

КОСМИЧКИ ЗРАЦИ



- ?Шта производи јонизацију у детекторима када они нису изложени радиоактивном зрачењу?
- 1900 Wilson открио континуирану јонизацију у ваздуху
- Одакле потиче?
- 1912. Victor Hess – мерење јонизације електроскопом на различитим висинама (до 5300 m)

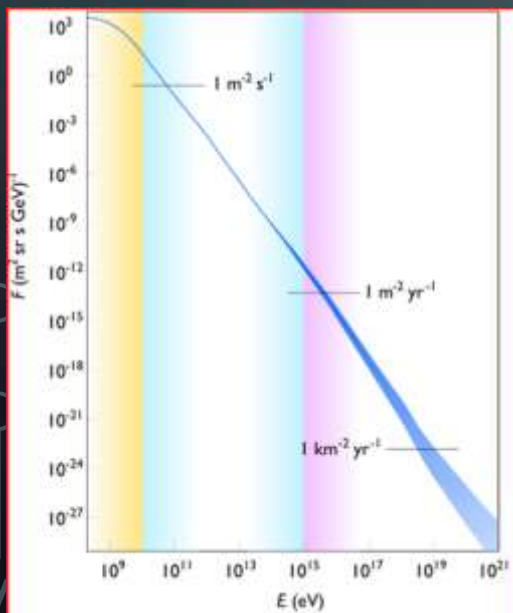


- Закључак! Зрачење потиче из космоса и не зависи од сунчевог зрачења.
- R. Millikan – „Космичко зрачење“

- Фотони? Наелектрисане честице?
- Bothe & Kolhorster 1929. питање космичког зрачења у магленој комори (и уз присуство магнетног поља) су закривљене.
- Nedermeyer & Carl Anderson откриће *МИОНА*
- Occhialini & Blackett 1932. – производња парова
- P. Auger – слапови честица

КОЈЕ ЧЕСТИЦЕ ЧИНЕ КОСМИЧКО ЗРАЧЕЊЕ?

- Протони (70%)
- α -честице (20%)
- јони Li, Be, B (0,7%)
- јони C, N, O (1,7%)
- јони $Z > 10$ (0,6%)



