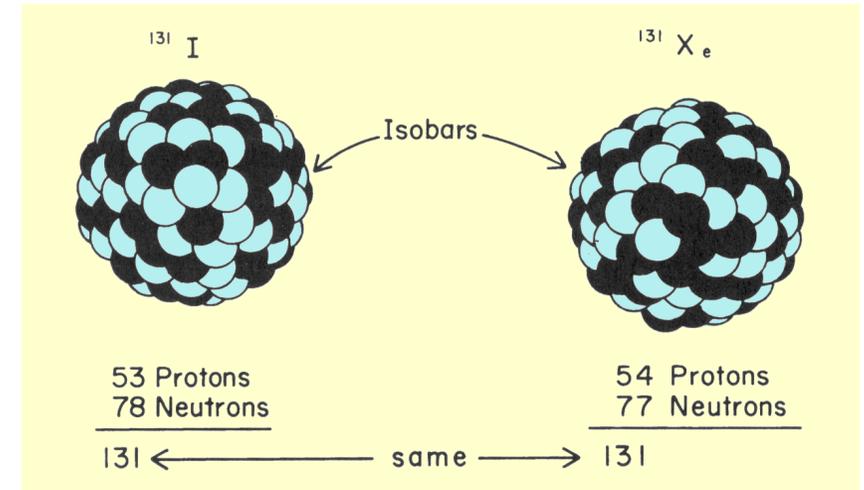
Ядро можно описывать независимо от атомных электронов как систему **нуклонов** (нейтронов и протонов).

При описании ядра, нуклоны считаются элементарными частицами.

Изотопы – ядра с одинаковым зарядом Z



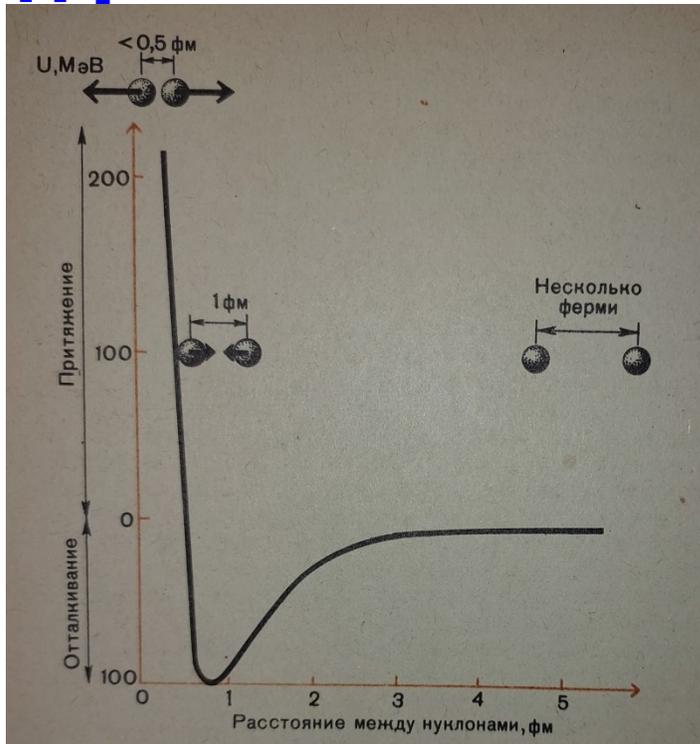
Изобары – с одинаковой массой A



Изотоны – ядра с одинаковым числом нейтронов N



Ядерные силы

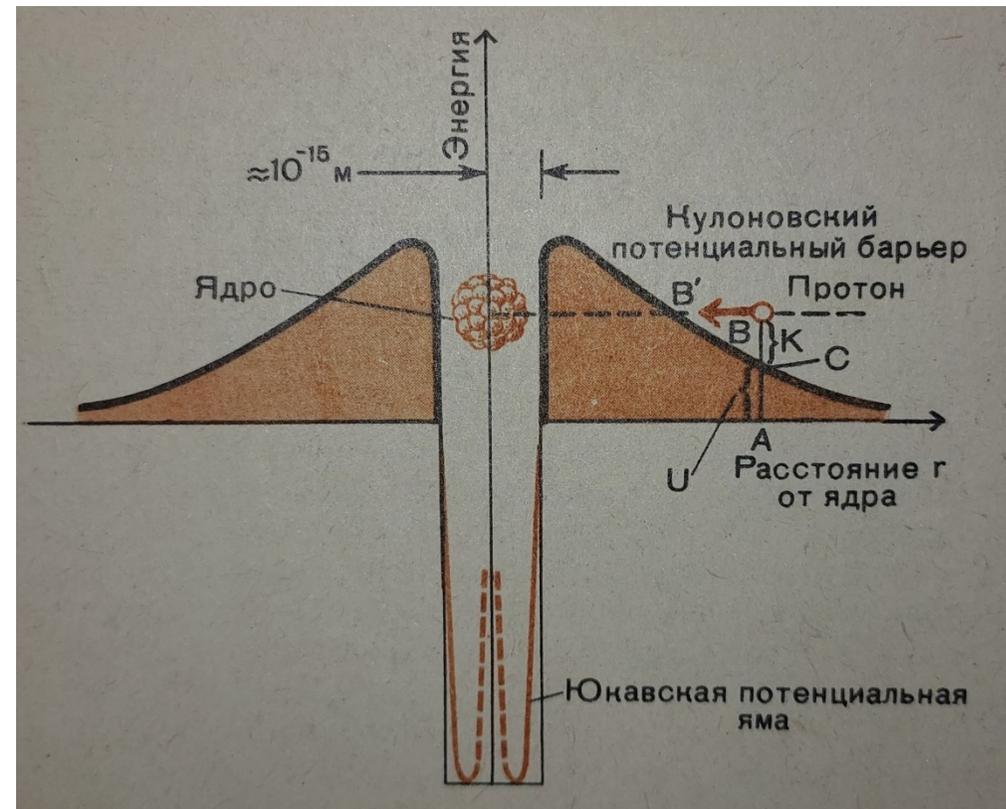


Хидэки Юкава,
23.01.1907— 08.09.1981,
Объяснил основные свойства
ядерных сил, предсказал
существование пиона



Характерные особенности ядерных сил:

- являются короткодействующими
- обладают зарядовой независимостью
- имеют способностью к насыщению



Плотность атомного ядра

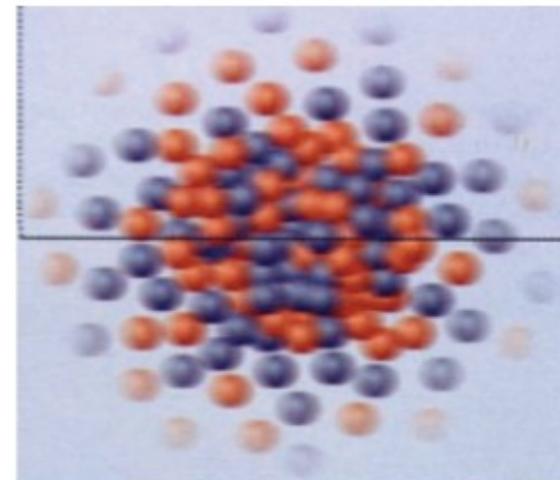
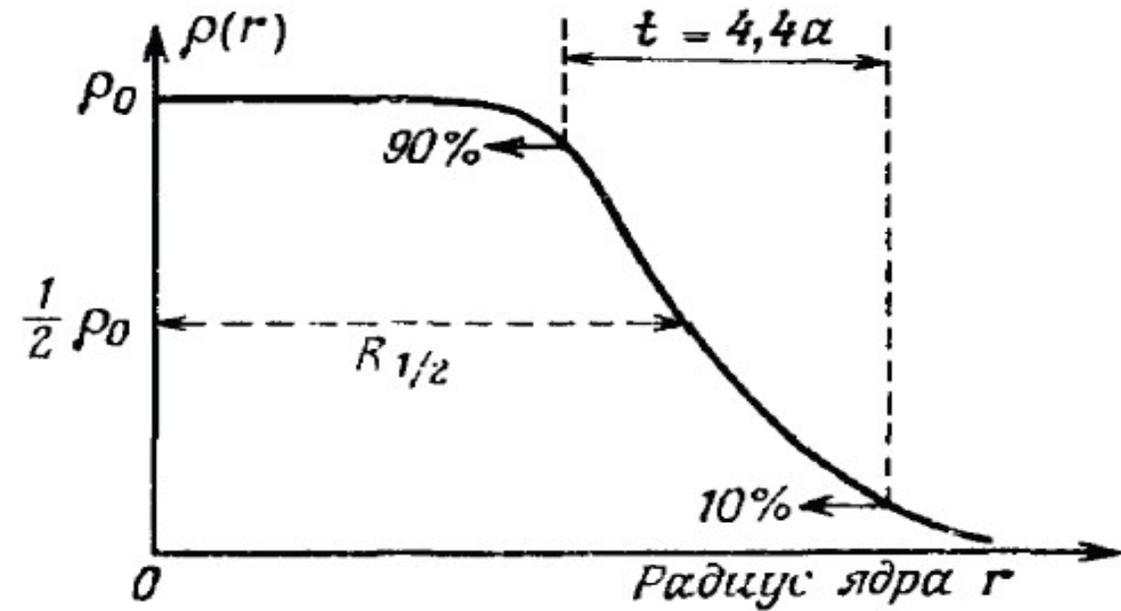
Данные по рассеянию электронов на ядрах:

- Плотность внутри ядра практически постоянна
- У ядра нет жесткой границы
- Плотность ядра может быть описана распределением Ферми:

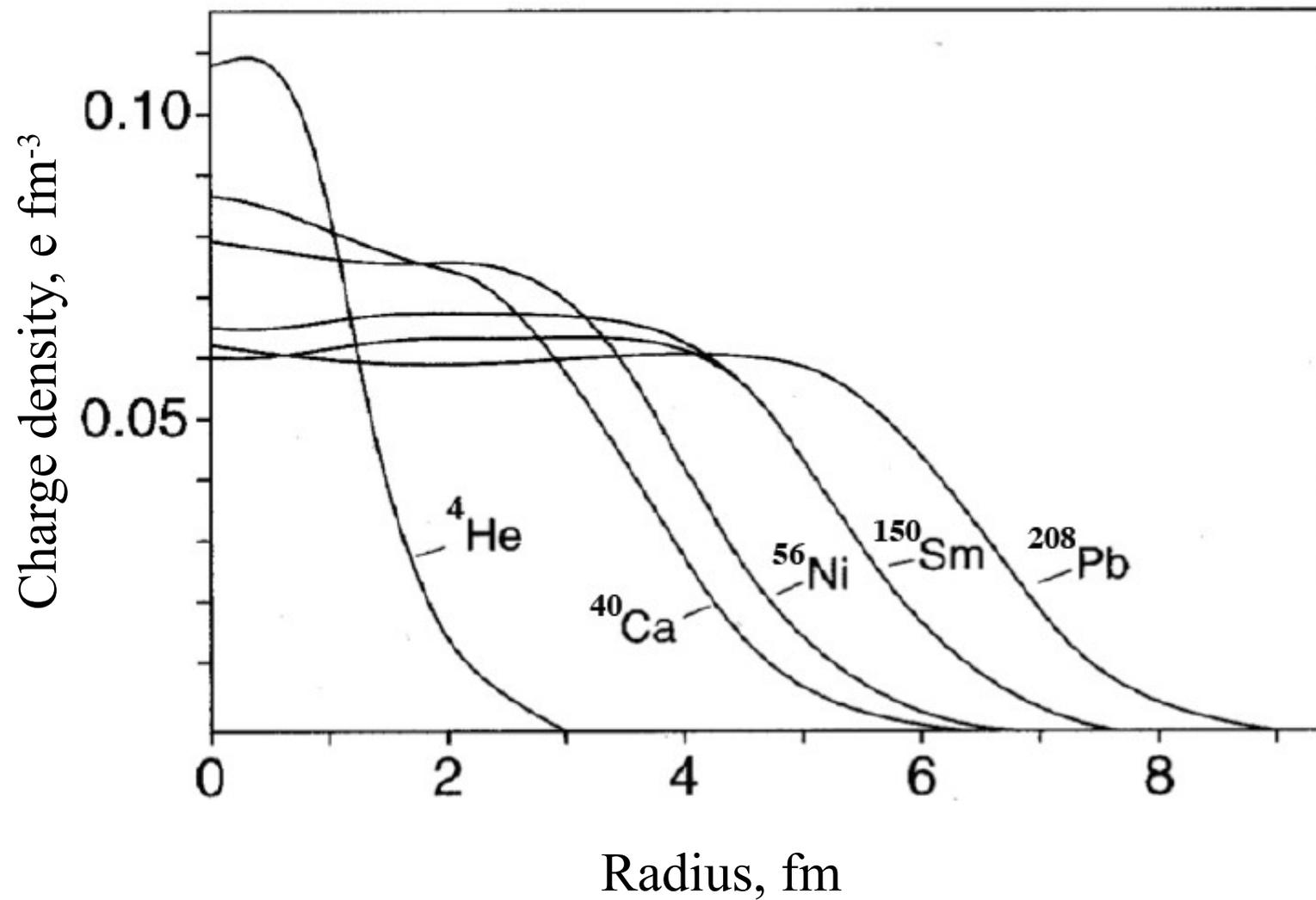
$$\rho(\vec{r}) = \frac{1}{1 + e^{(r - R) / a}}$$

