Физика на ядрото и елементарните частици

- проф. дфзн Георги Райновски
- кабинет B25
- e-mail: rig@phys.uni-sofia.bg, тел. 728

Introductory Nuclear Physics

Kenneth S. Krane, John Wiley&Sons, Inc. New York, 1988.

Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics

K. Heyde, IoP publishing, Bristol&Philadelphia, 2004

Nuclear structure from a simple perspective

R.F. Casten, Oxford University Press, 2000

Физика на атомните ситеми

Петър Райчев, издателство ЛОДОС, София 2006

Физика на ядрото и елементарните частици

У.С.С. Уилямс, Университетско издателство "Св. Кл. Охридски", София 2000

Увод в теоретичната ядрена физика

Б. Славов, Университетско издателство "Св. Кл. Охридски", София 2002,1992

Електронни ресурси

Теймс (Teams)

https://teams.microsoft.com/l/team/19%3AyMOHC87-m3i4OFACnu-_XJ5-zO47KsJm7aib5vxa6Ew1%40thread.tacv2/conversations?groupId=0673b203-1e27-4f67-83ef-4d59e9e13268&tenantId=9d05c5fb-e448-4700-8a58-e15b93c84ea9

Страница на курса

https://nucleus.phys.uni-sofia.bg/riglectures/

Физика на ядрото и елементарните частици

Изпит:

Крайна оценка = 0.10*(Тест 1) + 0.10*(Тест 2) + 0.20*(Задачи) +
+ 0.20*(2 въпроса) + 0.40*(Практикум)

(+ 0.5 към оценката при изпълнени над 85% от електроните тестове)

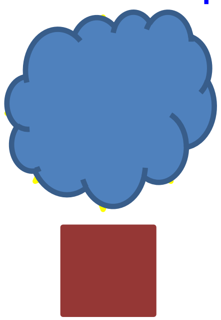
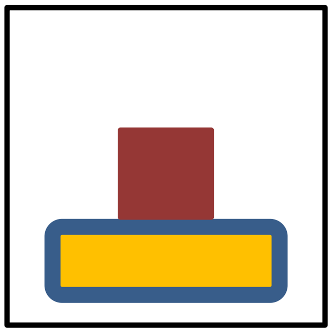
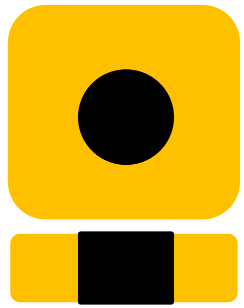
НО

При липса на оценка от практикума максималната крайна оценак **НЕ МОЖЕ** да бъде по-висока от **СРЕДЕН (3.0)**

По важни събития от историята на ядрената физика

• 1896 – Becquerel – открива радиоактивността;

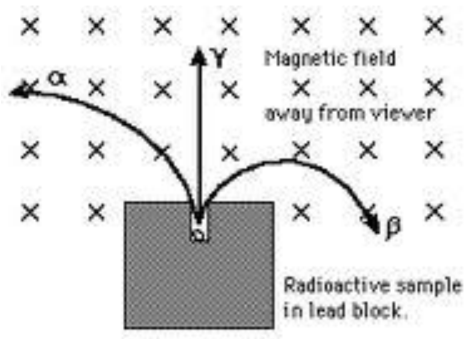
Има ли флуоресциращи материали, които излъчват X – лъчи? $K_2UO_2(SO_4)_2$

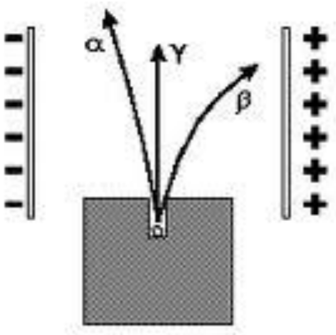




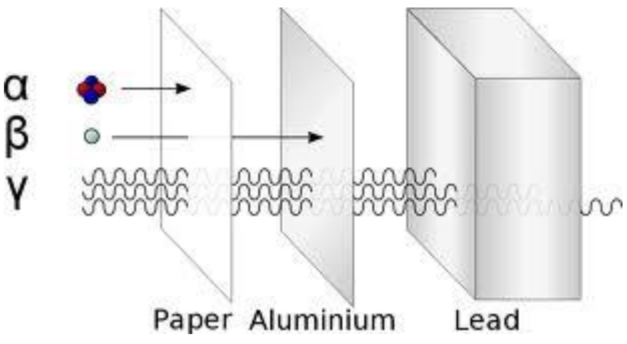

Систематични измервания!