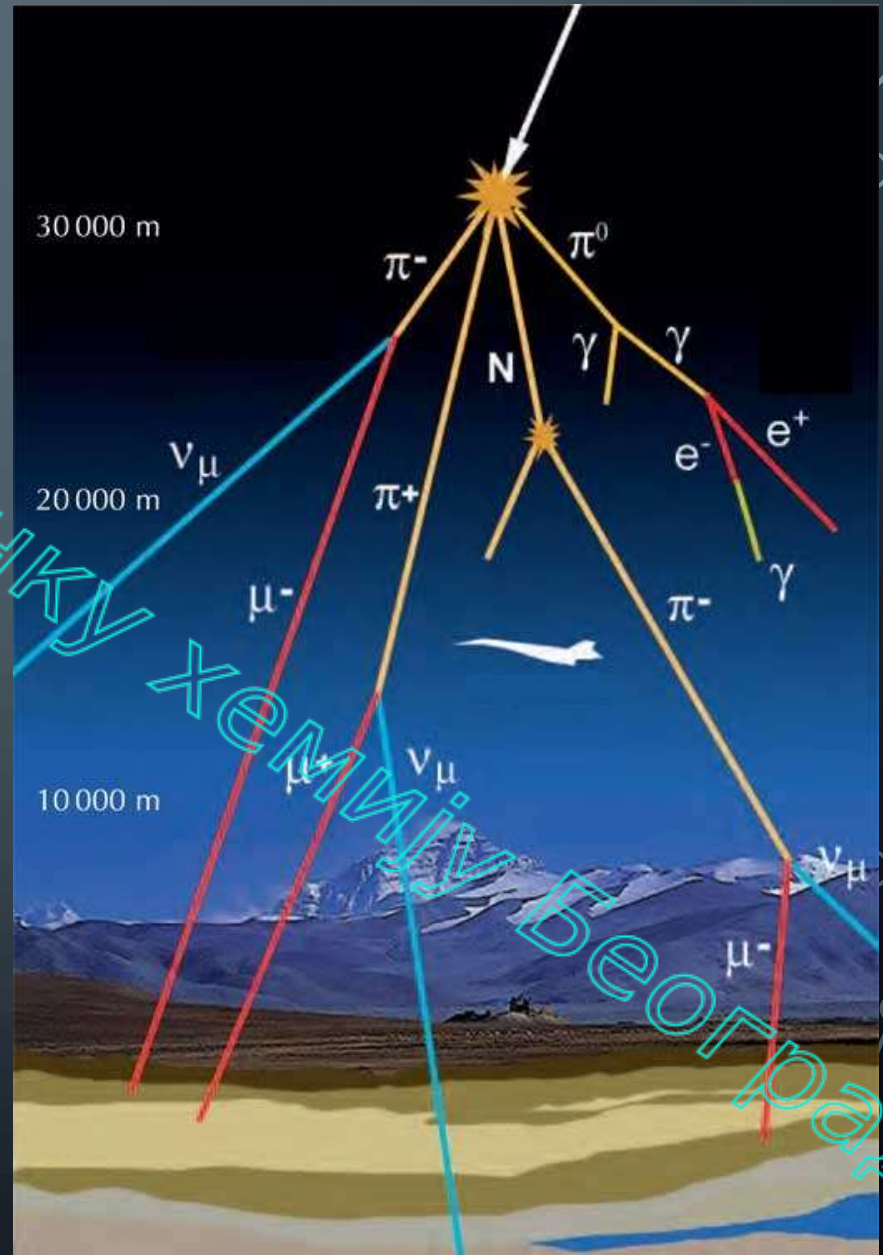
Енергије

- $< 1 \text{ GeV}$ – углавном протони пореклом са Сунца
- $1 \text{ GeV} < E < 3 \cdot 10^{11} \text{ GeV}$
 - Ниже енергије – порекло из Млечног пута
 - Веће енергије – порекло ван Млечног пута
- $F \propto E^{-1,6}$
- Најмањи део енергије потиче из оригиналног извора
- Највећи од убрзања у магнетним пољима планета и звезда

КОНВЕРЗИЈА ПРИМАРНОГ КОСМИЧКОГ ЗРАЧЕЊА

- Примарно космичко зрачење у атмосфери (на око 25 km) интерагује са молекулама N_2 и O_2 при чему настаје велики број честица
- 10 GeV α -честица произведе око 50–100 нових високо-јонизујућих честица (слап или „туш“ честица)
- Главни производ тих реакција су **ПИОНИ**
- Пиони припадају мезонима и честице су јаке интеракције и медијатори су интеракције између нуклеона

$$m_{\pi} = 0,147 \text{ MeV}$$



- Интеракције међу нуклеонима

$$p \leftrightarrow n + \pi^+ \quad n \leftrightarrow p + \pi^- \quad p \xleftrightarrow{\pi^0} p \quad n \xleftrightarrow{\pi^0} n$$

- Могу се производити и у вештачким условима ако је енергија бомбардујућих честица $> 400 \text{ MeV}$

- Пиони су нестабилне честице $t_{1/2} \approx 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

$$99,99 \% \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu \quad \pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$$

- 0,01% $\pi^- \rightarrow e^- + \nu_e$

- Мион је такође мезон који за разлику од пиона честице слабе интеракције. Време полураспада му је $1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