R – радиус ядра

a – диффузность

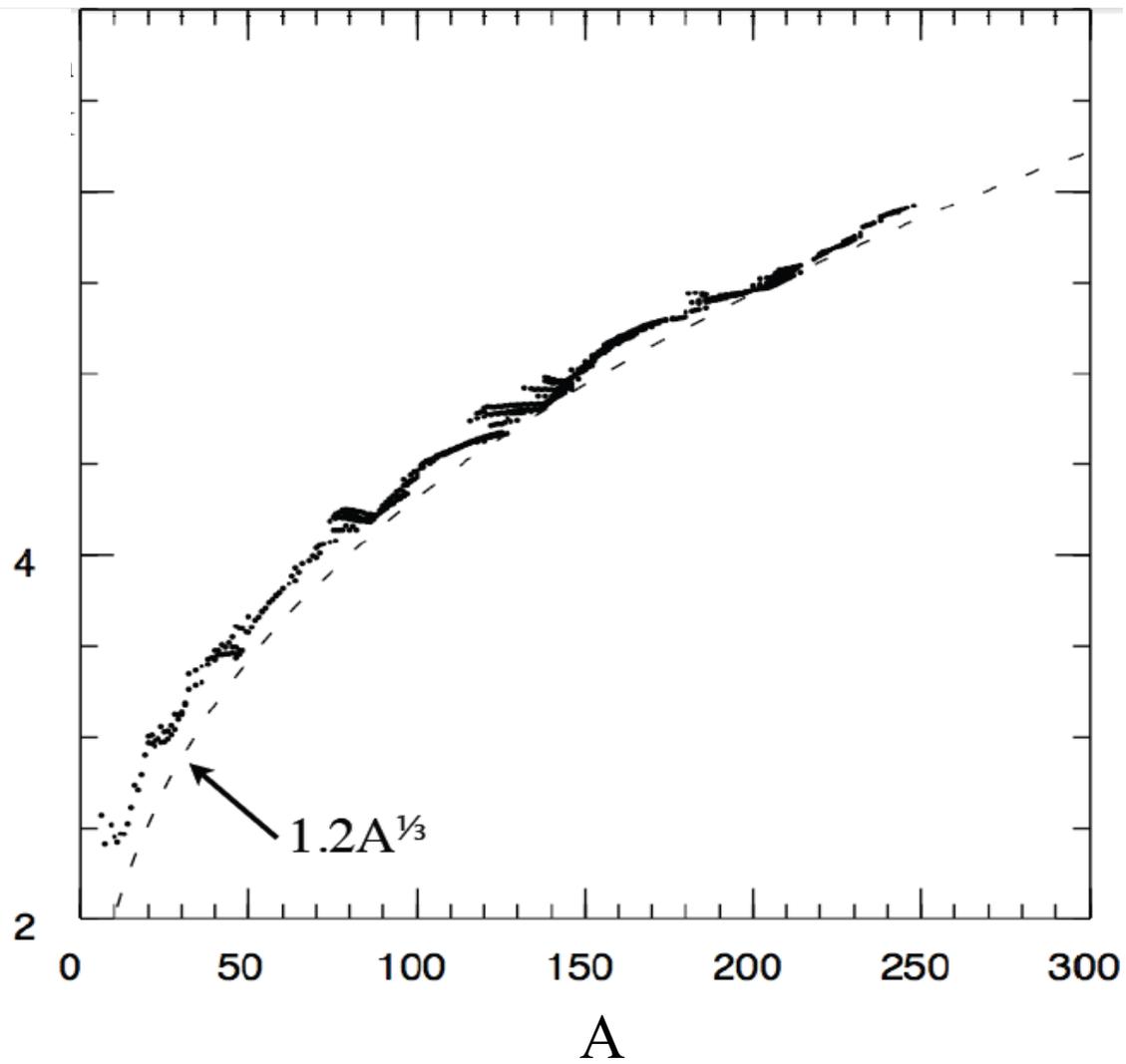


Радиус атомного ядра



Радиус атомного ядра

Radius,
fm

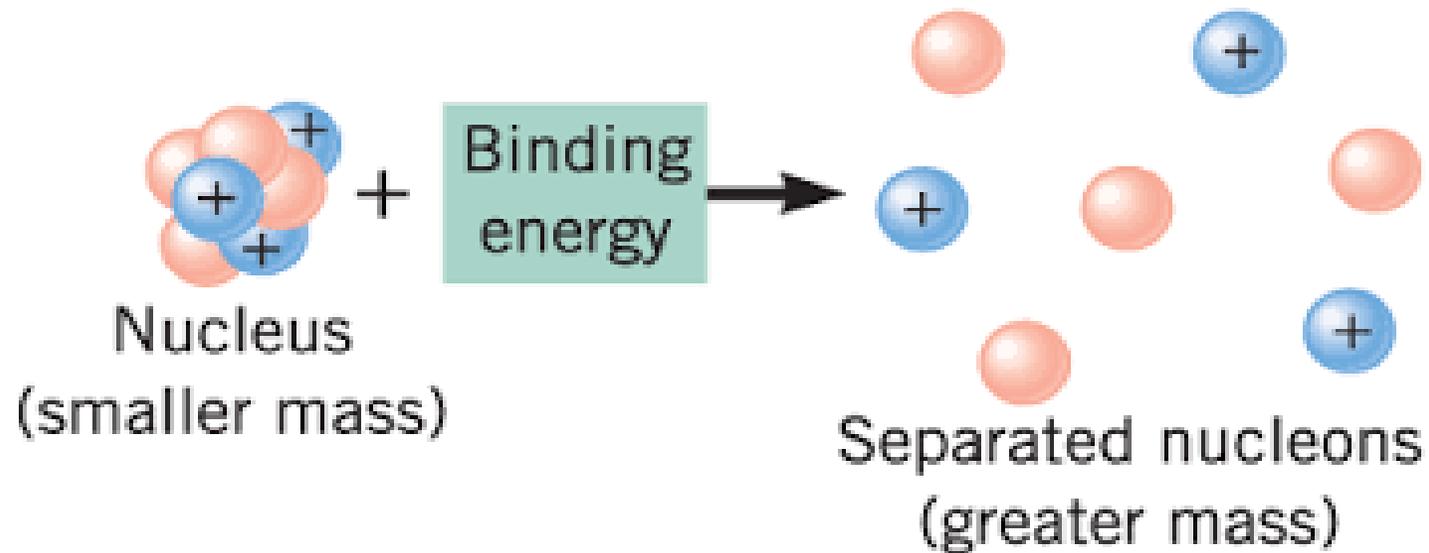


Для ядер с $A > 20$

$$R \approx 1.2 A^{1/3}$$

Энергия связи атомного ядра

Масса ядра меньше чем суммарная масса невзаимодействующих нейтронов и протонов.

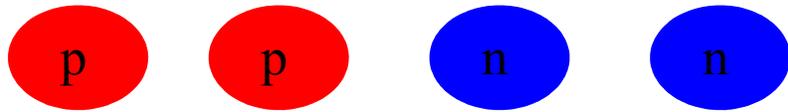


Часть энергии запасена в энергии взаимодействия, связывающей нейтроны и протоны вместе- **энергия связи**

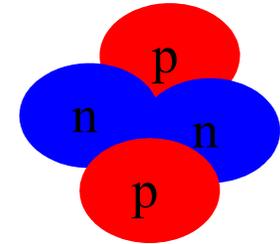
Энергия связи атомного ядра

$$B(Z, N) = N \cdot M_n + Z \cdot M_p - M(Z, A)$$

Пример: ядро Гелия (${}^4\text{He}$, альфа-частица)



$$B({}^4\text{He}) = 28.25 \text{ MeV}/c^2$$



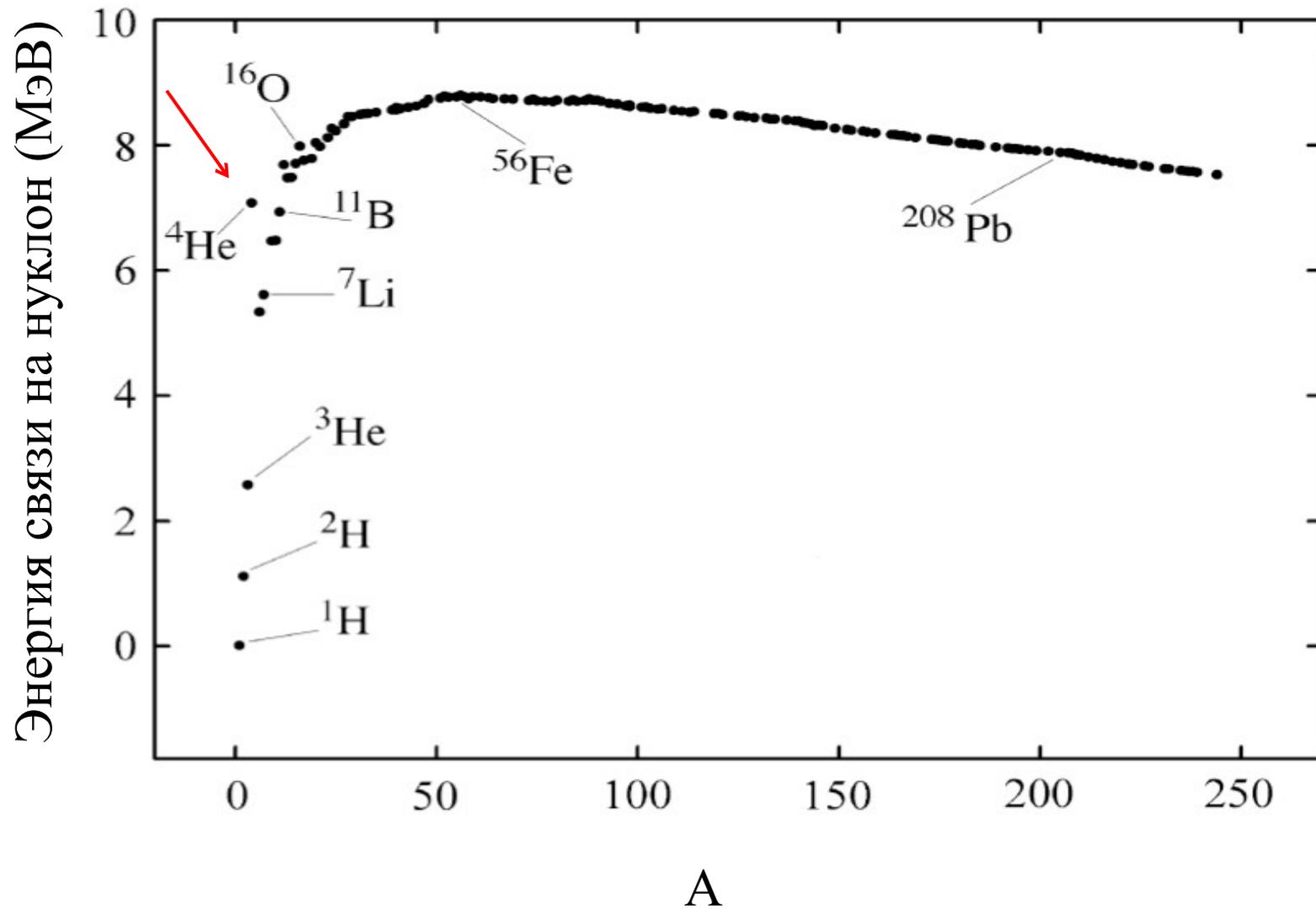
$$2 \cdot M_n + 2 \cdot M_p = 3755.66 \text{ MeV}/c^2$$

$$M({}^4\text{He}) = 3727.41 \text{ MeV}/c^2$$

Энергия связи на один нуклон: $B({}^4\text{He})/4 = 7.06 \text{ MeV}/c^2$

Note, that ${}^4\text{He}$ (alpha-particle)
is very strongly bound nucleus!!!

