

# КОСМИЧКО ЗРАЧЕЊЕ И ПРИРОДНА РАДИОАКТИВНОСТ

$^{14}\text{C}$

$^{14}\text{C}$



$^{10}\text{Be}$

$^{210}\text{Pb}$



- ?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)

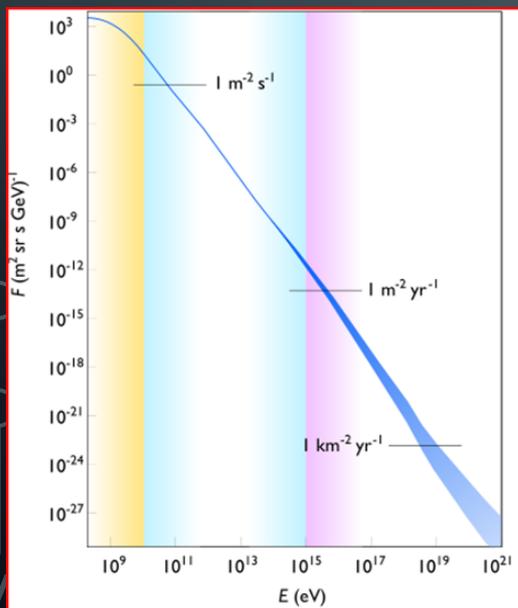


- Закључак: Зрачење потиче из космоса и не зависи од сунчевог зрачења.
- R. Millikan – „Космичко зрачење“

- Фотони? Наелектрисане честице?
- Bothe & Kolhorster 1929. путање 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%)
- $\alpha$ -честице (20%)
- јони Li, Be, B (0,7%)
- јони C, N, O (1,7%)
- јони  $Z > 10$  (0,6%)