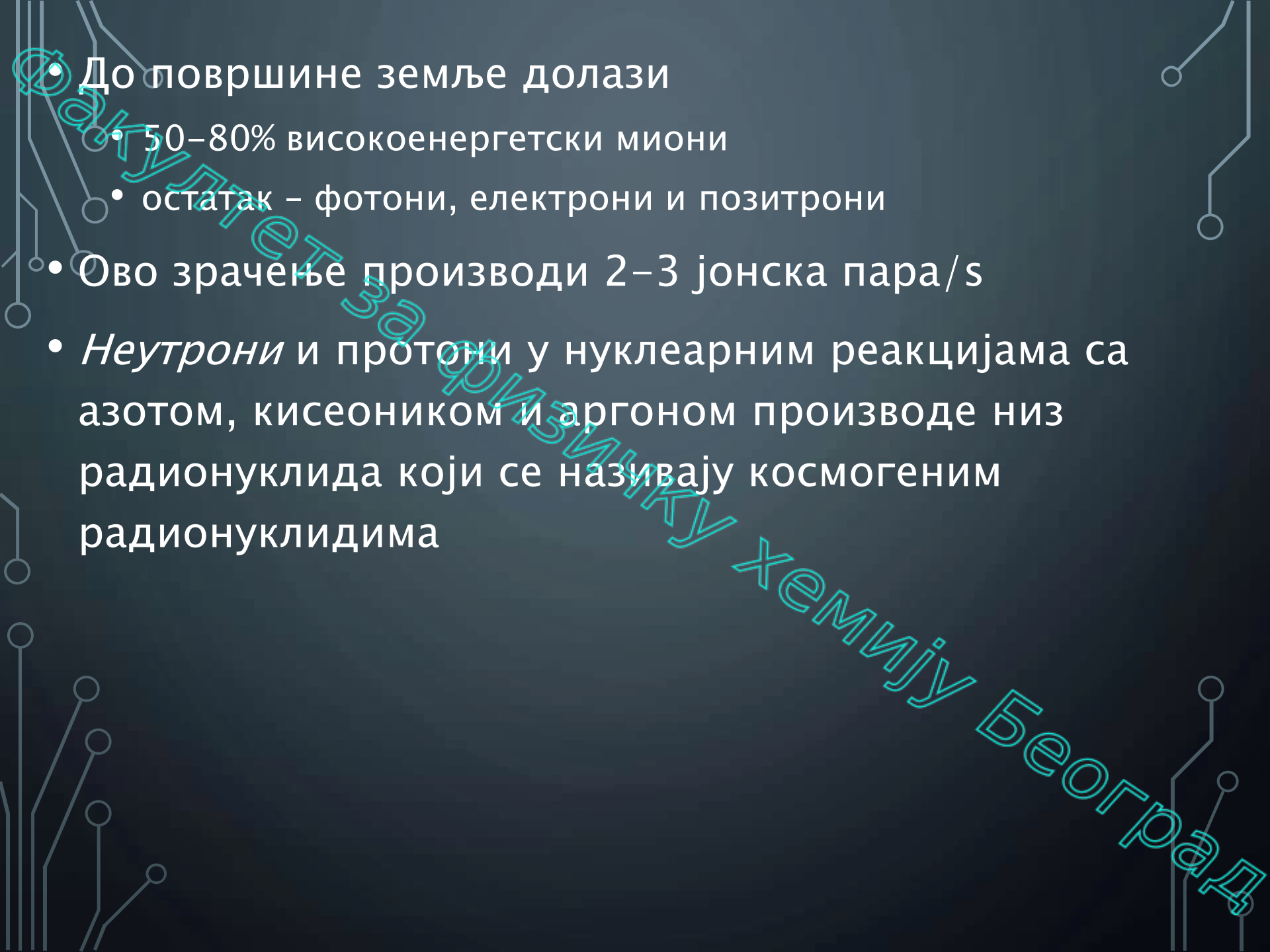
- До површине земље долази

- 50–80% високоенергетски миони

- остатак – фотони, електрони и позитрони

- Ово зрачење производи 2–3 јонска пара/s

- *Неутрони* и протони у нуклеарним реакцијама са азотом, кисеоником и аргоном производе низ радионуклида који се називају космогеним радионуклидима



РАДИОНУКЛИДИ У ПРИРОДИ

- Подела

- Космогени радионуклиди
- Примордиални радионуклиди
- Антропогени радионуклиди

Космогени радионуклиди

Нуклид	$t_{1/2}$ (године)	Врста распада/ E (MeV)	Брзина производње ($m^{-2} s^{-1}$)
3H	12,32	β^- 0,0186	2500
^{10}Be	$1,52 \cdot 10^6$	β^- 0,555	300
^{14}C	5715	β^- 0,156	17000–25000
^{22}Na	2,605	β^+ 0,545	0,5
^{26}Al	$7,1 \cdot 10^5$	β^+ 1,16	1,2
^{32}Si	160	β^- 0,213	1,6
^{35}S	0,239	β^- 0,167	14
^{36}Cl	$3,01 \cdot 10^5$	β^- 0,709	60
^{39}Ar	268	β^- 0,565	56
^{53}Mn	$3,7 \cdot 10^6$	EC (0,596)	
^{81}Kr	$2,2 \cdot 10^5$	EC (0,28)	

Нуклид	$t_{1/2}$ (године)	Врста распада/ E (MeV)
7Be	53,28 d	EC
^{24}Na	14,96 h	1,389
^{28}Mg	21,0 h	0,459
^{32}P	14,28 d	1,170
^{33}P	25,3 d	0,249
^{39}Cl	55,6 min	1,91

ТРИТИЈУМ

- Мали део тритијума потиче са Сунца
- Већина се производи у реакцији са брзим неутронима



- Принос ове реакције је 2500 атома ${}^3H/sm^2$
- Укупна количина на Земљи је $1,3 \cdot 10^{18}$ Bq (2,4 kg)
- $t_{1/2} = 12,32$ y
- Средње време задржавања у атмосфери је око 2 године колико му треба да доспе до доњих слојева атмосфере.
- У року 5–20 дана компреципитацијом долази до земљине површине

- У површинским водама
 - Пре 1945. 2–8 TU (TU је тритијумска једница и износи 1 атом ^3H / 10^{18} атома ^1H)
 - После 1962. 20–40 TU
- У кишници 4–25 TU
- Локална повећања настају у околини нуклеарних централа и постројења за прераду уранијумске руде и прераду исслуженог нуклеарног горива
- 1950–1962 тестирања хидрогенских бомби ослободила су око $2,6 \cdot 10^{20}$ Bq