Энергия связи атомного ядра

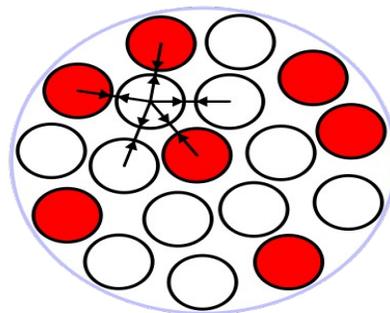


Энергия связи растет практически линейно с ростом массы, как для жидкости

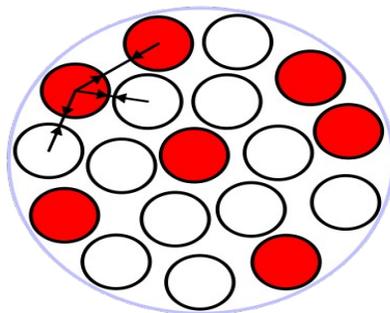


Массовая формула (формула Вайцзеккера)

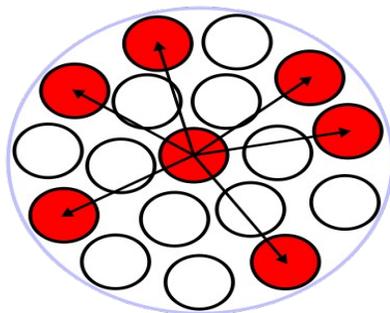
$$B(Z, N) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{symm}} \frac{(Z - A/2)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$



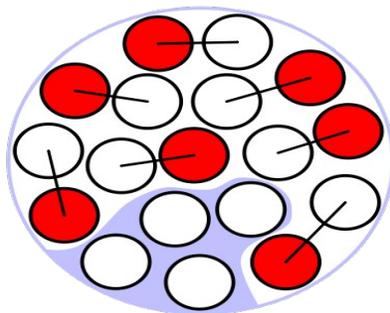
Volume



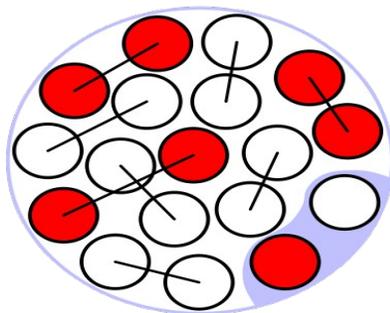
Surface



Coulomb



Asymmetry



Pairing

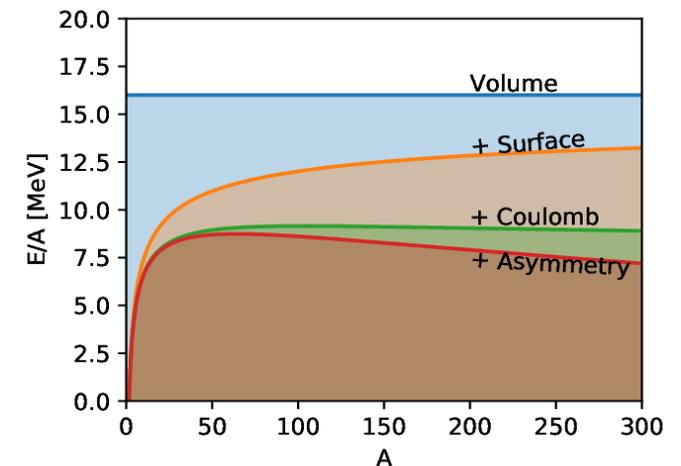
$$a_v = 15.8 \text{ MeV}$$

$$a_s = 17.8 \text{ MeV}$$

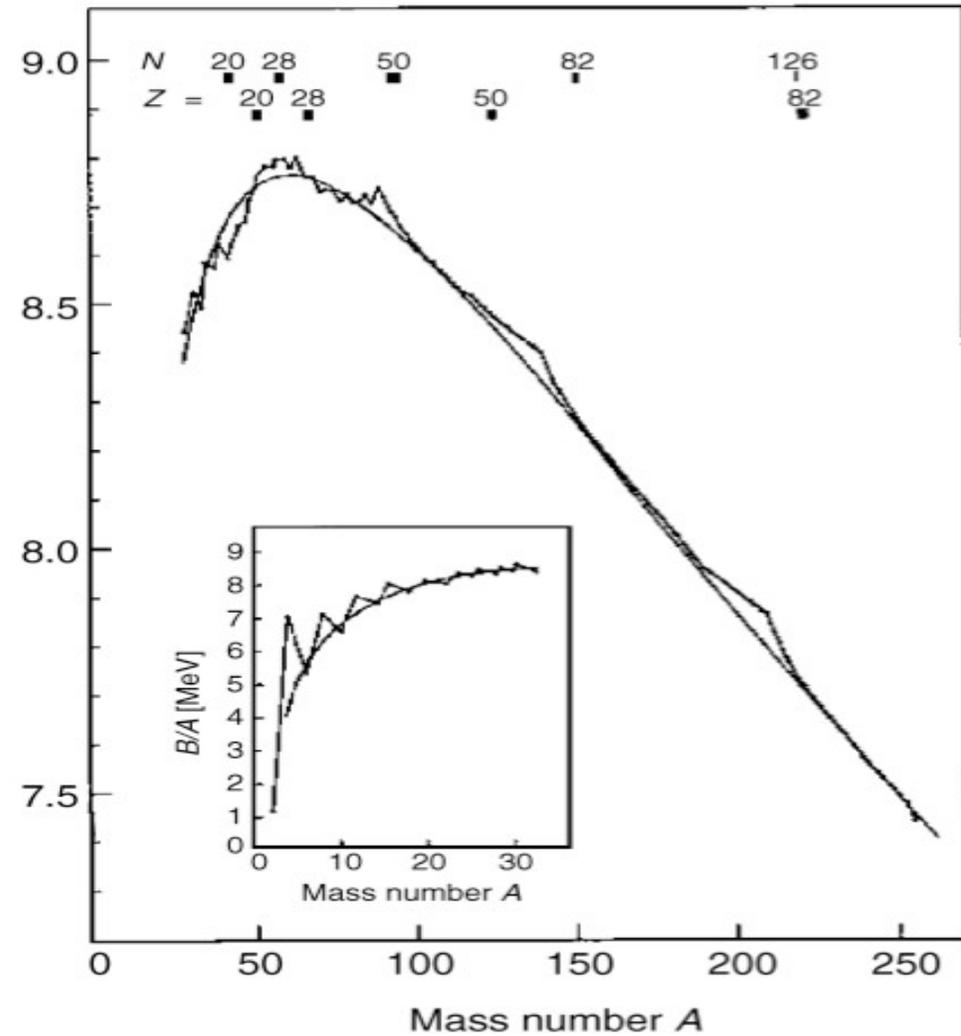
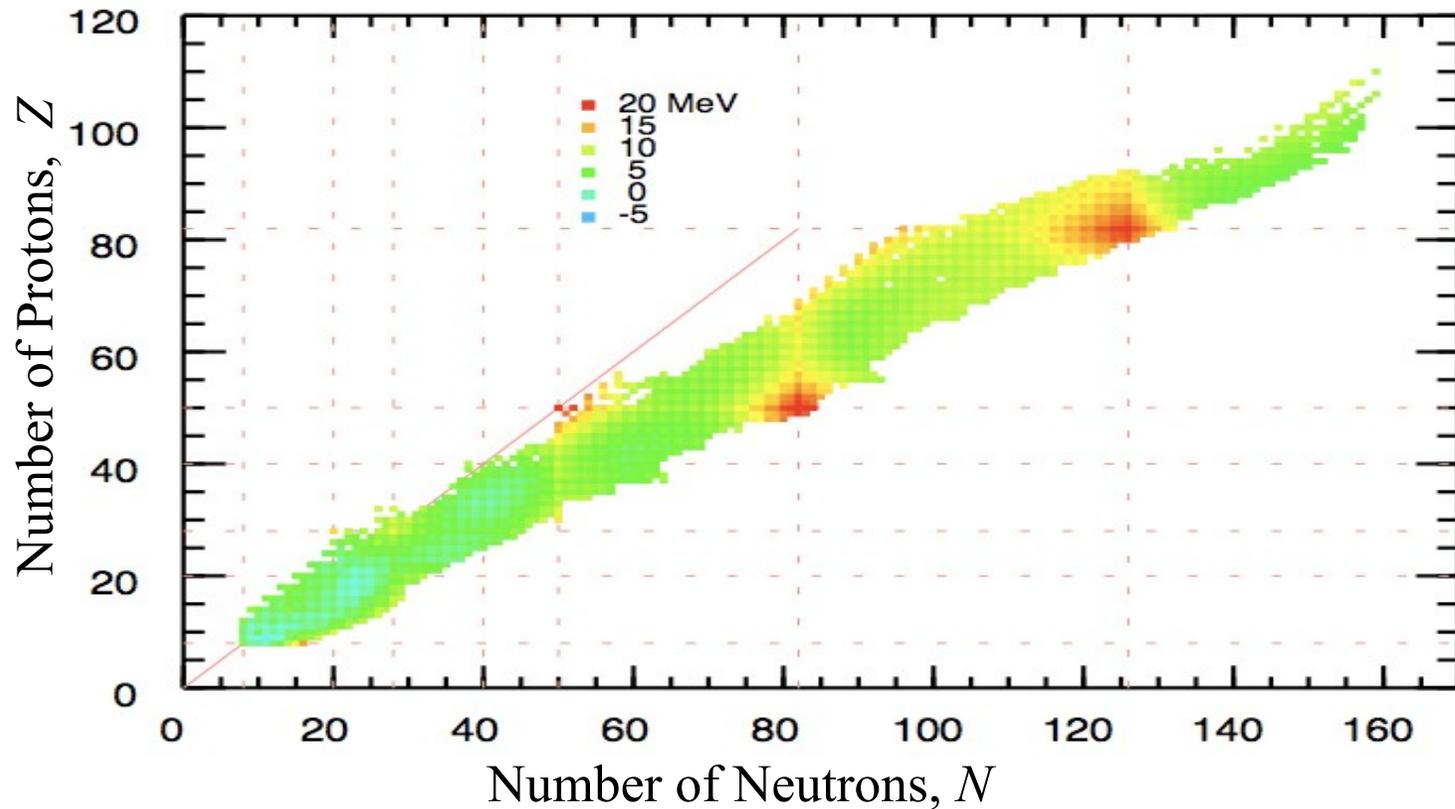
$$a_c = 0.7 \text{ MeV}$$

$$a_{\text{symm}} = 94.8 \text{ MeV}$$

$$\delta = \pm 12 \text{ MeV (четно-четные, нечетно-нечетные ядра)}$$



Оболочечные эффекты (Магические ядра)



Разница между экспериментальными энергиями связи и
Рассчитанными по формуле Вайцзеккера
(существование магических ядер)

Существуют ли ядра только из протонов?

$$B(Z, N) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{symm}} \frac{(Z - A/2)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$B(Z, 0) = \left(a_v - \frac{a_{\text{symm}}}{4} \right) Z - a_s Z^{2/3} - a_c Z^{5/3} < 0$$

Существуют ли ядра только из нейтронов?

$$B(0, N) = \left(a_v - \frac{a_{\text{symm}}}{4} \right) N - a_s N^{2/3} - a_{\text{symm}} \frac{N}{4} + \frac{3}{5} \frac{GM}{r_0} \frac{N^2}{N^{5/3}}$$

$B(0, Z) > 0$ for $N \approx 10^{56}$ or $R \approx 6$ km

Радиус нейтронной звезды: $R \approx 10\text{-}20$ km

Линия стабильности

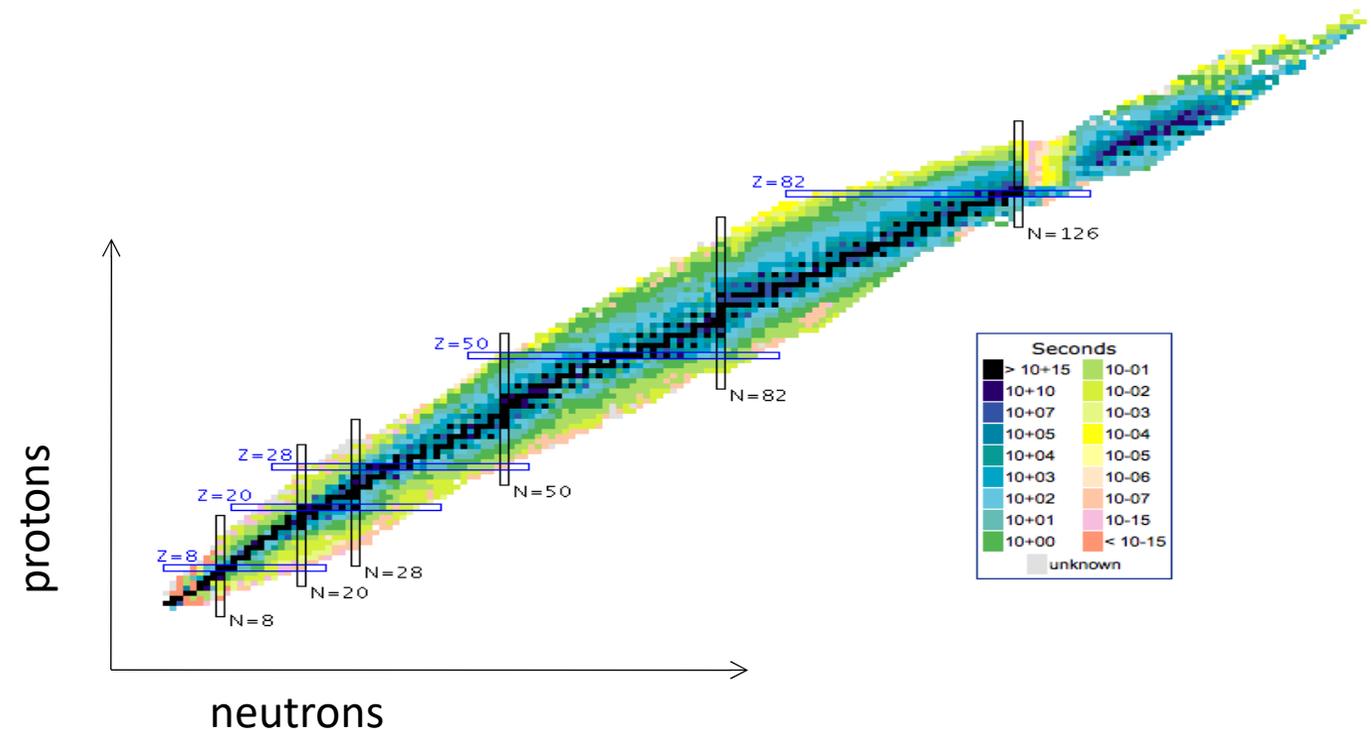
$$B(Z, N) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{symm}} \frac{(Z - A/2)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{1/2}}$$