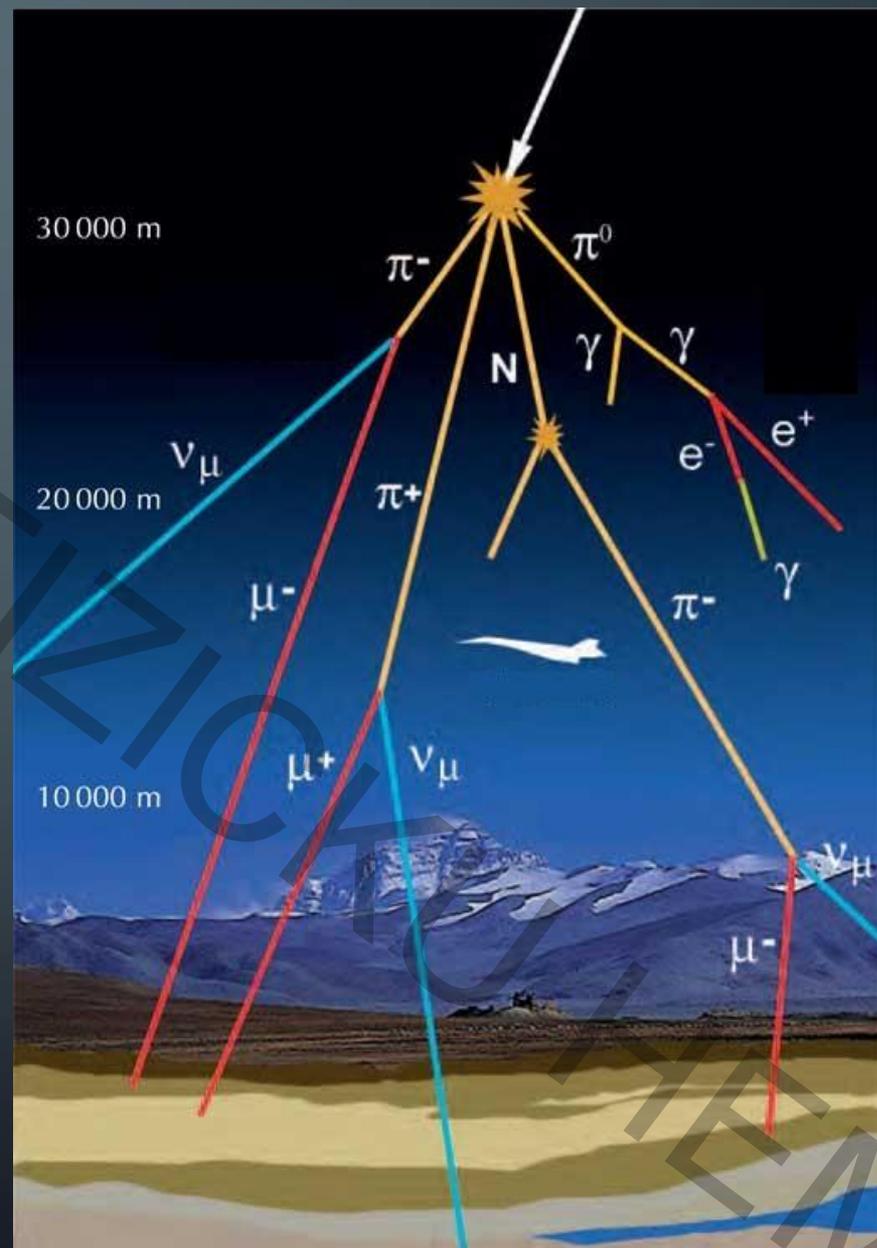
## Енергије

- $< 1 \text{ GeV}$  – 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

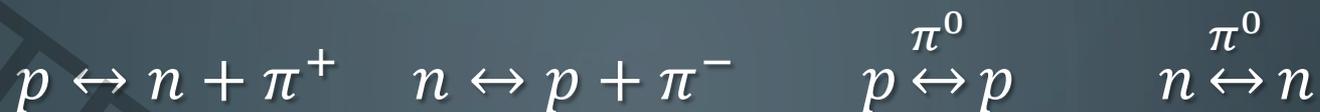
# КОНВЕРЗИЈА ПРИМАРНОГ КОСМИЧКОГ ЗРАЧЕЊА

- 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  $\alpha$ -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



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

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



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

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



- 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	$\beta^-$	0,0186	2500
$^{10}Be$	$1,52 \cdot 10^6$	$\beta^-$	0,555	300
$^{14}C$	5715	$\beta^-$	0,156	17000-25000
$^{22}Na$	2,605	$\beta^+$	0,545	0,5
$^{26}Al$	$7,1 \cdot 10^5$	$\beta^+$	1,16	1,2
$^{32}Si$	160	$\beta^-$	0,213	1,6
$^{35}S$	0,239	$\beta^-$	0,167	14
$^{36}Cl$	$3,01 \cdot 10^5$	$\beta^-$	0,709	60
$^{39}Ar$	268	$\beta^-$	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  ${}^3\text{H}/\text{sm}^2$
- 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 јединица и износи 1 атом  $^3\text{H}$  /  $10^{18}$  атома  $^1\text{H}$ )
  - 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