Нов тип лъчение
спонтанна радиация

S.P. Thompson, Lord Kelvin







• 1898 – Marie and Pierre Curie – термина радиоактивност и изолират Ra и Po;

По важни събития от историята на ядрената физика

- 1911 – Rutherford – открива атомното ядро
- 1917 – Rutherford, Mardsen протона;

$$^{4}He + {}^{14}N \rightarrow {}^{1}H + {}^{17}O$$

- 1919 – Rutherford – открива ядрените превръщания при ядрени реакции;
- 1919 – Aston – разработва първия мас спектрометър;
- 1925 – Goudsmit, Uhlenbeck – собствен спин;
- 1928 – Gamov, Gurney, Condon – теория на α- разпада;
- 1930 – Pauli – неутринна хипотеза;
- 1931 – Van de Graaff – първи електростатичен ускорител;
- 1931 – Sloan, Lawrence – първи линеен ускорител;
- 1932 – Lawarence, Livingston – първи циклотрон;
- 1932 – Anderson – открива позитрона;

По важни събития от историята на ядрената физика

- 1932 – <u>Chadwick</u> – открива неутрона;

$$^{4}\mathbf{He} + {}^{9}\mathbf{Be} \rightarrow {}^{12}\mathbf{C} + \mathbf{n}$$

- 1932 – <u>Cockcroft, Walton</u> – ядрени реакции, чрез използване на ускорител;

$$^{1}\mathbf{H} + {}^{7}\mathbf{Li} \rightarrow {}^{4}\mathbf{He} + {}^{4}\mathbf{He} \qquad \mathbf{E(^{1}H) = 700\ keV,\ Ecb \approx 1\ MeV}$$

- 1934 – <u>I. Curie, F. Joliot</u> – откриват изкуствената радиоактивност;

$$\alpha + {}^{27}\mathbf{Al} \rightarrow {}^{30}\mathbf{P} + \mathbf{n}$$

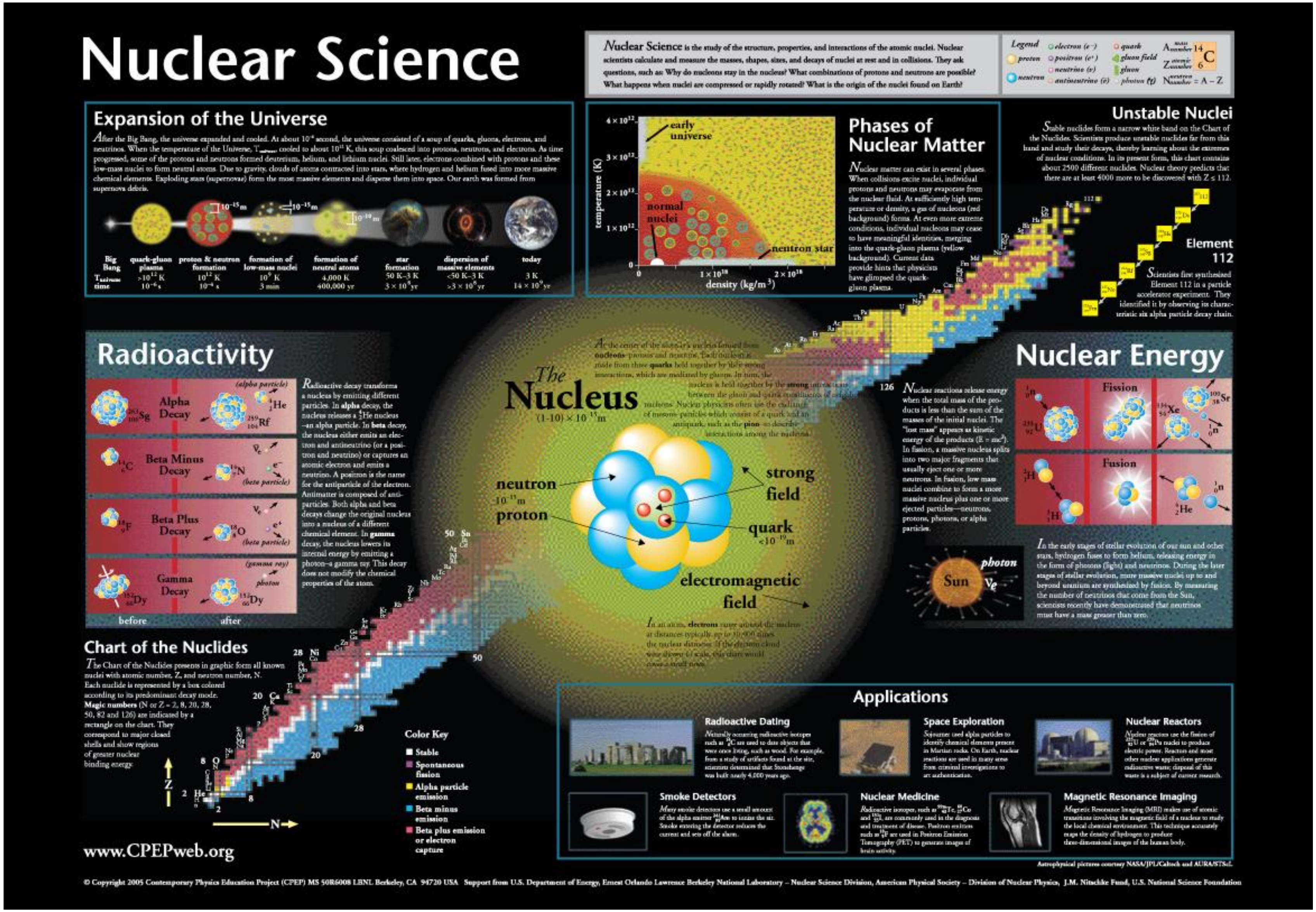
$$^{30}\mathbf{P} \rightarrow {}^{30}\mathbf{Si} + e^{+} + \nu$$