$$\frac{dB(Z, N)}{dZ} = 0$$

$$-2a_c \frac{Z}{A^{1/3}} - 2a_{\text{symm}} \frac{Z - A/2}{A} = 0$$

$$Z = \frac{A}{2 + 2 \frac{a_c}{a_{\text{symm}}} A^{2/3}}$$

$$Z = \frac{A}{2 + 0.015 A^{2/3}}$$



Для легких ядер: $Z=N=A/2$

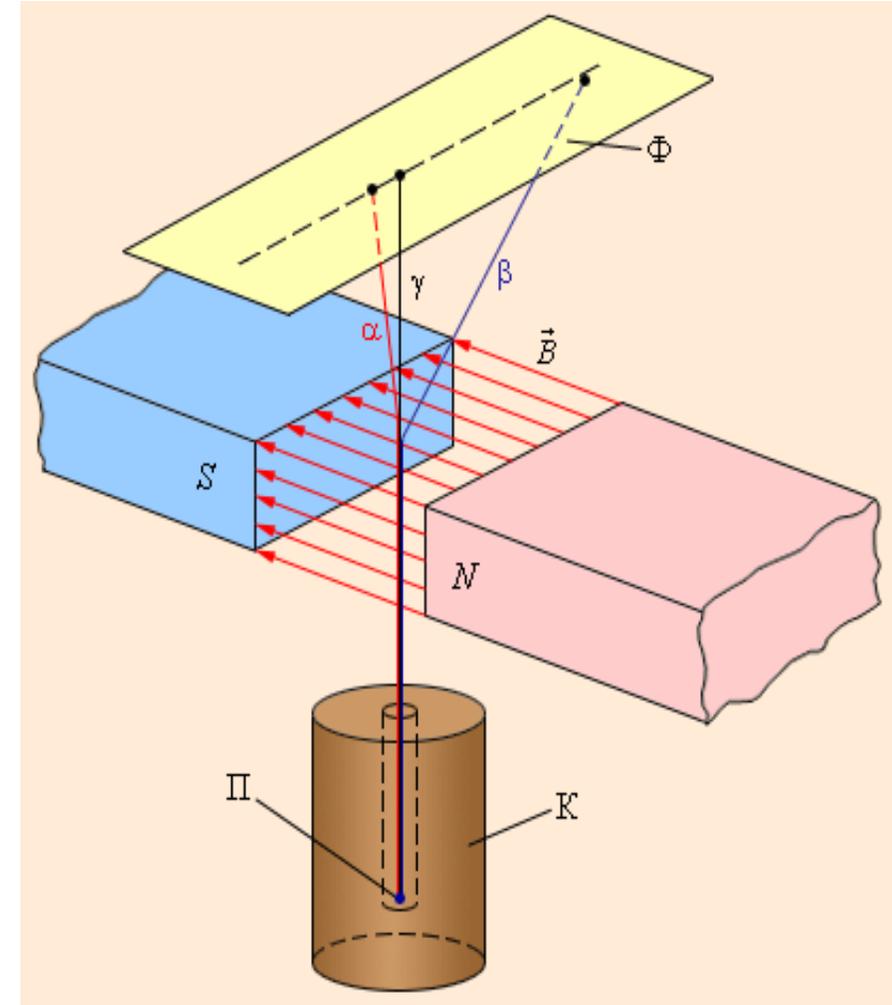
Радиоактивность

1896 г. --- обнаружил излучение, испускаемое урановой рудой;

1898 г. --- Мария и Пьер Кюри выделили 1 грамм радиоактивного вещества (**Полоний, $Z=84$**) из тонны уранита.

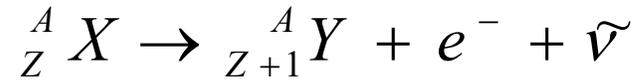
1899 г. --- Английский физик Э.Резерфорд в результате проведенных опытов открыл неоднородность радиоактивного излучения (**альфа-, бета- и гамма-** излучение).

1911 г. --- Мария Кюри выделила радиоактивный элемент - **Радий, $Z=86$** .

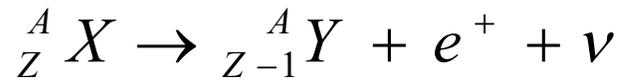
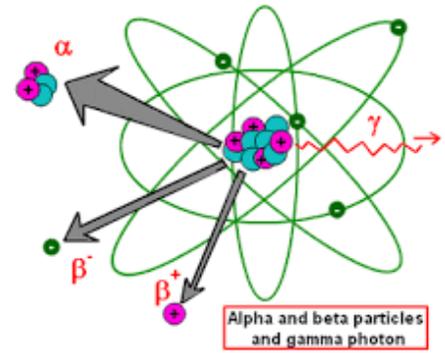


Радиоактивность

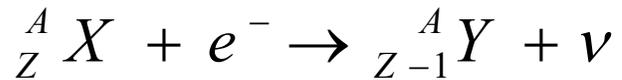
1) β -decay



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

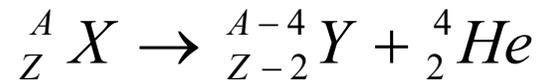


- β^+ decay $M(A, Z) > M(A, Z - 1) + m_e$
 $(p \rightarrow n + e^+ + \nu)$



- e-capture $M(A, Z) > M(A, Z - 1) + m_e$
 $(p + e^- \rightarrow n + \nu)$

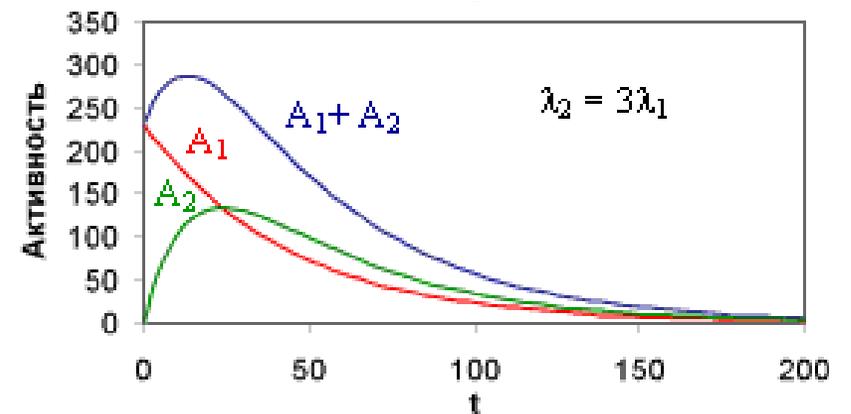
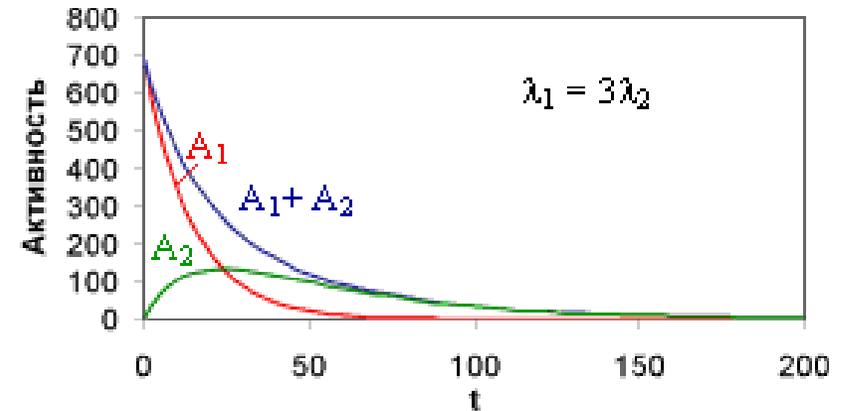
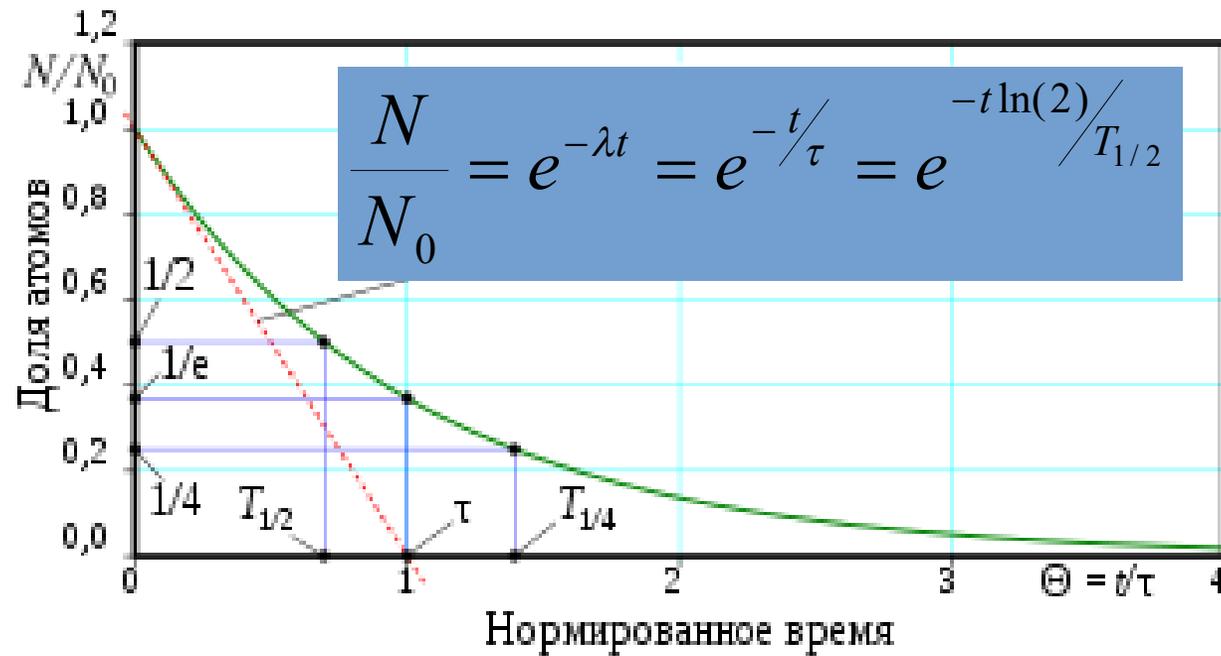
2) α -decay ($Z > 83$)