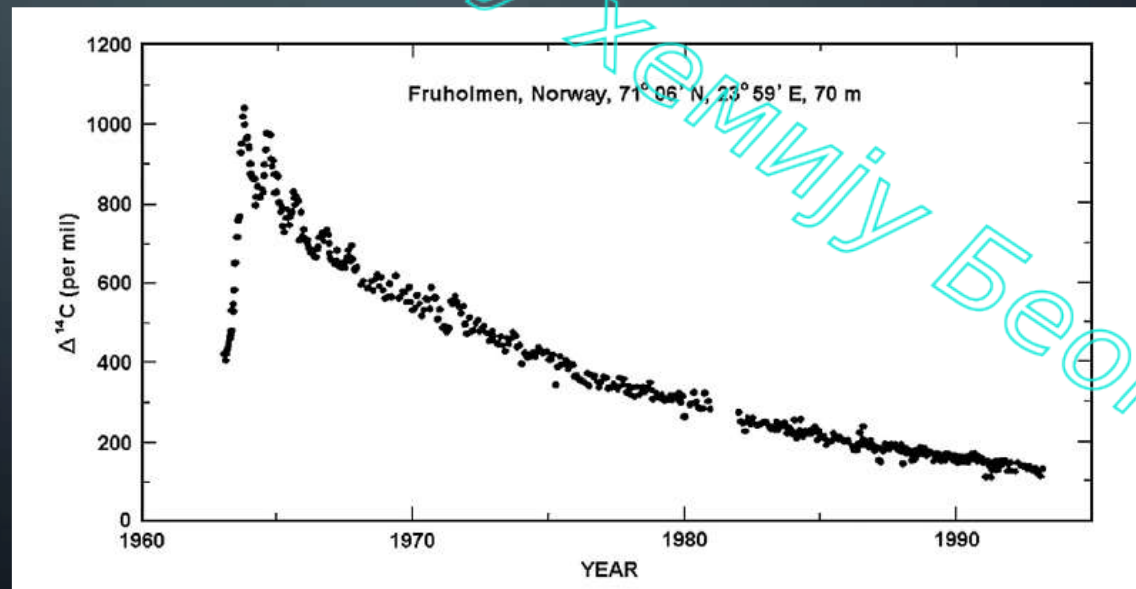
^{14}C

- $t_{1/2} = 5715 \text{ y}$, $E_{\max}(\beta^-) = 158 \text{ MeV}$
- Може настати у више нуклеарних реакција у атмосфери. Највећи део настаје у реакцији спорих неутрона са азотом



- Принос ове реакције је $22000 \text{ атома } ^{14}\text{C}/\text{sm}^2$
- Процењена активност на Земљи је око 8500 PBq (75 тона)
- 2 % у атмосфери, 98 % у различитим материјалима на Земљи укључујући живу материју
- У току 1–2 године долази до равнотеже са атмосферским CO_2

- Специфична активност у живим бићима је око 227 Bq/kg
- Тестирање нуклеарног оружја допринос ~ 220 PBq
- Нуклеарне централе ~ 18 TBq/GW_e у
- Сагоревање фосилних горива доводи до „разблажења“
- Данашња специфична активност ^{14}C је 13,56 rasp min⁻¹ g⁻¹ C