- 1934 – <u>E. Fermi</u> – теория на β-разпада;
- 1935 – <u>Yukawa</u> – мезонна хипотеза;
- 1935 – <u>Bothe</u> – предлага техниката на съвпадение;
- 1936 – <u>N. Bohr</u> – теория на съставното ядро;

По важни събития от историята на ядрената физика

- 1938 – Hahn, Strassmann/Meitner, Frisch – откриват ядреното делене;
- 1938 – Bethe – ядреното сливане е енергетичния източник на звездите;
- 1939 – Borh, Wheeler – първи модел описващ ядреното делене;
- 1940 – McMillan, Seaborg – получават първия изкуствено създаден елемент;
- 1942 – E. Fermi – първи ядрен реактор;
- 1945 – първа ядрена бомба;
- 1946 – Gamow – Big Bang космология;
- 1946 – Bloch, Purcell – ядрено-магнитен резонанс;
- 1947 – Libby – радиоактивно датиране;
- 1949 – Mayer, Jensen, Haxel, Suess – слоест модел на атомното ядро;
- 1952 – първа термоядрена бомба;
- 1953 – A. Borh, B. Mottelson – колективен модел на атомното ядро;
- 1955 – Nilsson – деформиран слоест модел;

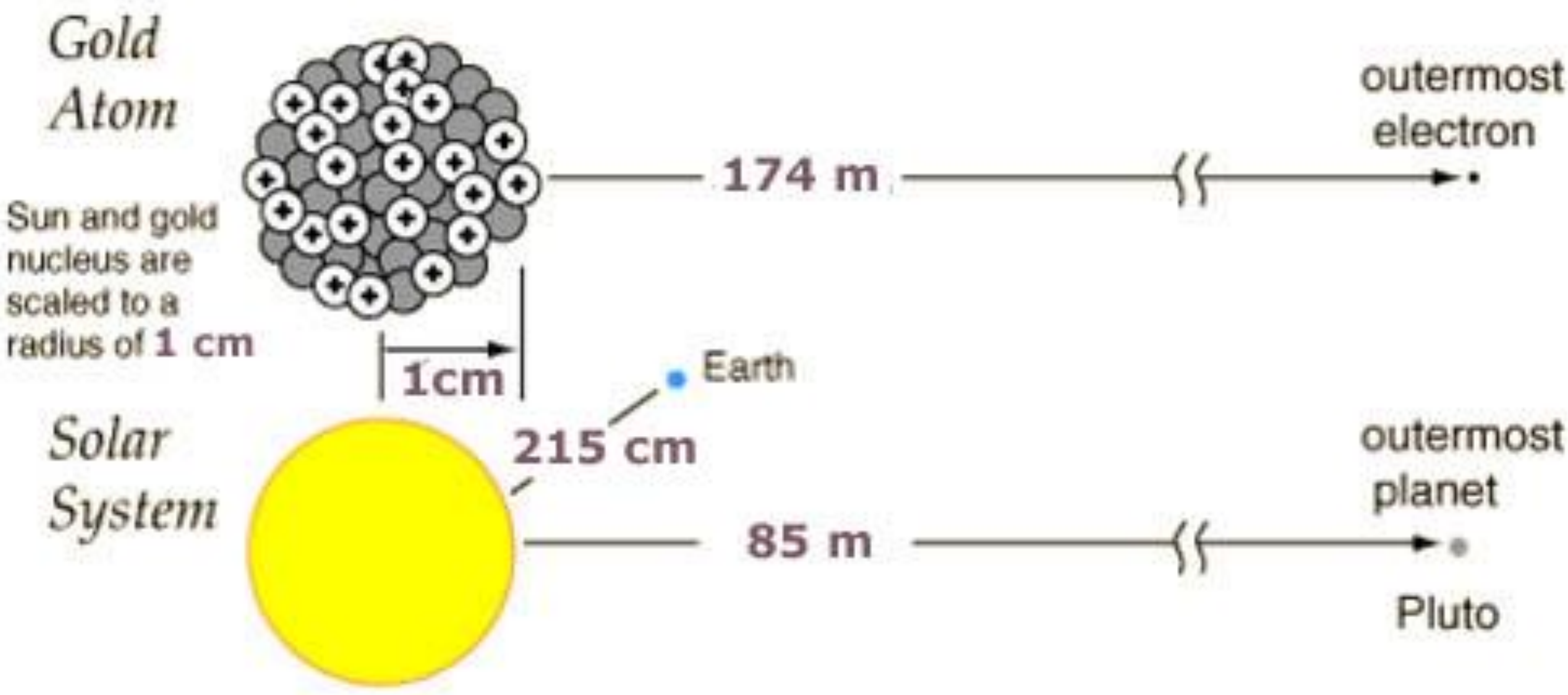
Ядрена физика



https://abc.lbl.gov/wallchart/index.html

Основни термини, величини и размерности в ядрената физика.