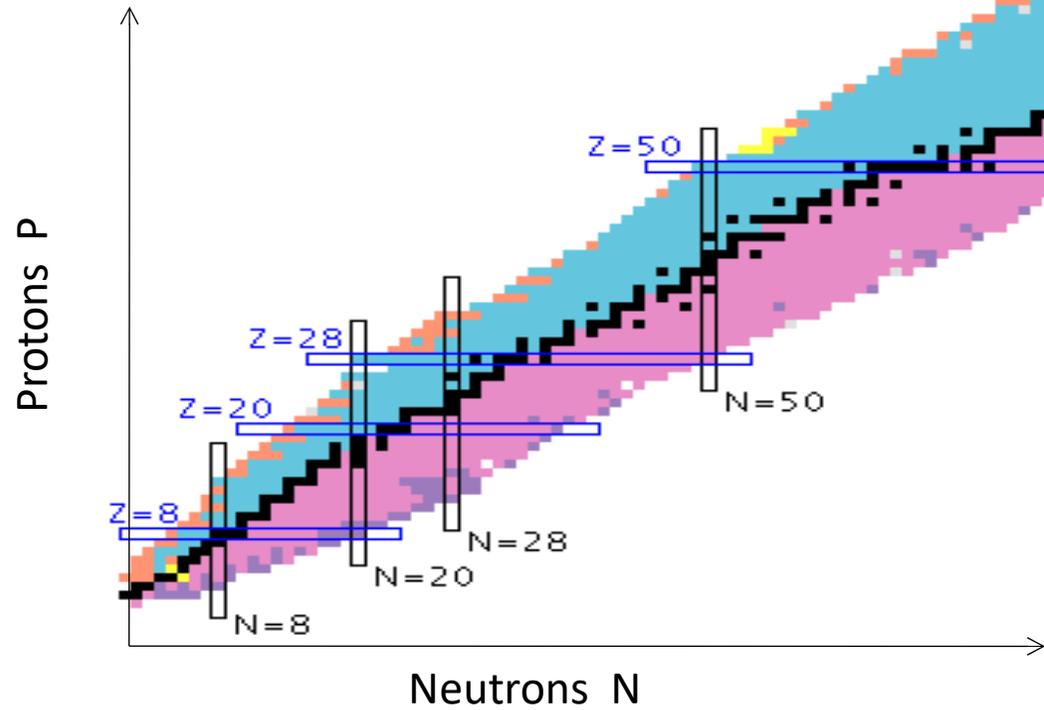
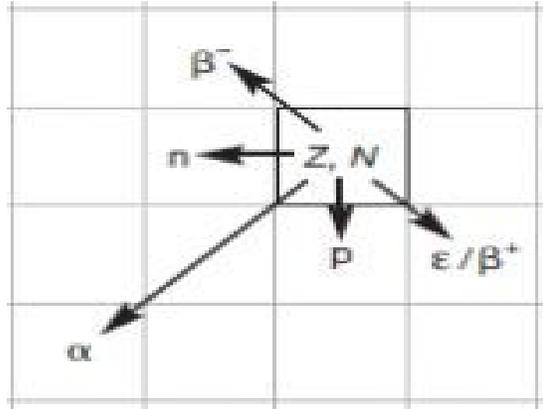
$M(A, Z) > M(A - 4, Z - 2) + M({}^4_2 He)$

3) Proton or neutron emission

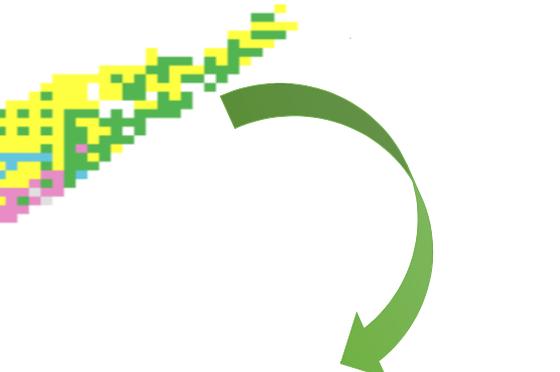
Радиоактивность



Карта нуклидов



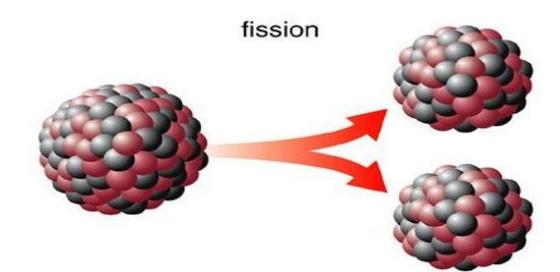
- Stable
- EC+β+
- β-
- α
- P
- N
- SF
- Unknown



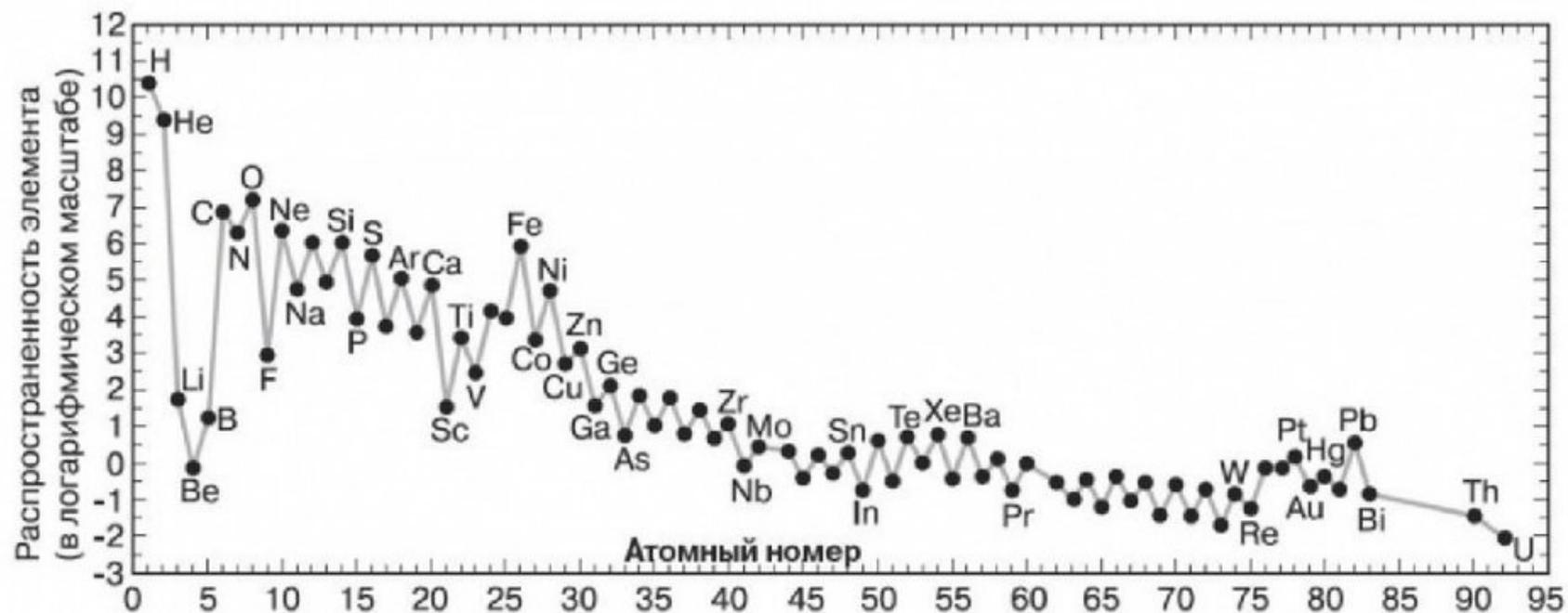
$${}^z A^z_V + {}^1 A^1_V \leftarrow X^Z_V$$