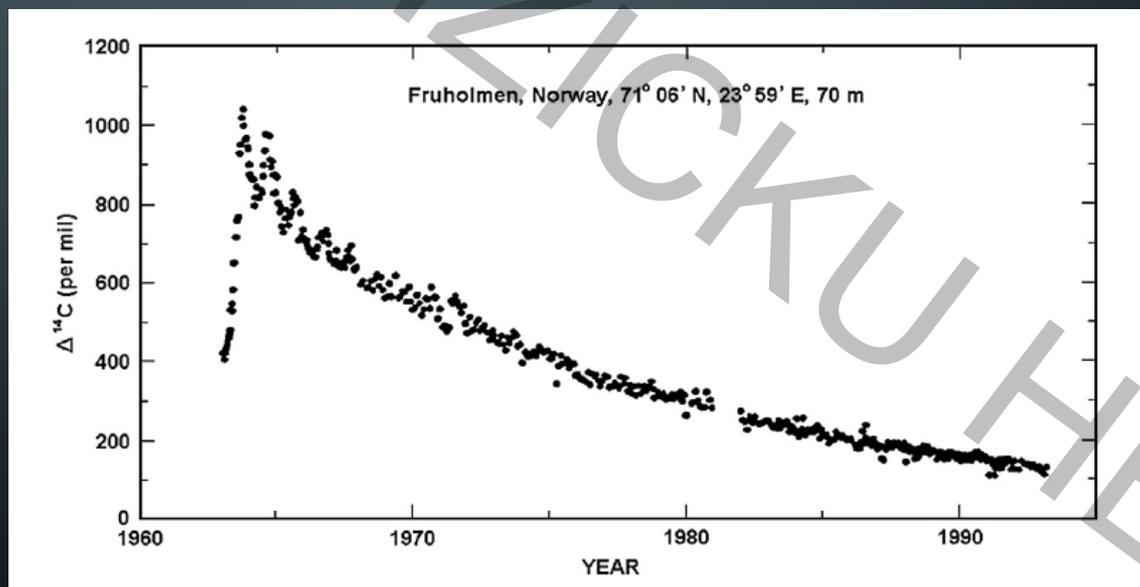
# $^{14}\text{C}$

- $t_{1/2} = 5715 \text{ y}$ ,  $E_{\text{max}}(\beta^-) = 158 \text{ MeV}$
- 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  $8500 \text{ PBq}$  (75 тона)
- 2 % у атмосфери, 98 % у различитим материјалима на Земљи укључујући живу материју
- У току 1-2 године долази до равнотеже са атмосферским  $\text{CO}_2$

- Специфична активност у живим бићима је око 227 Bq/kg
- Тестирање нуклеарног оружја допринос  $\sim 220 \text{ PBq}$
- Нуклеарне централе  $\sim 18 \text{ TBq/GW}_e$  у
- Сагоревање фосилних горива доводи до „разблажења“
- Данашња специфична активност  $^{14}\text{C}$  је  $13,56 \text{ расп min}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ C}$