Скала на размерите в микросвета



Ако приемем че дължината на футболен стадион (~100 м) е равна на диаметъра на атома, то диаметъра на ядрото е колкото костилка от череша (~6 мм)

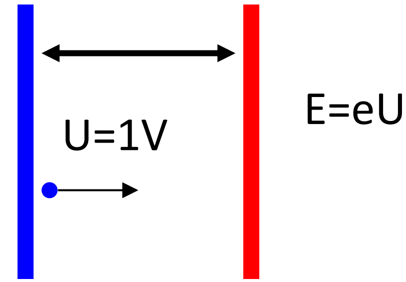
Единици за енергия

SI prefixes

1000^m	10^n	Prefix	Symbol	Since[1]	Short scale	Long scale	Decimal
1000^8	10^{24}	yotta-	Y	1991	Septillion	Quadrillion	1 000 000 000 000 000 000 000 000
1000^7	10^{21}	zetta-	Z	1991	Sextillion	Trilliard	1 000 000 000 000 000 000 000
1000^6	10^{18}	exa-	E	1975	Quintillion	Trillion	1 000 000 000 000 000 000
1000^5	10^{15}	peta-	P	1975	Quadrillion	Billiard	1 000 000 000 000 000
1000^4	10^{12}	tera-	T	1960	Trillion	Billion	1 000 000 000 000
1000^3	10^9	giga-	G	1960	Billion	Milliard	1 000 000 000
1000^2	10^6	mega-	M	1960	Million		1 000 000
1000^1	10^3	kilo-	k	1795	Thousand		1 000
$1000^{2/3}$	10^2	hecto-	h	1795	Hundred		100
$1000^{1/3}$	10^1	deca-	da	1795	Ten		10
1000^0	10^0	*(none)*	*(none)*	NA	One		1
$1000^{-1/3}$	10^{-1}	deci-	d	1795	Tenth		0.1
$1000^{-2/3}$	10^{-2}	centi-	c	1795	Hundredth		0.01
1000^{-1}	10^{-3}	milli-	m	1795	Thousandth		0.001
1000^{-2}	10^{-6}	micro-	μ	1960[2]	Millionth		0.000 001
1000^{-3}	10^{-9}	nano-	n	1960	Billionth	Milliardth	0.000 000 001
1000^{-4}	10^{-12}	pico-	p	1960	Trillionth	Billionth	0.000 000 000 001
1000^{-5}	10^{-15}	femto-	f	1964	Quadrillionth	Billiardth	0.000 000 000 000 001
1000^{-6}	10^{-18}	atto-	a	1964	Quintillionth	Trillionth	0.000 000 000 000 000 001
1000^{-7}	10^{-21}	zepto-	z	1991	Sextillionth	Trilliardth	0.000 000 000 000 000 000 001
1000^{-8}	10^{-24}	yocto-	y	1991	Septillionth	Quadrillionth	0.000 000 000 000 000 000 000 001

- Енергия; $1\ \mathrm{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\ \mathrm{J}$

Типичните γ и β разпадания са ~ 1MeV



100 W ел. Крушка, за 1 час ще отдели:

$$E = P\,.\,t = 100\ \mathrm{W}\ (60 \times 60)\ \mathrm{s} = 360000\ \mathrm{J}$$

$$= \left(3.6\times10^{5}\ \mathrm{J}\right) / \left(1.602\times10^{-19}\ \mathrm{J/eV}\right) = 2.25\times10^{24}\ \mathrm{eV}$$

$$= 2.25\ \mathrm{YeV}$$

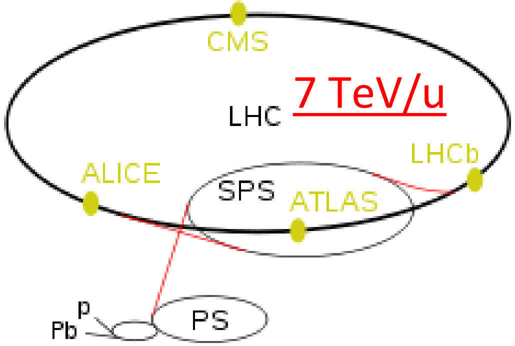
- Температурен еквивалент

$$\frac{1\mathrm{eV}}{k_B} = \frac{1.60217653(14)10^{-19}\ \mathrm{J}}{1.3806505(24)10^{-23}\ \mathrm{J/K}}$$

$$= 11604.505(20)\mathrm{K} \propto 10^{4}\mathrm{K}$$

Единици за енергия

Large Hadron Collider
протони до 7 TeV



$$N_A = 6.022\times10^{23}\ \mathrm{mol/g}$$

Мравка тежаща 1 g се движи със скорост 5 cm/s

$$E = \frac{m v^2}{2} = \frac{(10^{-3}\,\mathrm{kg})\,(5\times10^{-2}\,\mathrm{m/s})^2}{2} = 1.25\times10^{-6}\ \mathrm{J}$$

$$= \frac{1.25\times10^{-6}\ \mathrm{J}}{1.602\times10^{-19}\ \mathrm{J/eV}} = 0.78\times10^{13}\ \mathrm{eV} = 7.8\ \mathrm{TeV}$$