$$Z = {}^z Z + {}^1 Z \quad A = {}^z A + {}^1 A$$

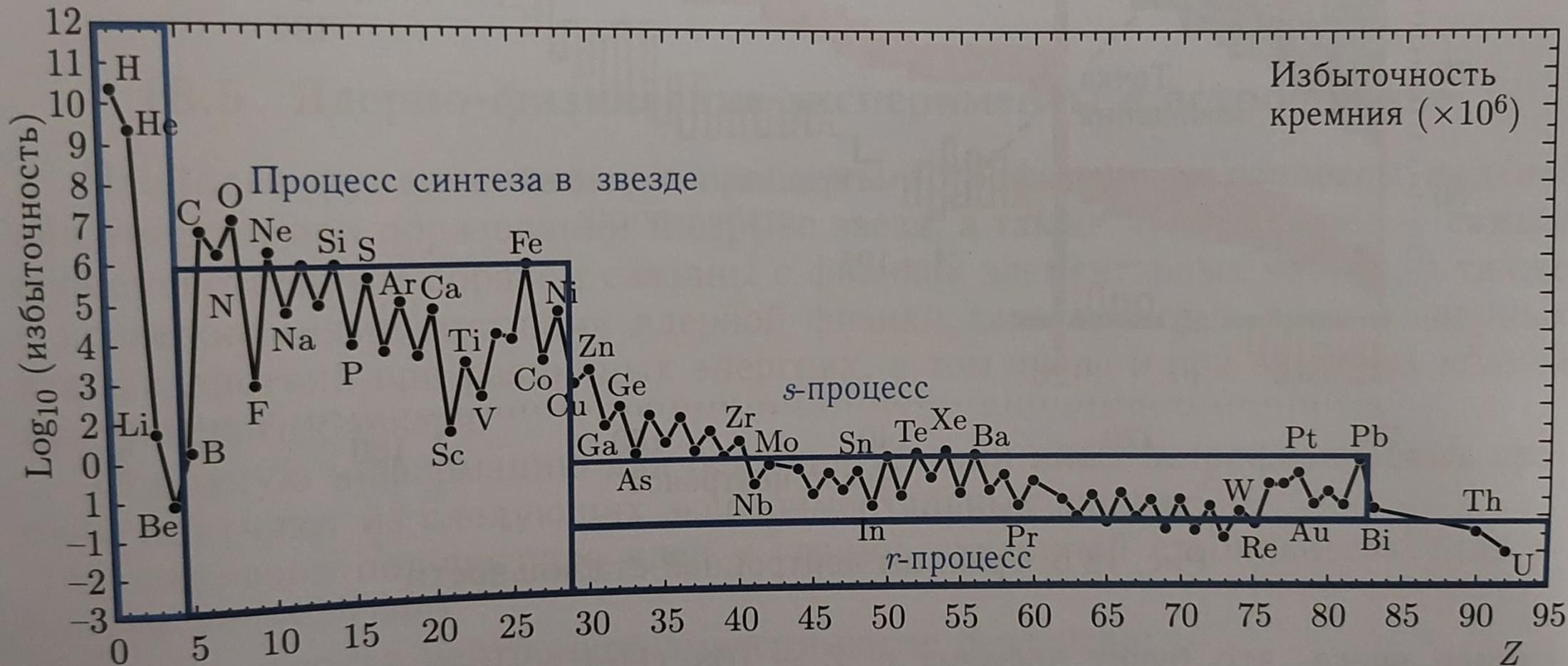
$$M(A, Z) > M(A_1, Z_1) + M(A_2, Z_2)$$



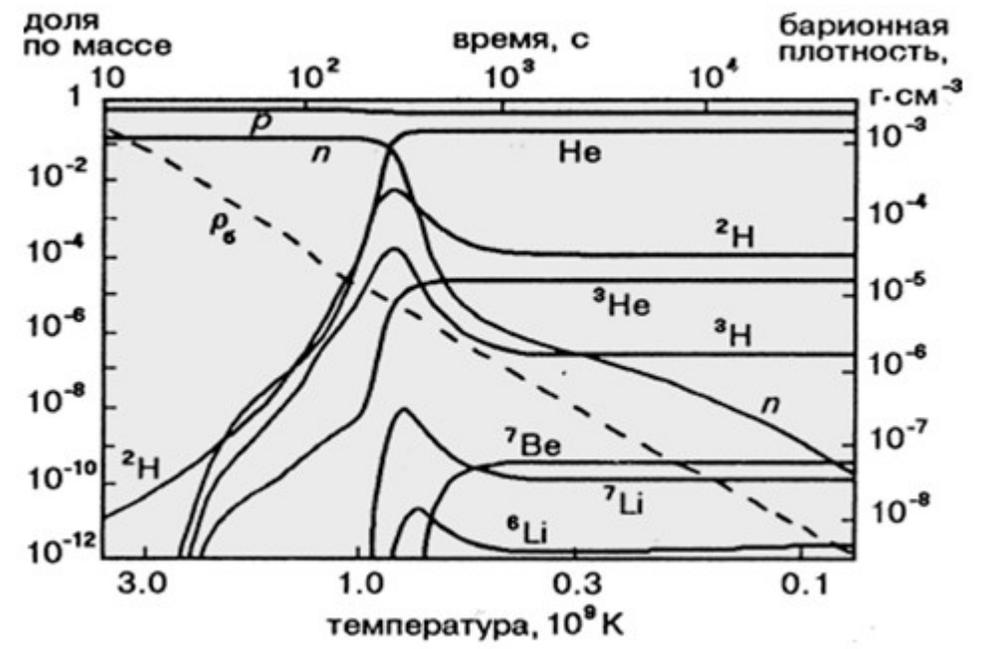
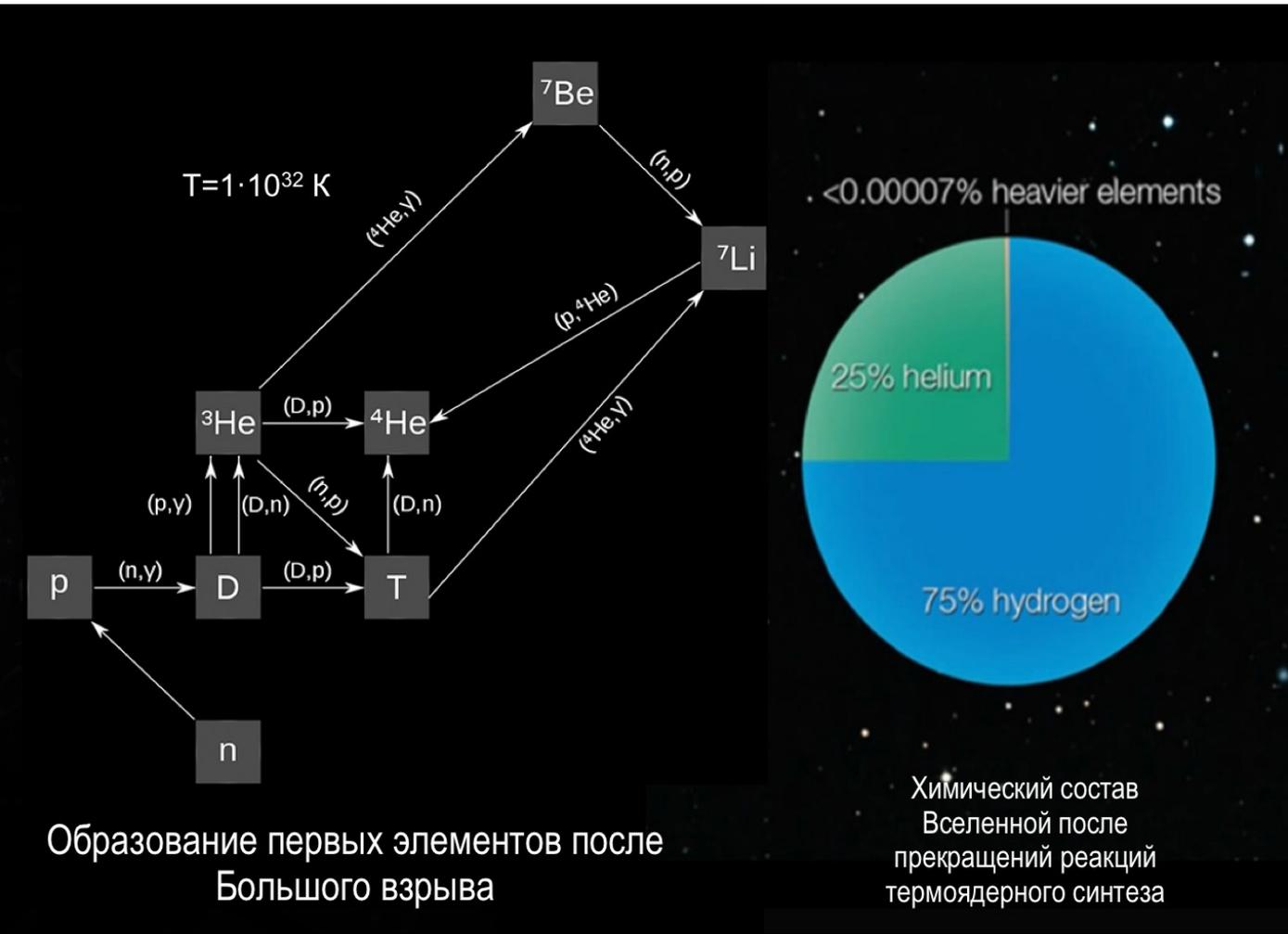
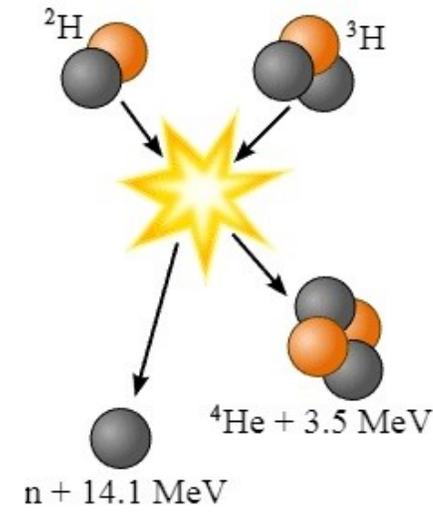
Распространенность химических элементов во Вселенной



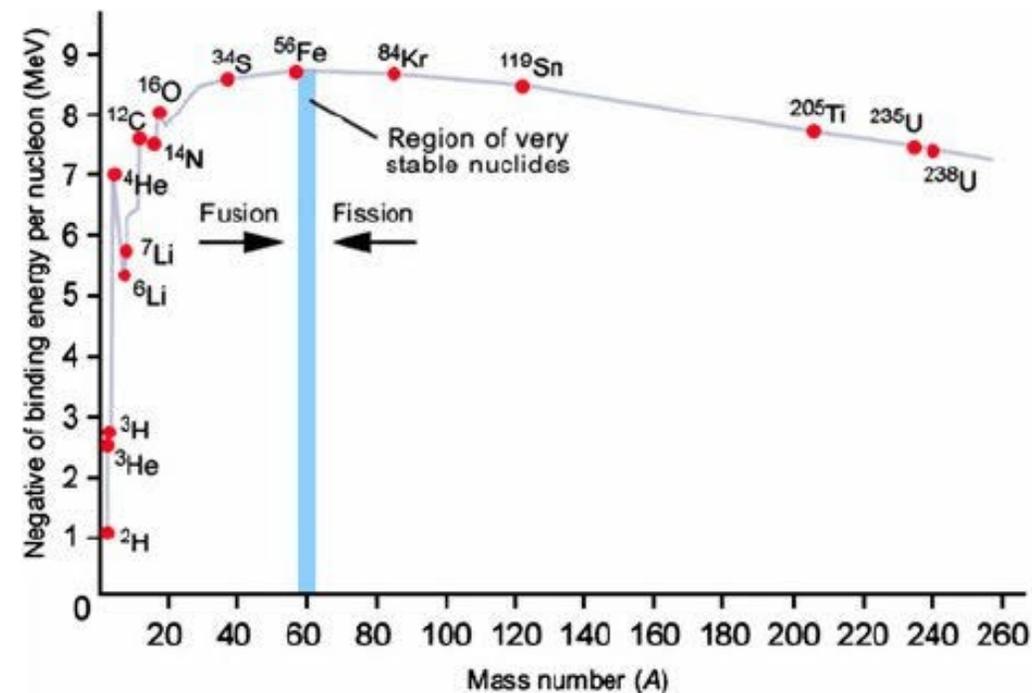
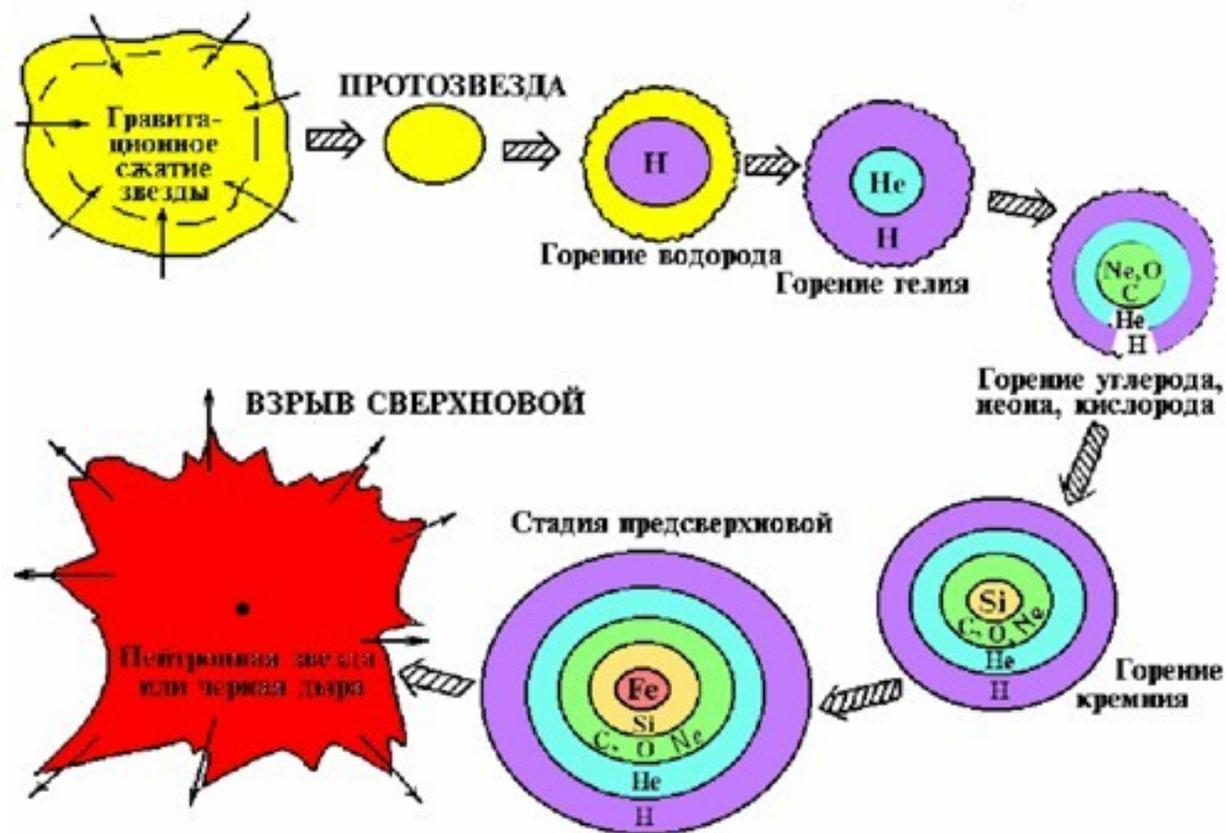
После Большого взрыва



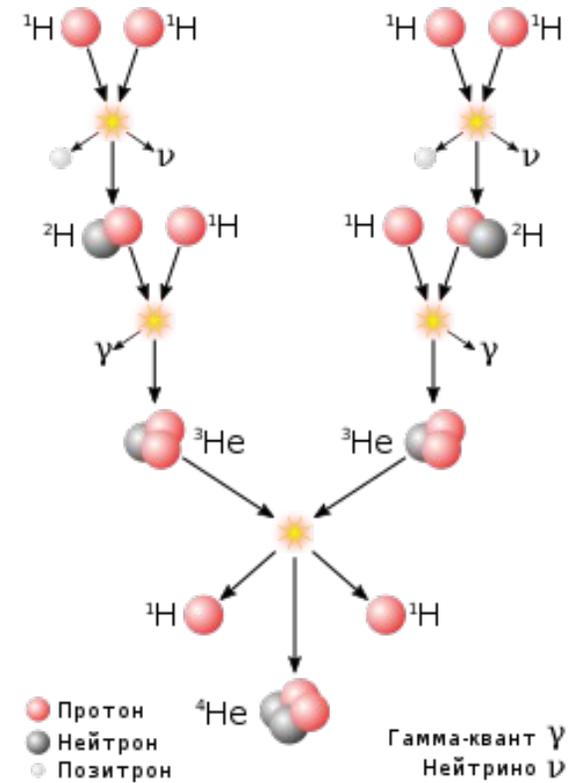
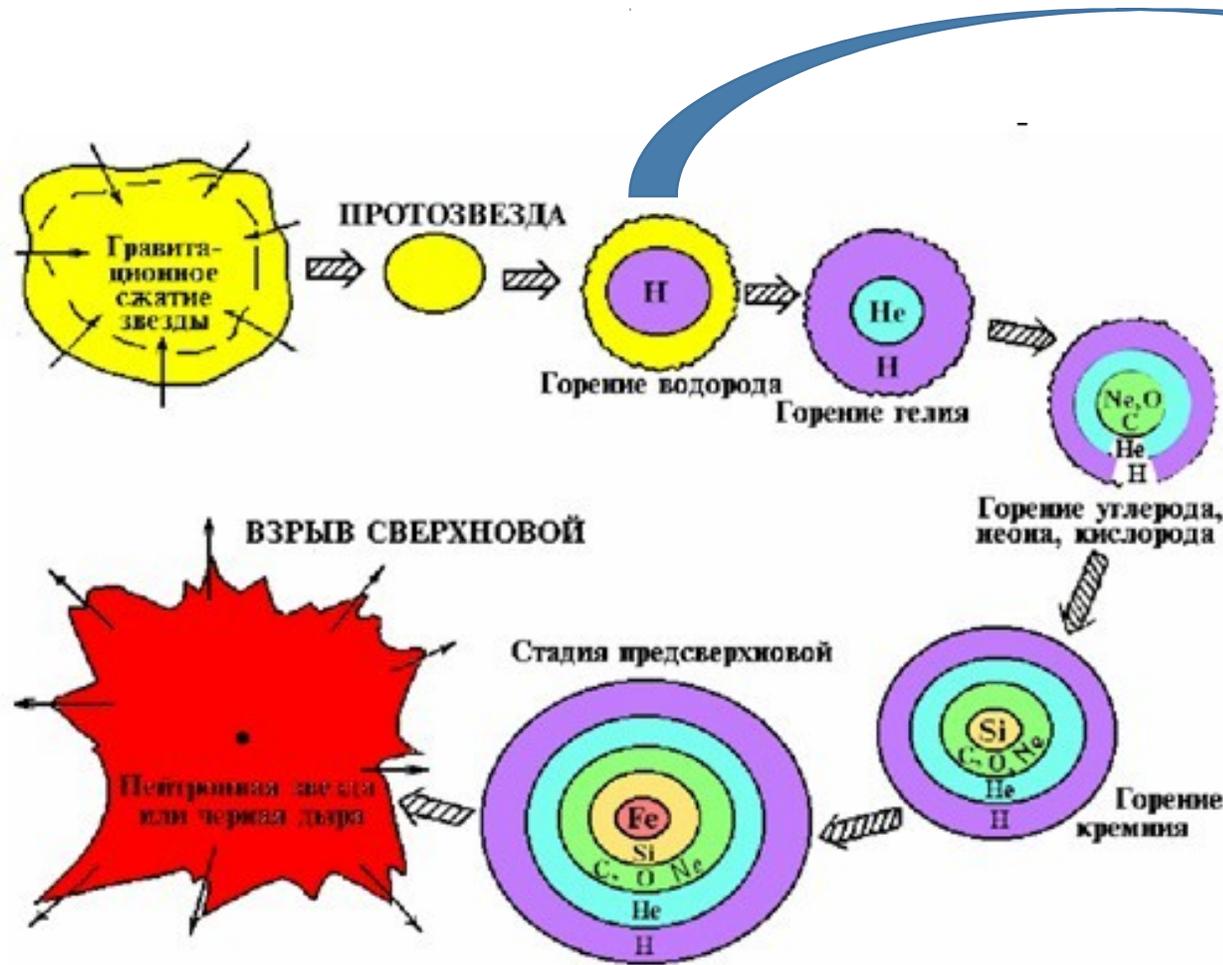
Первичный синтез ядер