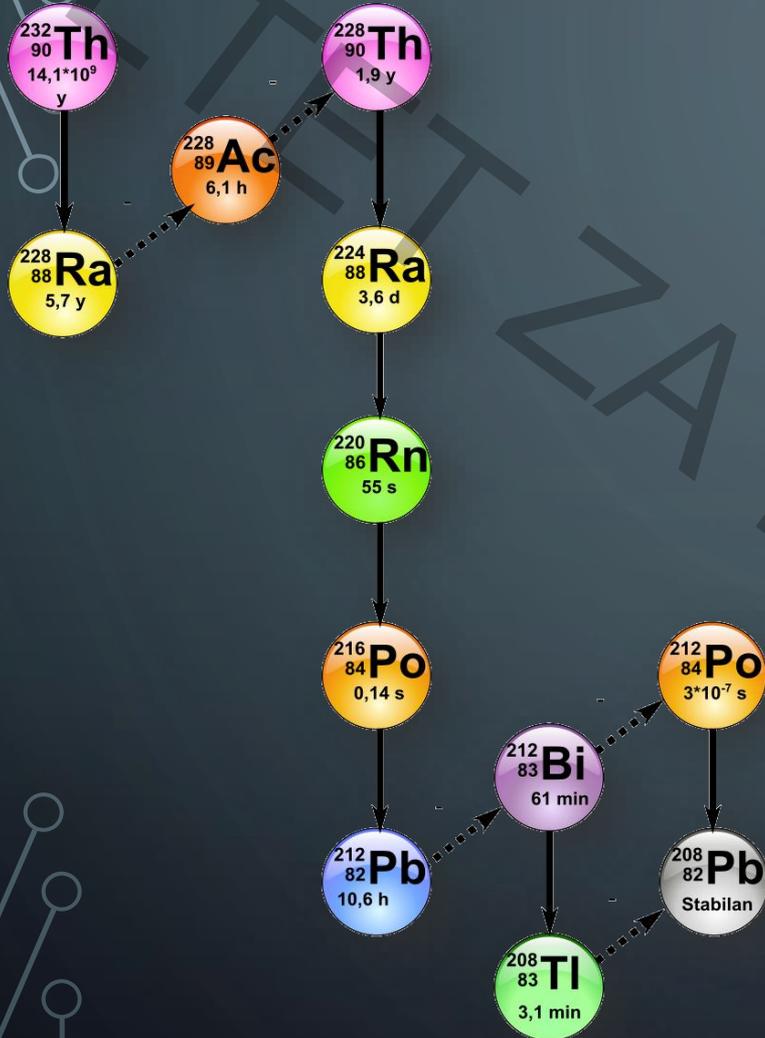


# ПРИМОРДИЈАЛНИ РАДИОНУКЛИДИ

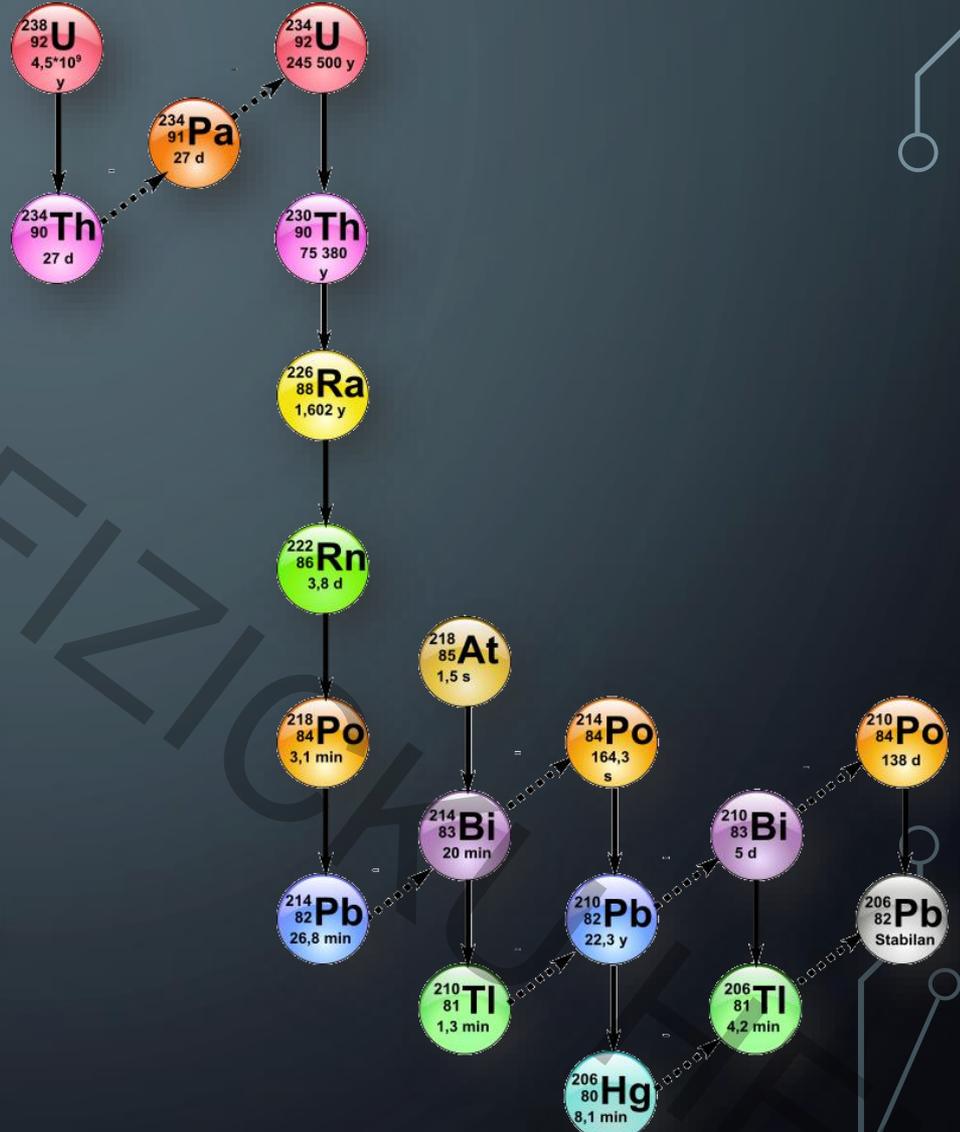
- $Z < 82$  (Pb)