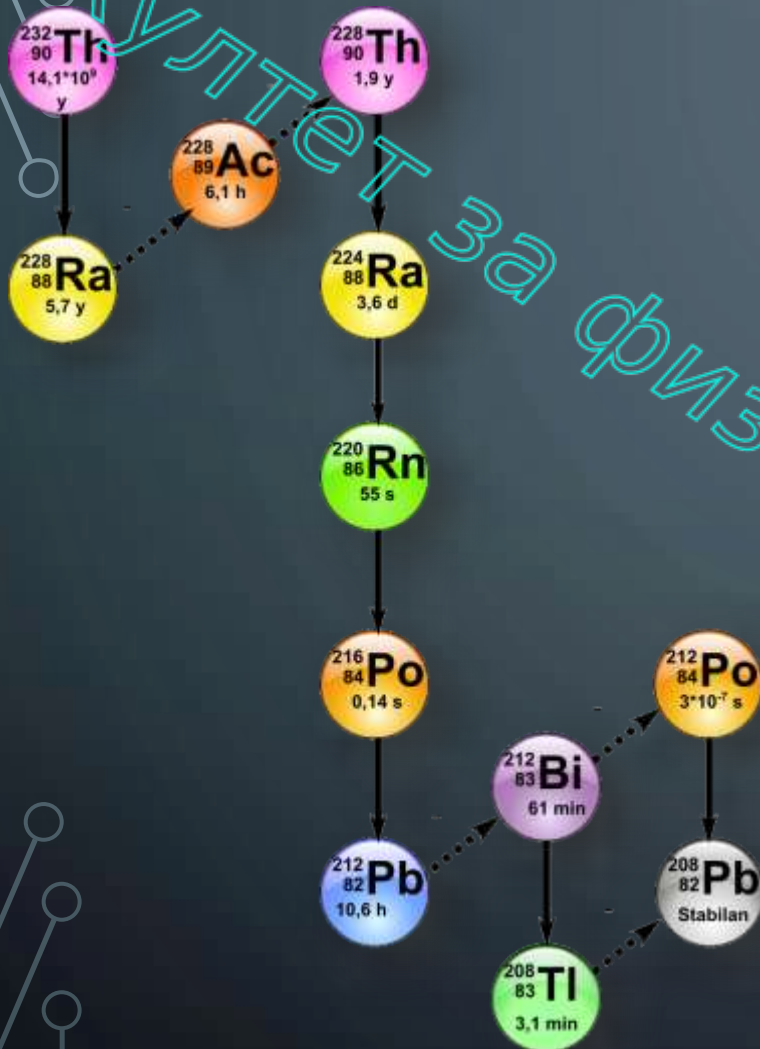


ПРИМОРДИЈАЛНИ РАДИОНУКЛИДИ

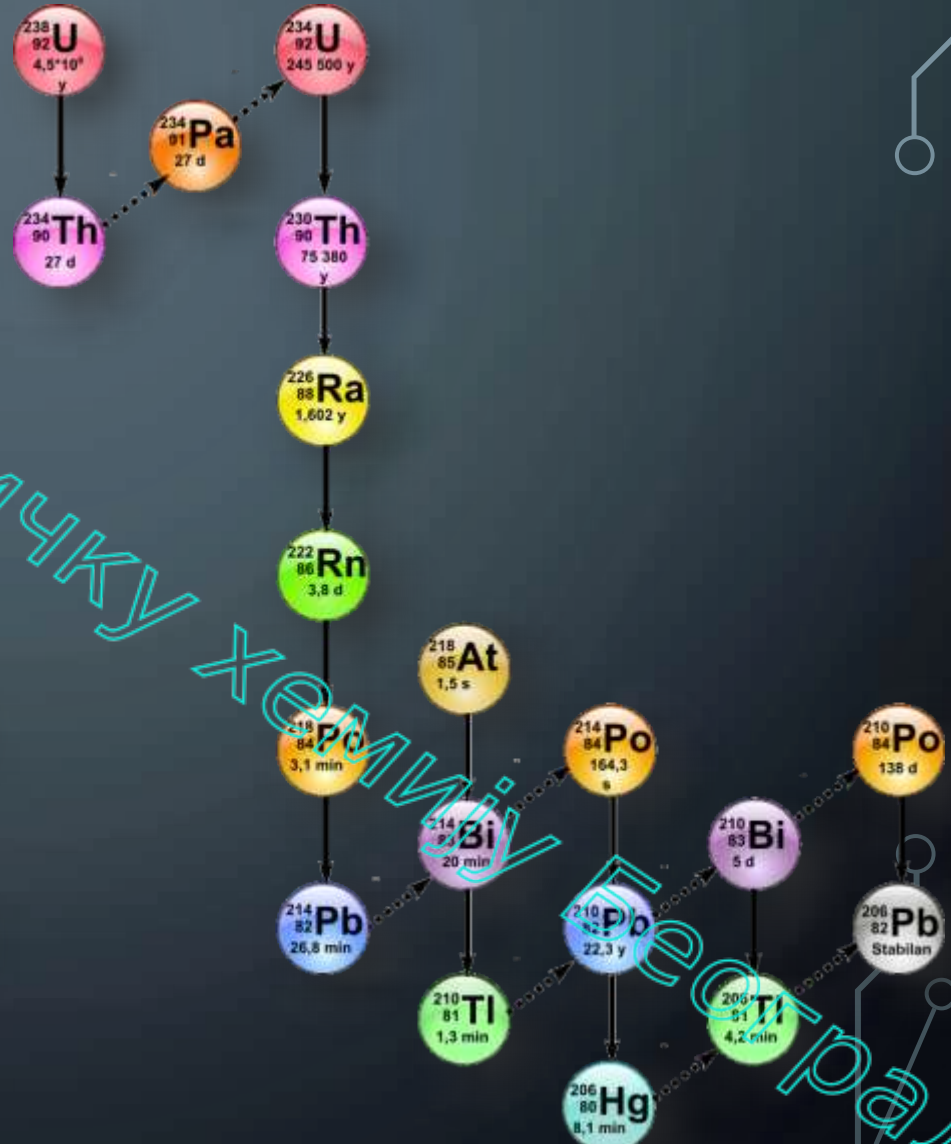
- $Z < 82$ (Pb)

Nuklid	w %	mod/E raspada	t _{1/2} (godine)
⁴⁰ K	0.0117	β^- EC 1.31	1.26×10^9
⁵⁰ V	0.250	β^- EC (0.601)	$>1.4 \times 10^{17}$
⁸⁷ Rb	27.83	β^- 0.273	4.88×10^{10}
¹¹⁵ In	95.72	β^- 1.0	4.4×10^{14}
¹²³ Te	0.905	β^- EC (0.052)	1.3×10^{13}
¹³⁸ La	0.092	β^- EC	1.06×10^{11}
¹⁴⁴ Nd	23.80	α	2.1×10^{15}
¹⁴⁷ Sm	15.0	β^- 2.23	1.06×10^{11}
¹⁴⁸ Sm	11.3	β^- 1.96	7×10^{15}
¹⁷⁶ Lu	2.59	β^- (1.188)	3.8×10^{10}
¹⁷⁴ Hf	0.162	α	2×10^{15}
¹⁸⁷ Re	62.60	β^- 0.0025	4.2×10^{10}
¹⁹⁰ Pt	0.012	α	6.5×10^{11}

РАДИОАКТИВНЕ СЕРИЈЕ



Торијумова 4n серија



^{238}U 4n+2 серија

Актинијумова ^{235}U $4n+3$ серија



^{237}Np $4n+1$ серија

РАДИЈУМ И РАДОН У ПРИРОДИ

- У минералима уранијума сви чланови радиоактивног низа су у секуларној равнотежи са родоначелником ^{238}U .
- Изотопи радона који потичу из радиоактивних низова „беже“ из минерала и доспевају у ваздух и површинске/подеземне воде.
- Уобичајене вредности за $A(^{222}\text{Rn})$
 - у површинским водама $5\text{--}300 \text{ kBq m}^{-3}$
 - „чесменска вода“ 1 kBq m^{-3}
 - Ваздух при земљи $1\text{--}10 \text{ Bq m}^{-3}$
- Бање са геотермалном водом
 - Baden-Baden 1 MBq m^{-3} у ваздуху
 - Joachimsthal $10\text{--}15 \text{ MBq m}^{-3}$ у води

• Скандинавске земље – посебно Шведска

- у ваздуху изнад депозита уранијумом богатих шкриљаца око 1 MBq m^{-3}
- 50 % кућа $A(^{222}\text{Rn}) = 70 - 200 \text{ Bq m}^{-3}$
- 40000 кућа су „радонске куће“
- Нуспроизвод у процесу производње фосфатних ђубрива из апатита – гипс садржи сав радијум из апатита (max у Немачкој 500 Bq/kg)
- Већина грађевинског материјала садржи уранијум тако да се у стамбеним просторијама радон континуално емитује.