Колко нуклеона има в една мравка (от C)?

$$\#(C) = \frac{1\,g}{12}\,6.022\times10^{23}\ \mathrm{mol/g} = 5\times10^{22}$$

$$\#(p) + \#(n) = (6+6)\times\#(C) = 5\times10^{23}\ u$$

$$E\,/\,\text{нук} = 1.6\times10^{-9}\ \mathrm{eV/u}$$

- 210 MeV – средната енергия отделяна при деленето едно ядро ^{239}Pu
- 200 MeV – средната енергия отделяна при деленето едно ядро ^{235}U

Тротилов еквивалент: μt(gTNT), mt(kgTNT), t(tTNT), kt(ktTNT)
1 gram TNT = 4184 J

- 13.6 eV – йонизационната енергия на водорода
- 1/40 eV – топлината енергия при стайна температура

Единици за енергия

Температурен ефект на освободената при разпад енергия

$^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + \alpha$ $\quad E_\alpha \approx 4$ MeV $\quad$ 200g H_2O

Колко грама ^{238}U са необходими за да се загрее даденото количество вода до 100°C? Каква е плътността на отделяната топлинна енергия за единица време?

$$Q = \Delta T c(H_2O) m(H_2O)$$

$$c(H_2O) = 4.1855 \text{ J/gK}$$

$$\Delta T = (100 - 20)^\circ \text{ C}$$

$$Q = 6.7 \times 10^4 \text{ J}$$

$$E_\alpha = 4 \text{ MeV} = 4 \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J} = 6.4 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\frac{Q}{E_\alpha} = \frac{6.7 \times 10^4}{6.4 \times 10^{-13}} = 10^{17} \alpha\text{'s} \quad \rightarrow 10^{17} \; {}^{238}\text{U}$$

$$\frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}$$

$$m = \frac{10^{17}}{6.022 \times 10^{23}} 238 = 40 \times 10^{-6} \text{ g} = 40 \; \mu\text{g}$$

1kg H_2O → 200 μg ^{238}U $\quad$ 1t H_2O → 200 mg ^{238}U $\quad$ 5t H_2O → 1 g ^{238}U

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

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{ln2}{T_{1/2}}$$

$$T_{1/2}({}^{238}\text{U}) = 4.468 \times 10^9 \text{ y}$$

$$\lambda({}^{238}\text{U}) = 1.5 \times 10^{-8} \text{ y}^{-1}$$

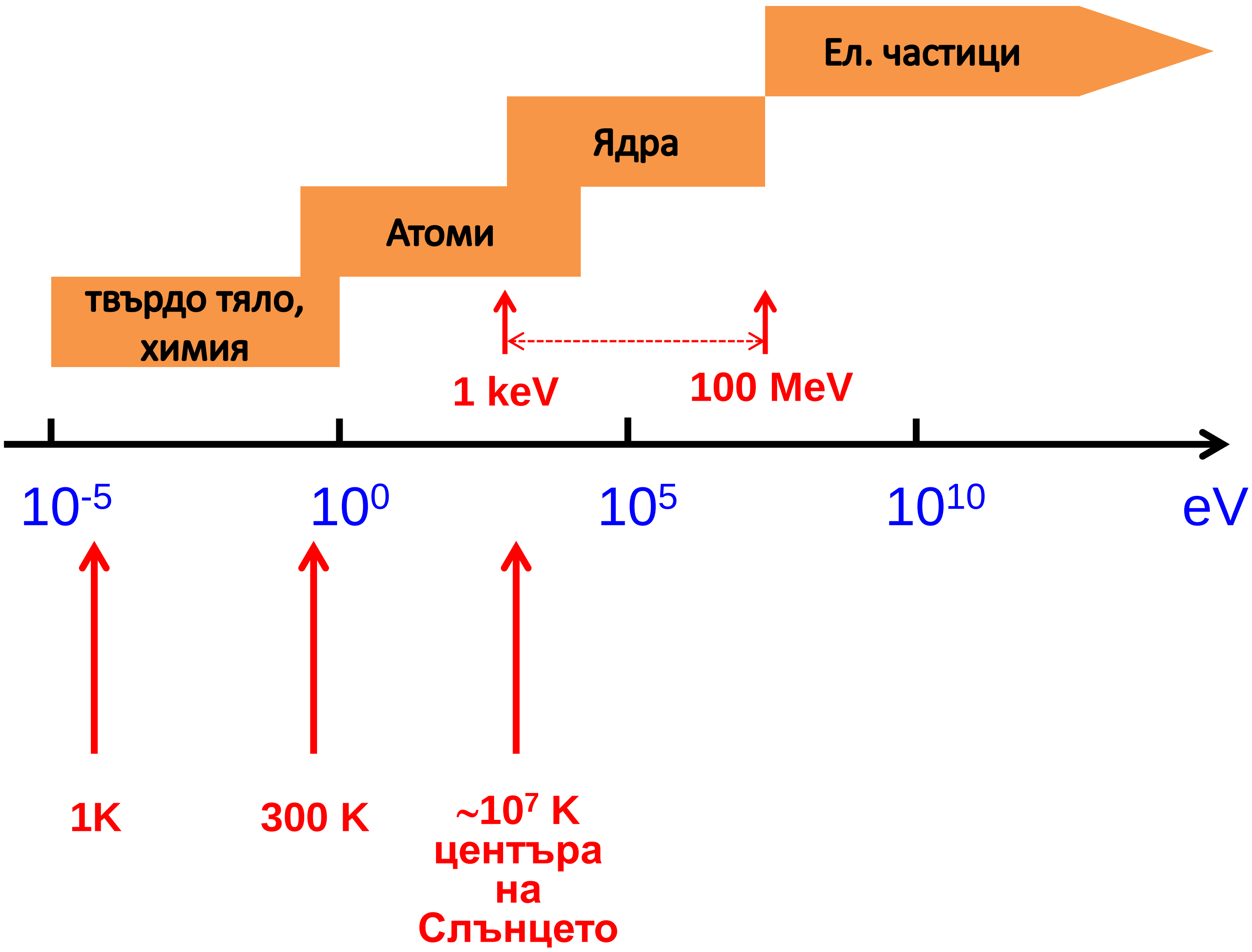
$$A = \lambda N = 1.5 \times 10^{-8} \text{ y}^{-1} 10^{17} = 1.5 \times 10^9 \text{r/y}$$