Образование химических элементов внутри звезд

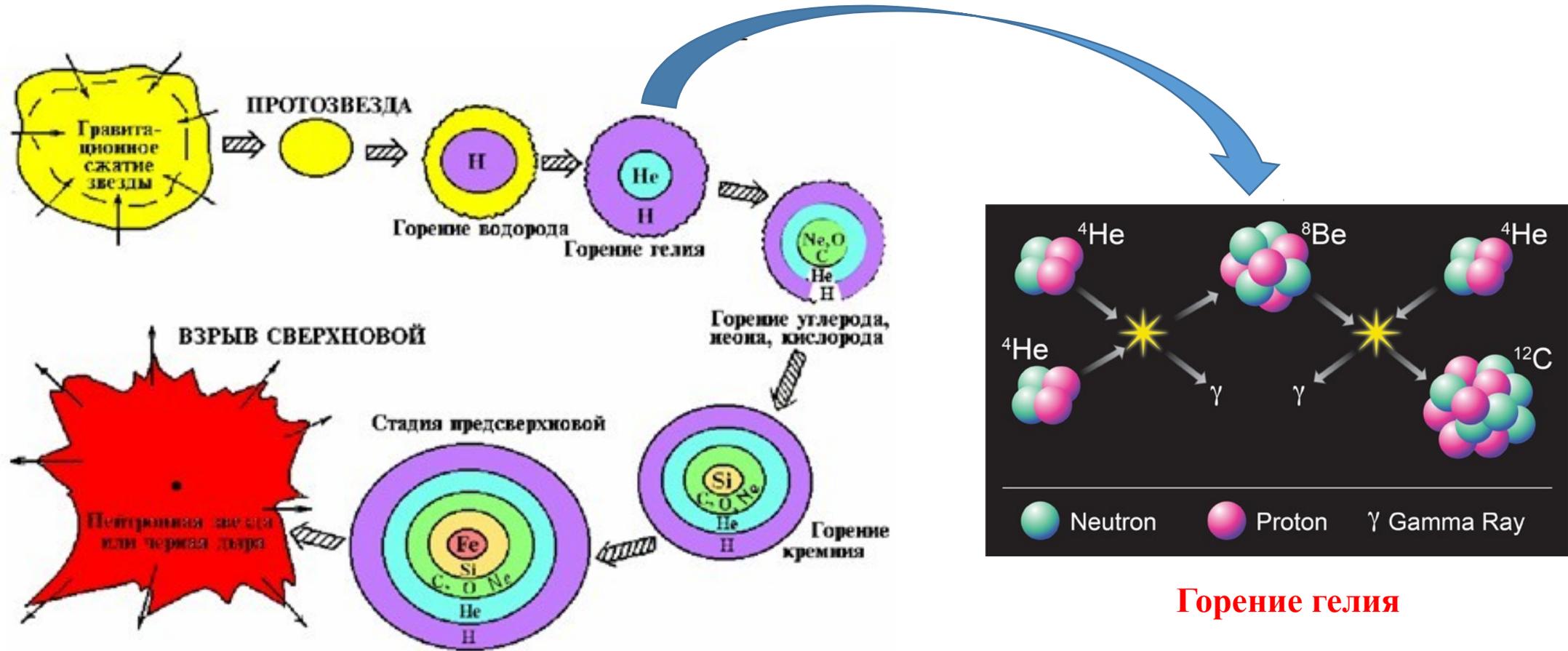


Образование химических элементов внутри звезд

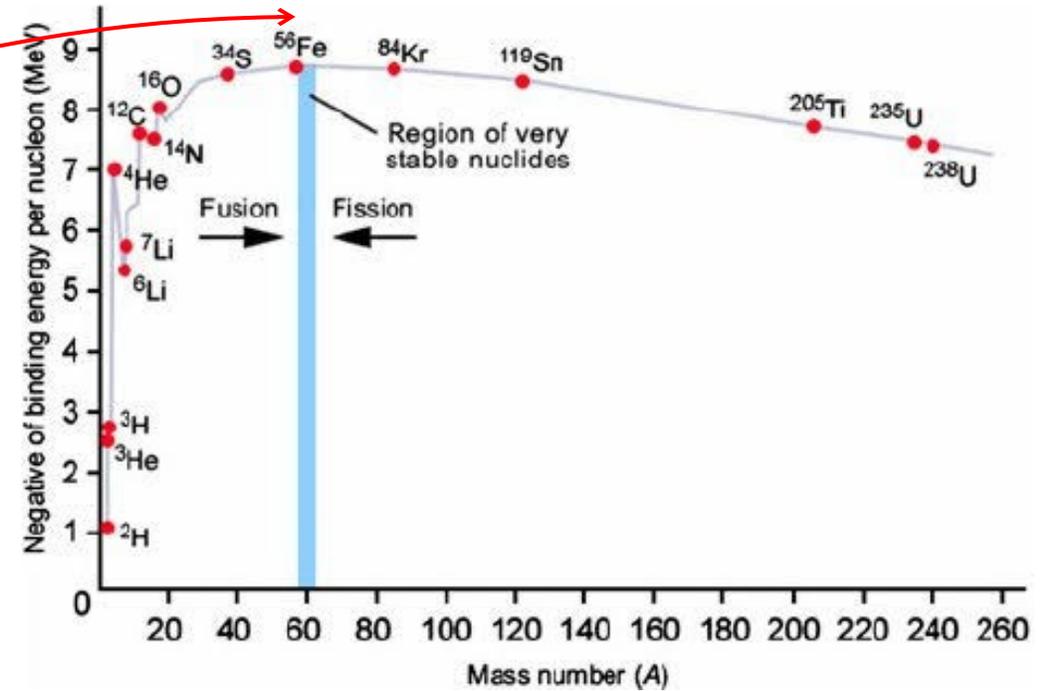
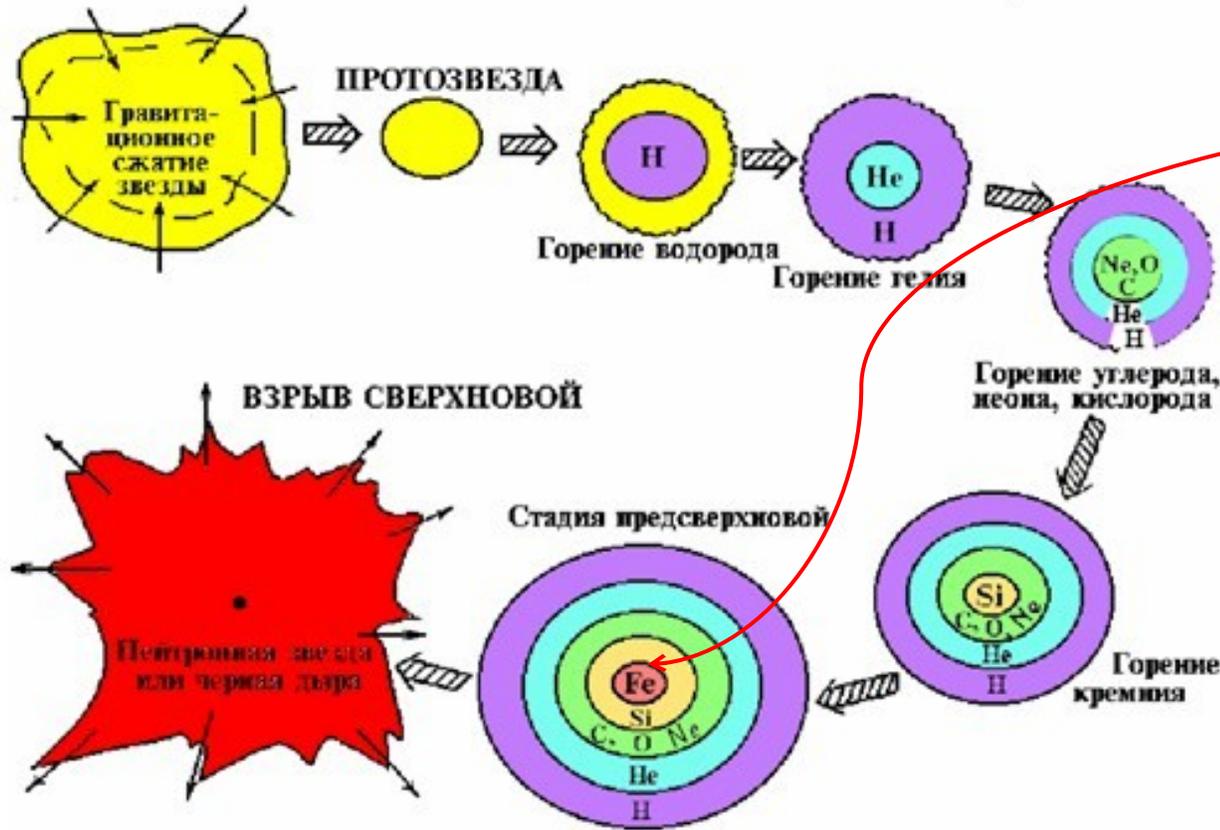