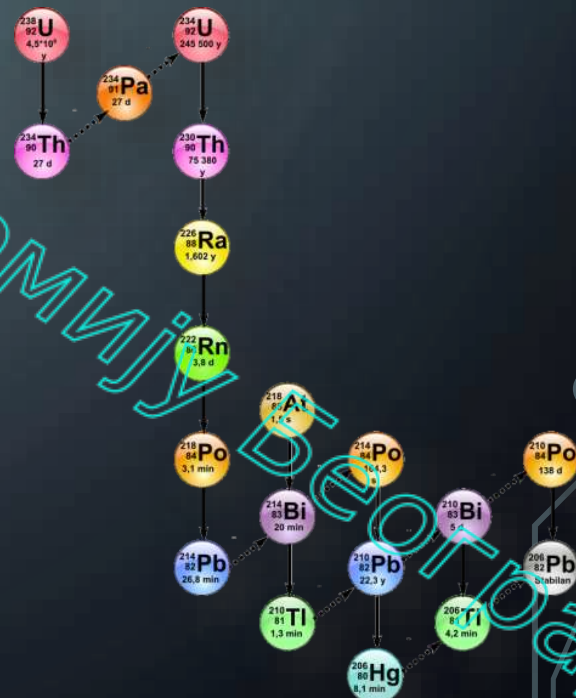
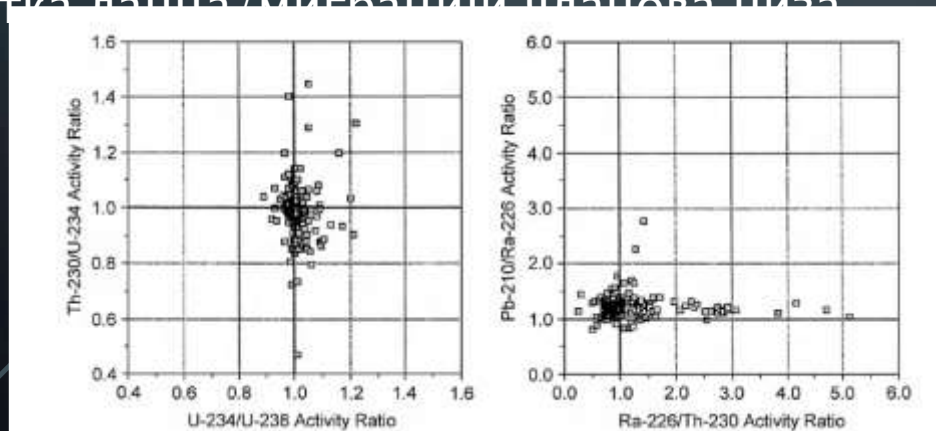
НАРУШАВАЊЕ РАВНОТЕЖЕ

- Секуларна равнотежа у минералима уранијума може бити нарушена услед присуства/тока подземних вода.
- Уранијум је у природи у облику комплекса лако растворних комплекса UO_2^{2+} – торијум о облику теже растворног Th^{4+} који се сорбује или преципитира.

Услед тога је нарушен однос активности у низу

$$A(^{238}\text{U}) / A(^{234}\text{U}) \neq 1$$

Из одступања овог односа од 1 може се закључивати о времену издвајања ^{238}U од остатка ланца /миграцији пласона шиза



ДАТИРАЊЕ НА ОСНОВУ РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

- 1907 Boltwood на основу распада у серији ^{238}U и ^{232}Th израчунао старост уранијумових и торијумових минерала
- ^{14}C – датирање материјала биолошког порекла – археолошка старост
- ^3H – кружење воде у геосфери
- $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ – старост магматских стена
- $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ – старост метаморфних и седиментних стена
- $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ – старост силикатних фосфатних и карбонатних минерала
- $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$ старост метеорита

ДАТИРАЊЕ ПОМОЋУ ^{14}C – АРХЕОЛОШКО ДАТИРАЊЕ

- 1949. W. Libby – датирање на основу ^{14}C
- Претпоставке
 - Космогени ^{14}C се производи константном брзином
 - Количина атропогеног ^{14}C је много мања од количине космогеног
 - После смрти живог организма не долази до размене ^{14}C са околином
- Специфична активност ^{14}C у свом живом свету је 14 распада $\text{min}^{-1}\text{g}^{-1}$

$$A_{sp}(^{14}\text{C}) = A_{sp}^0(^{14}\text{C})e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{t_{1/2}}}$$

$$t(\text{god}) = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} (\ln A_{sp}^0(^{14}\text{C}) - \ln A_{sp}(^{14}\text{C}))$$

- Поступак при мерењу

- Угљеник се преводи у CO_2 који се користи као пуњење за ГМ цев
- Преводи се у метан и мери у пропорционалним бројачима
- Временски опсег у ком се метода може користити је 300 до 50000 година (грешка 10–100 година)