$$\rightarrow 6 \times 10^9 \text{MeV/y} \approx 1 \times 10^{-3} \text{J/y}$$

1 eV = 1.602 × 10^{-19} J

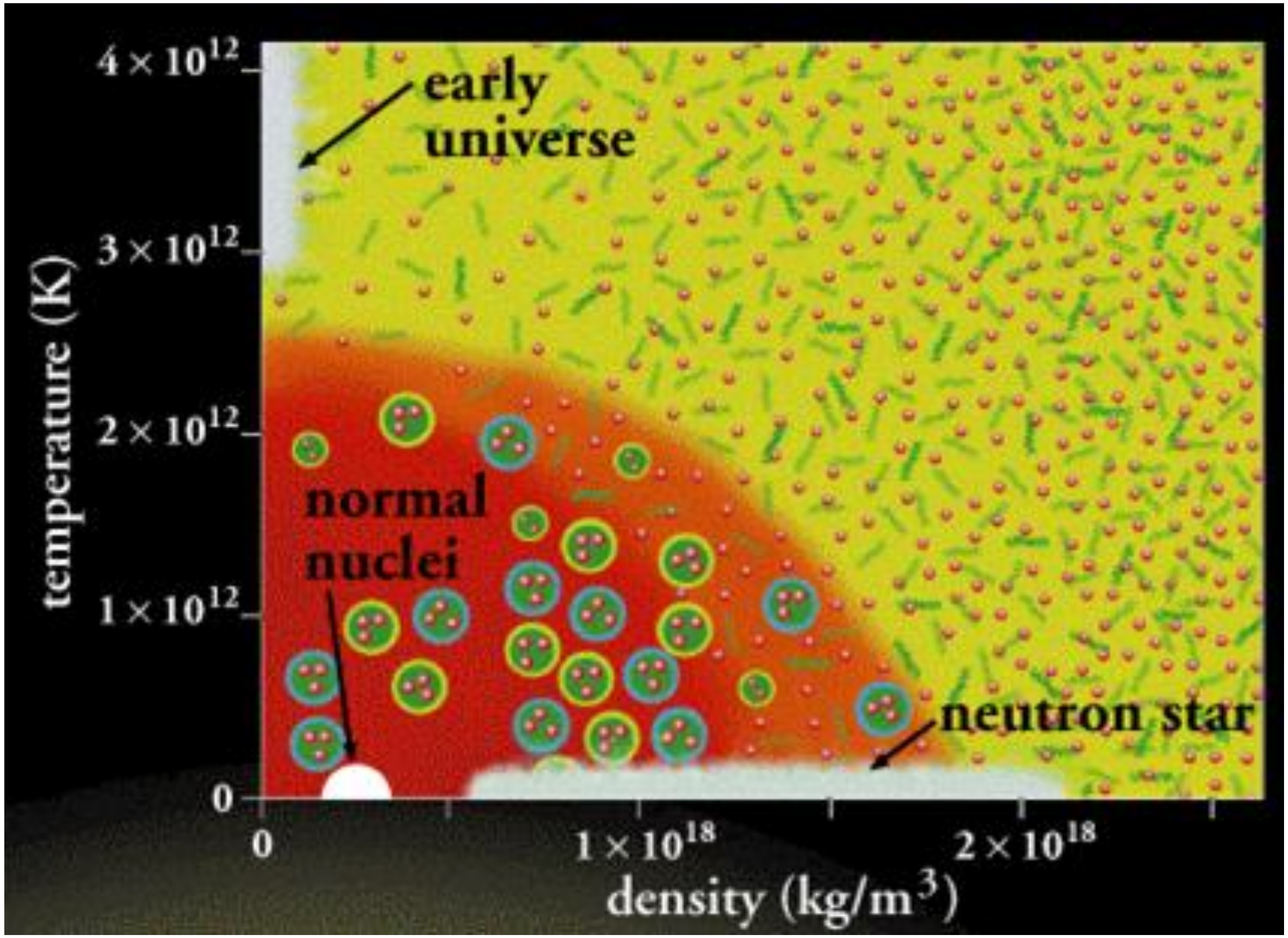
t = 6.7 10^7 y

Енергетична скала в ядрената физика



Плътност на ядрената материя

$$\rho = \frac{M_N}{\frac{4\pi}{3}R_N^3} = \frac{Am_n}{\frac{4\pi}{3}(1.2\text{fm}\,A^{1/3})^3} = \frac{m_n}{7.2\text{fm}^3} = \frac{1.66\times10^{-27}\,\text{kg}}{7.2\times10^{-45}\,\text{m}^3} = 2.3\times10^{17}\,\text{kg/m}^3$$



Основни означения

1932 - Chadwick – открива неутрона – електрически неутрална частица с маса

$m_n \approx m_p$ (m_p= 938.272 MeV, m_n= 939.566 MeV, Δm=1.293 MeV)

{протон, неутрон}≡нуклеон

ЯДРО ≡ Z, N, A=N+Z

$${}^{A}_{Z}X_{N} \qquad X \equiv Z \qquad {}^{A}X_{N} \qquad A=N+Z \qquad {}^{A}X$$

$${}^{238}_{92}U_{146} \qquad U \equiv 92 \qquad {}^{238}U_{146} \qquad 238=146+92 \qquad {}^{238}U$$

Z – константа – изотопи (${}^{112}Sn$, ${}^{114}Sn$, ${}^{115}Sn$, ${}^{116}Sn$, ${}^{118}Sn$, ${}^{120}Sn$)

N – константа – изотони (${}^{132}Te$, ${}^{134}Xe$, ${}^{136}Ba$, ${}^{138}Ce$)

Основни свойства на ядрата

- маса – измерва се в обобщени атомни маси (относителна единица):

$m(^{12}C) = 12u \Longrightarrow 1u = 931.502$ MeV ;

- радиус – типичните разстояния в ядрото $\propto 10^{-15}$ m = 1 fm (1 Fermi);

- относително разпространение на изотопите (за стабилните нуклиди);