Горение водорода

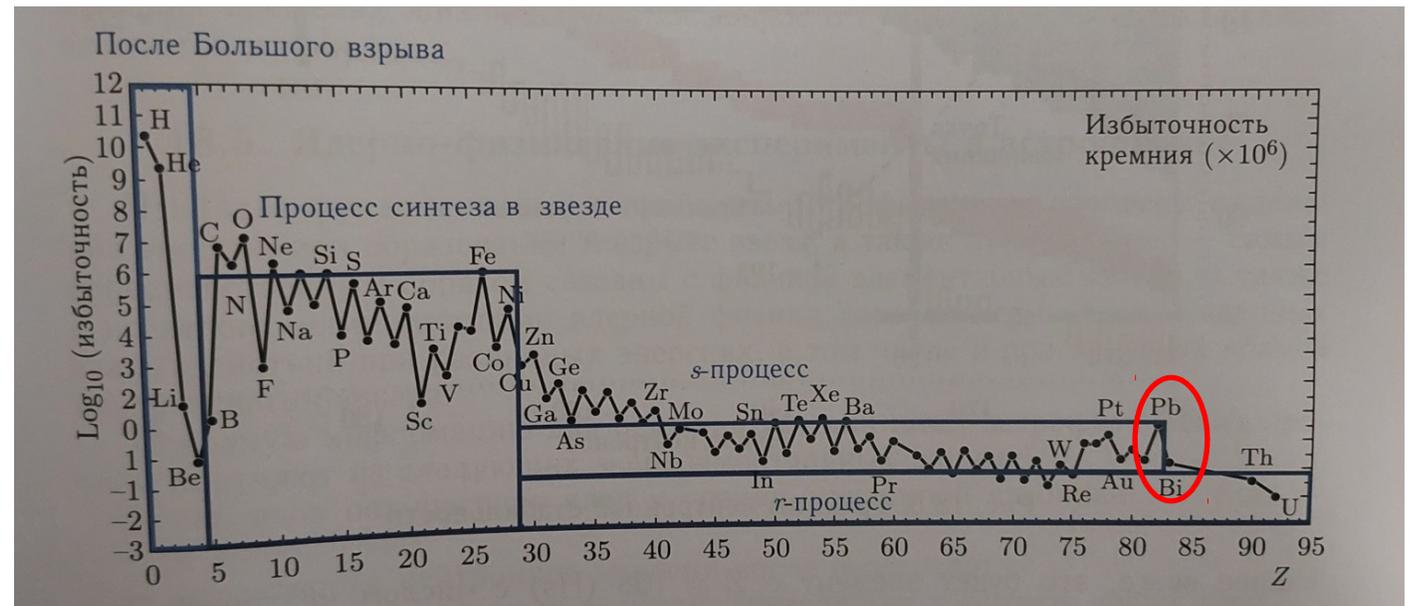
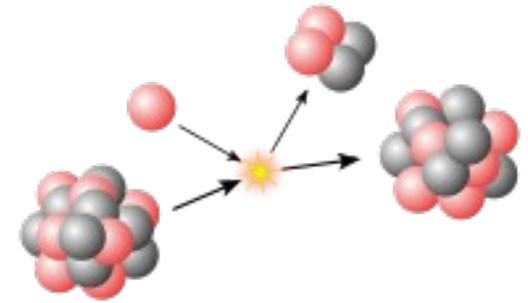
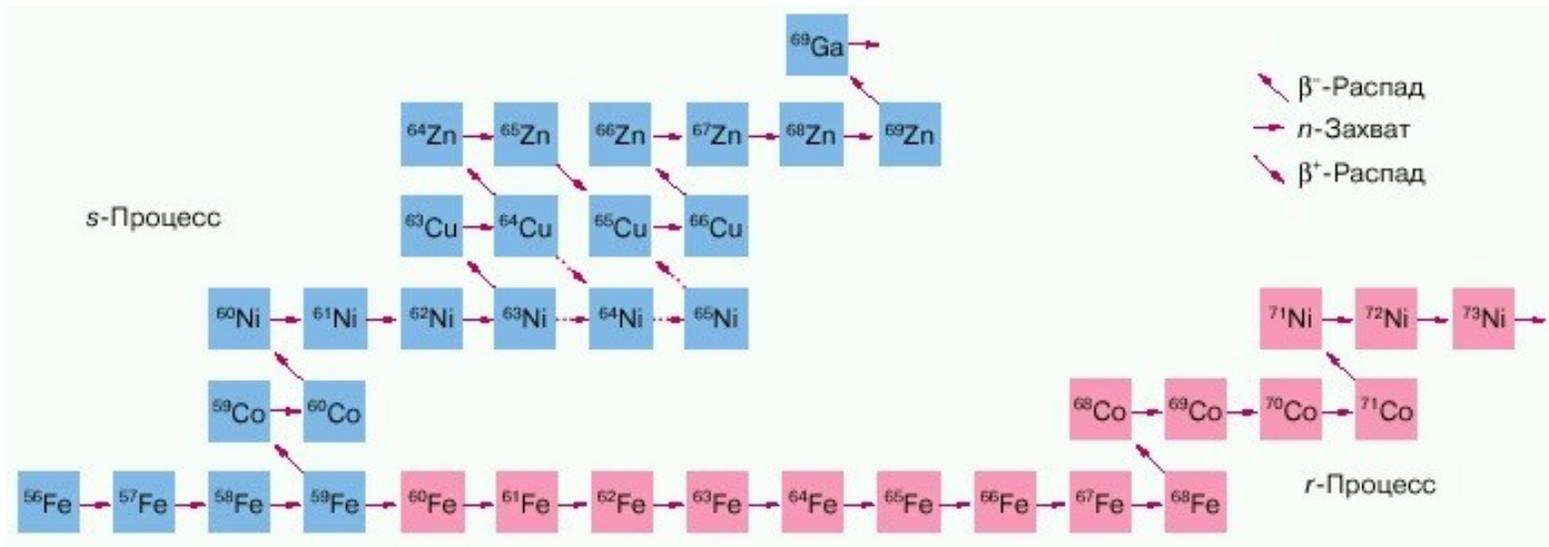
Образование химических элементов внутри звезд



Образование химических элементов внутри звезд



Процессы захвата медленных (*s*) и быстрых нейтронов (*r*)



группы элементов

период	группа	группы элементов															
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	VIII		VIII		VIII			
1	I	H 1															He 2
2	II	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10								
3	III	Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18								
4	IV	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26								
	V	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36								
5	VI	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46						
	VII	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54								
6	VIII	Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78						
	IX	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86								
7	X	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110						
	XI	111	112	113	114	115	116	117	118								



Д.И. Менделеев
1834 - 1907

- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

Лантаноиды Lanthanides

Ce 4f ¹	Pr 4f ²	Nd 4f ³	Pm 4f ⁴	Sm 4f ⁵	Eu 4f ⁶	Gd 4f ⁷	Tb 4f ⁸	Dy 4f ⁹	Ho 4f ¹⁰	Er 4f ¹¹	Tm 4f ¹²	Yb 4f ¹³	Lu 4f ¹⁴
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

Актиноиды Actinides

Th 5f ⁰	Pa 5f ¹	Np 5f ⁴	Pu 5f ⁶	Am 5f ⁷	Cm 5f ⁷	Bk 5f ⁹	Cf 5f ¹⁰	Es 5f ¹¹	Fm 5f ¹²	Md 5f ¹³	No 5f ¹⁴	Lr 5f ¹⁴
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

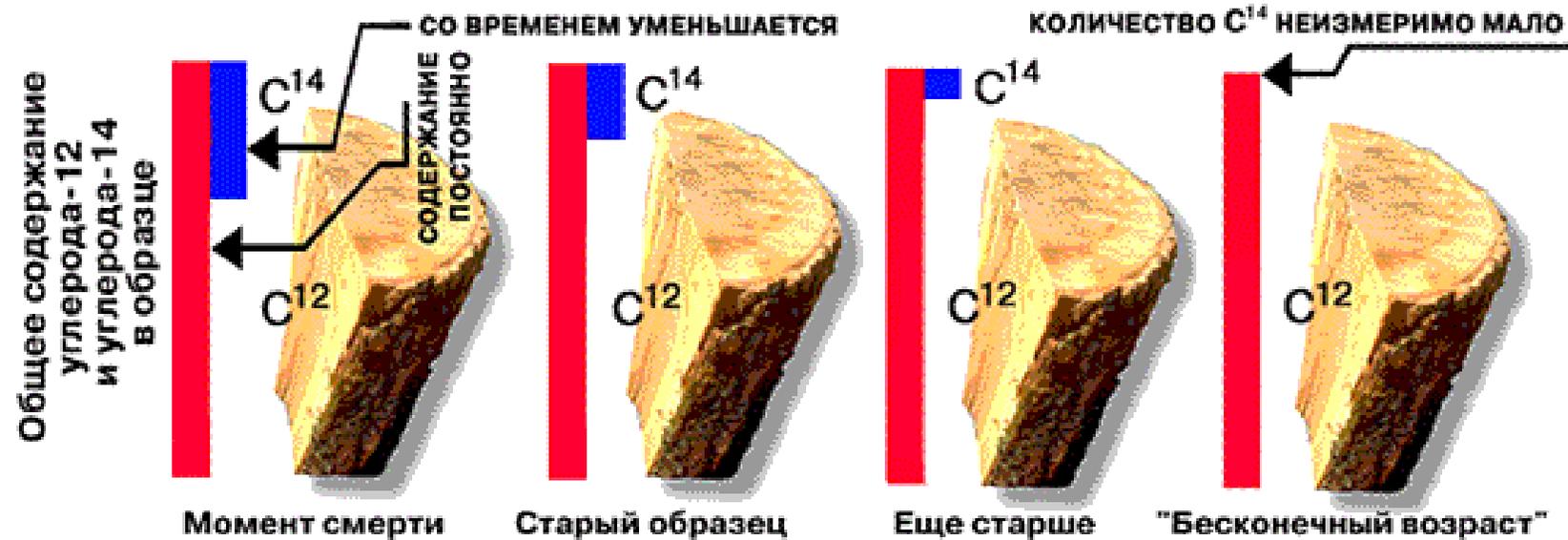
- | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 113 (Nh) | 114 (Fl) | 115 (Mc) | 116 (Lv) | 117 (Ts) | 118 (Og) |
| Открыт
в RIKEN
в 2003 г. | Открыт
в ОИЯИ
в 1999 г. | Открыт
в ОИЯИ
в 2003 г. | Открыт
в ОИЯИ
в 2000 г. | Открыт
в ОИЯИ
в 2009 г. | Открыт
в ОИЯИ
в 2001 г. |

Прикладные применения ядерной физики

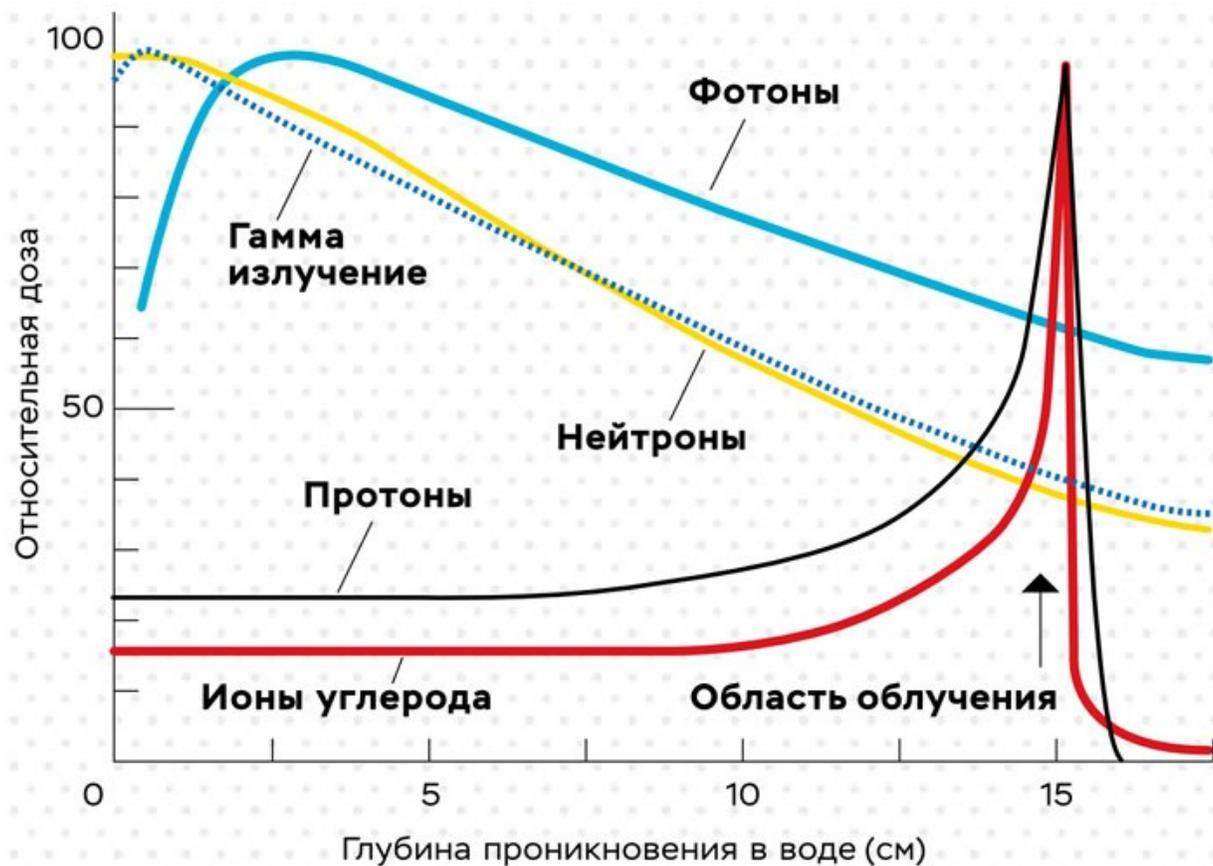
- Ядерные реакторы (на быстрых и медленных нейтронах)
- Термоядерные реакторы
- Датировка событий
- Активационный анализ
- Радиоактивные изотопы в медицине
- Ядерные мембраны
- радиационные методы лечения онкологических заболеваний
- Магнитно-резонансная томография (МРТ)

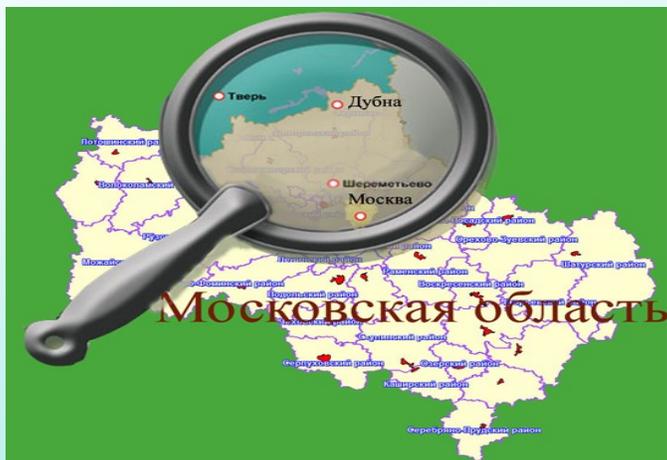
.....

Датировка событий



Применение пучков тяжелых ионов для лечения опухолей





DUBNA

JINR

BLTP

Welcome!



Спасибо за внимание!

*Хотите узнать больше,
ищите нас в соцсетях:*



[Jinr.ru](http://jinr.ru)



<http://uc.jinr.ru/>



<https://t.me/jinrofficial>



https://t.me/jinr_uc



<https://www.youtube.com/user/jinrtv>



JINRUC

Анонсы лекций ОИЯИ
в МГУ