- Корекције:

- На фаворизовано усвајање лаког ^{12}C угљеника од стране биљака

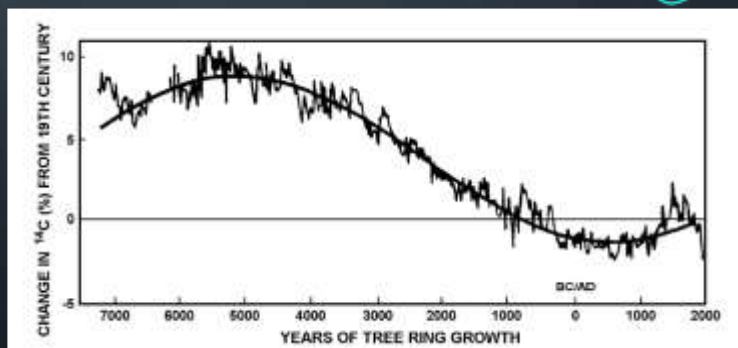
$$N(^{14}\text{C})_{\text{cor}} = N(^{14}\text{C})\{1 - 2(\delta(^{13}\text{C}) + 25)/1000\}$$

$\delta(^{13}\text{C})$ за живу материју је –35 до –20

- На одступања од константности брзине производње

- *Sequoia gigantean*

Садржај ^{14}C



• Неке од успешних примена

- Трајање леденог покривача у Северној Америци – датирање узорака дрвета је показало да се лед повукао пре око 11000, а не пре 35000

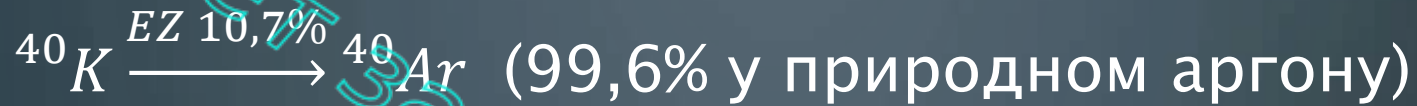
година

- Старост мумија
- Старост свитака са Мртвог мора
- Стећци из Карнака, Енглеска

Филозофски факултет за физику хемију Београд

$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ метод

$$t_{1/2} (^{40}\text{K}) = 1,28 \cdot 10^9 \text{ година}$$



$$\lambda_{\text{EZ}} = 5,78 \cdot 10^{-11} \text{ y}^{-1}$$

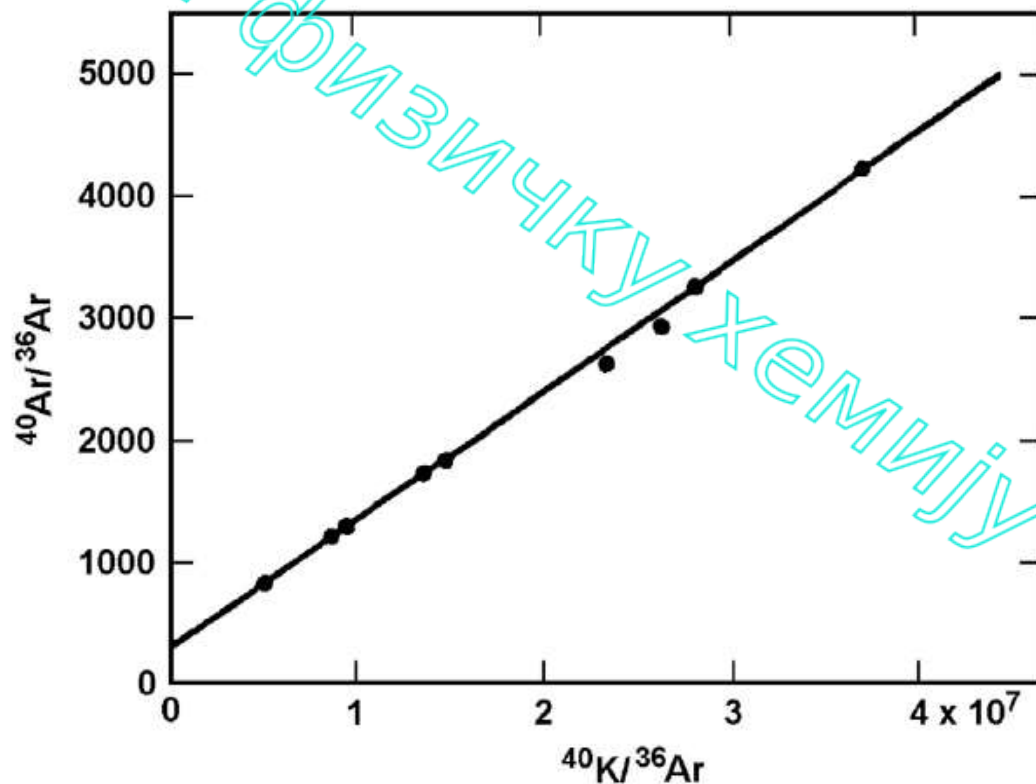
$$t = \frac{1}{\lambda_{uk}} \ln \left[\frac{N(^{40}\text{Ar})}{0,107 N(^{40}\text{K})} + 1 \right]$$