- канали на разпад и времена на полуразпад (за радиоактивните нуклиди):

➢ α разпад - $\quad {}^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He_{2}$

$E_\alpha \approx 5$ MeV, $T_{1/2} \approx$ min ÷ μs, но

$T_{1/2}(^{238}U)=4.46\text{x}10^{9}$ y, $T_{1/2}(^{232}Th)=1.4\text{x}10^{10}$ y

➢ β разпад - $\quad {}^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + e^{-} + \tilde{\nu}_e$ $\quad \beta$ - минус $\quad {}^{140}_{54}Xe_{86} \longrightarrow {}^{140}_{55}Cs_{85} + e^{-} + \tilde{\nu}_e$

${}^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + e^{+} + \nu_e$ $\quad \beta$ - плюс $\quad {}^{44}_{22}Ti_{22} \longrightarrow {}^{44}_{21}Sc_{23} + e^{+} + \nu_e$

${}^{A}_{Z}X_{N} + e^{-} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \nu_e$ $\quad$ EЗ $\quad {}^{94}_{44}Ru_{50} + e^{-} \longrightarrow {}^{94}_{43}Tc_{51} + \nu_e$

$E_\beta \leq 1$ MeV, $T_{1/2} \approx$ ms ÷ days,

Основни свойства на ядрата

- γ разпад - електромагнитно лъчение

$E_\gamma \approx 0.05 \div 20$ MeV, $T_{1/2} \approx$ ns $\div$ fs, но

съществуват и така наречените ядрени изомери:

$T_{1/2}(^{99}Tc) = 6.02$ h, $T_{1/2}(^{95}Tc) = 61$ days

$T_{1/2}(^{180}Ta) = 1.2 \times 10^{15}$ y, $T_{1/2}(^{178}Hf) = 31$ y

α разпад	β разпад	γ разпад
силно ядрено взаимодействие	**слабо ядрено взаимодействие**	**електромагнитно взаимодействие**

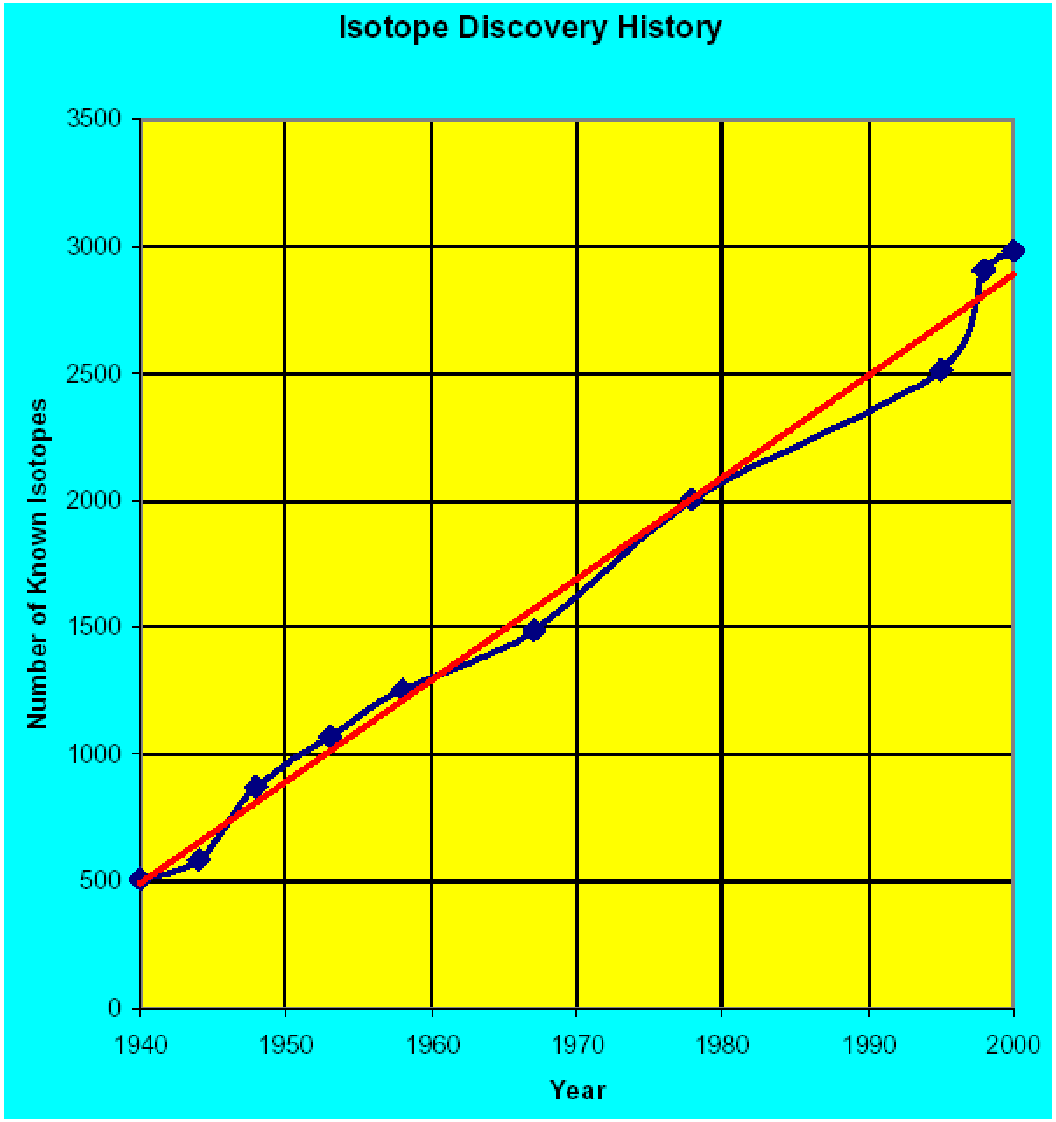
- спонтанно делене - $^{A}X \longrightarrow {}^{A1}Y + {}^{A2}Z + Nn$, $A > 230$
- редки разпади - с излъчване на един, два протона ($^{113}Cs \longrightarrow {}^{112}Xe + p$), неутрон ($^{13}Be \longrightarrow {}^{12}Be + n$), ядрени клъстери ^{8}Be, ^{12}C, ^{16}O ($^{114}Ba \longrightarrow {}^{102}Sn + {}^{12}C$);

- възможни реакции и сечения за тях
- възбудени състояния – енергия на възбуждане, спин, вероятности за електромагнитни преходи между тях, мултиполни моменти;

Фундаментални взаимодействия

Взаимодействие	Проявление	Сила	Обсег	Преносител
Силно ядрено	Свързва протоните и неутроните в ядро	1	10^{-15} m	глуони m=0 spin=1
Електромагнитно	Обуславя взаимодействието м/у заредени частици	1/137	∞	Фотон m = 0 spin = 1
Слабо ядрено	β-разпад	10^{-6}	10^{-18} m (0.1%D(p))	Векторни бозони W^+, W^-, Z^0 m > 80 GeV spin = 1
Гравитация	Обуславя взаимодействието м/у масови обекти	6×10^{-34}	∞	гравитон(??) $m_g<1.2\times10^{-22}$ eV spin = 2

Карта на нуклидите



- До днес са идентифицирани около 3000 нуклида;
- От тях само 284 са стабилни;
- Известни са 118 химични елемента:

  116 – Livermorium

  117 – Tennessine

  118 – Oganesson