- Иницијално присутни ^{40}Ar ?

$$N(^{40}\text{Ar}) = N(^{40}\text{Ar})_{in} + \frac{\lambda_{EC}}{\lambda_{uk}} [N(^{40}\text{K})(e^{\lambda t} - 1)]$$

- $N(^{40}\text{Ar})_{\text{in}} = ?$ $t = ?$

$$\frac{N(^{40}\text{Ar})}{N(^{36}\text{Ar})} = \left[\frac{N(^{40}\text{Ar})}{N(^{36}\text{Ar})} \right]_{\text{in}} + \frac{\lambda_{EC}}{\lambda_{uk}} \left[\frac{N(^{40}\text{K})}{N(^{36}\text{Ar})} (e^{\lambda t} - 1) \right]$$



$^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ метод



(7% у природном стронцијуму)

$$t_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10} \text{ y}$$

- Сличан принцип као за $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$.
- Нерадиоگени стандард ^{86}Sr

ДАТИРАЊЕ БАЗИРАНО НА РАСПАДУ ^{238}U

- Преко емисије ^4He

$$N(^{238}\text{U})_0 - N(^{238}\text{U}) = \frac{N(^4\text{He})}{8}$$

- Преко односа $N(^{238}\text{U})/N(^{206}\text{Pb})$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{N(^{238}\text{U})}{N(^{206}\text{Pb})} + 1 \right]$$

- Комбинација $N(^{238}\text{U})/N(^{206}\text{Pb})$ и $N(^{235}\text{U})/N(^{207}\text{Pb})$

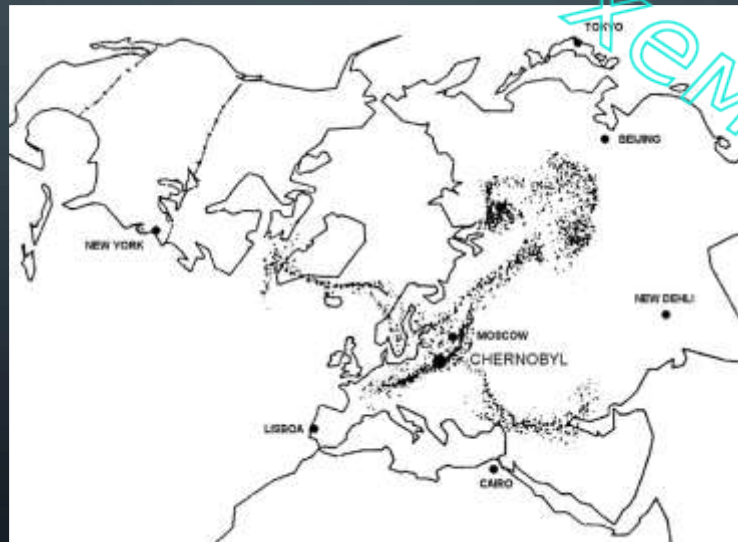
$$\frac{N(^{207}\text{Pb})}{N(^{206}\text{Pb})} = \frac{1}{138} \left[\frac{(e^{\lambda_{235}ut} - 1)}{(e^{\lambda_{238}ut} - 1)} \right]$$

АНТРОПОГЕНА РАДИОАКТИВНОСТ

- Тестирање нуклеарног оружја
- Акциденти у нуклеарним електранама/одлагалиштима
- Нуклеарне електране
- Ослобађање из одлагалишта радиоактивног отпада у океанима

- Тестирање нуклеарног оружја до 1963. године
 - Ослобођено $2 \cdot 10^{20}$ Bq фисионих производа
 - Већина се задржала у тропосфери око 30 дана да би са падавинама доспела до земље и водених површина
 - Мањи део у стратосфери (3–24 месеца)
 - Од тога су данас преостали само радионуклиди ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu
- Акциденти у нуклеарним постојењима
 - 1957. Winscale реактор, Велика Британија – паљење графита који је служио као модератор
 - Ослобођено: 700 TBq ^{131}I , 20 TBq ^{137}Cs , 3 TBq ^{89}Sr и 0.3 TBq ^{90}Sr
 - Укупна ослобођена активност у ваздуху 20 kBq/m³
 - 1957. експлозија у складишту ислуженог реакторског горива код Свердловска СССР (реакција нитрата и органског материјала)
 - Контаминација подручја од 1600 km² $2 \cdot 10^8$ Bq/m²
 - Подручје је и даље контаминирано

- 1979. делимично топљење језгра реактора, острво Три миље, Harrisburg, Pennsylvania. USA
 - Већина фисионих производа остала у згради реактора.
 - У ваздух емитовани Хе, Kr и $1\text{TBq } ^{131}\text{I}$
- 1986. Чернобил, СССР (данашња Украјина)
 - Током неколико дана велика количина фисионих производа емитована у атмосферу $\sim 5200\text{ PBq}$
 - Радиоактивни облак је захватио већи део Европе



- 2011. Фукушима, Јапан.
- Око 900 РВq испуштено у море. Мањи део земљишта контаминиран
- Цурење радиоактивног отпада из одлагалишта на дну океана

Физичка хемија Београд