Nuklid	w %	mod/E raspada	t1/2 (godine)
$^{40}\text{K}$	0.0117	$\beta^-$ EC 1.31	$1.26 \times 10^9$
$^{50}\text{V}$	0.250	$\beta^-$ EC (0.601)	$>1.4 \times 10^{17}$
$^{87}\text{Rb}$	27.83	$\beta^-$ 0.273	$4.88 \times 10^{10}$
$^{115}\text{In}$	95.72	$\beta^-$ 1.0	$4.4 \times 10^{14}$
$^{123}\text{Te}$	0.905	$\beta^-$ EC (0.052)	$1.3 \times 10^{13}$
$^{138}\text{La}$	0.092	$\beta^-$ EC	$1.06 \times 10^{11}$
$^{144}\text{Nd}$	23.80	$\alpha$	$2.1 \times 10^{15}$
$^{147}\text{Sm}$	15.0	$\beta^-$ 2.23	$1.06 \times 10^{11}$
$^{148}\text{Sm}$	11.3	$\beta^-$ 1.96	$7 \times 10^{15}$
$^{176}\text{Lu}$	2.59	$\beta^-$ (1.188)	$3.8 \times 10^{10}$
$^{174}\text{Hf}$	0.162	$\alpha$	$2 \times 10^{15}$
$^{187}\text{Re}$	62.60	$\beta^-$ 0.0025	$4.2 \times 10^{10}$
$^{190}\text{Pt}$	0.012	$\alpha$	$6.5 \times 10^{11}$

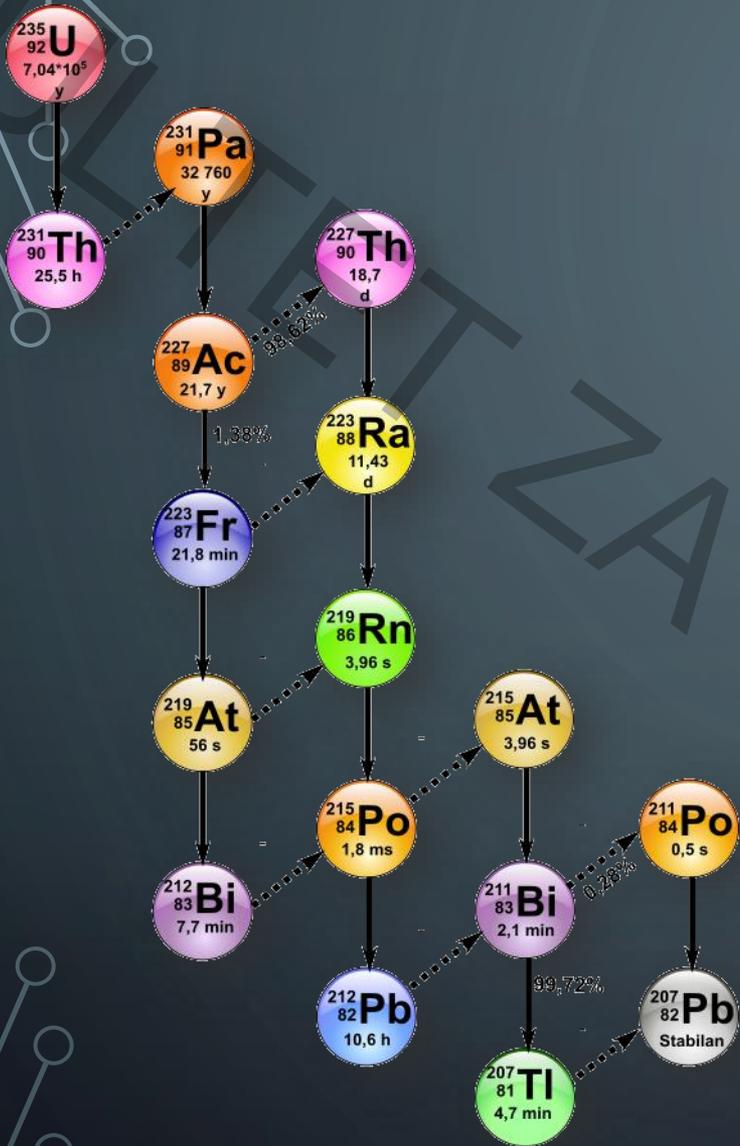
# РАДИОАКТИВНЕ СЕРИЈЕ



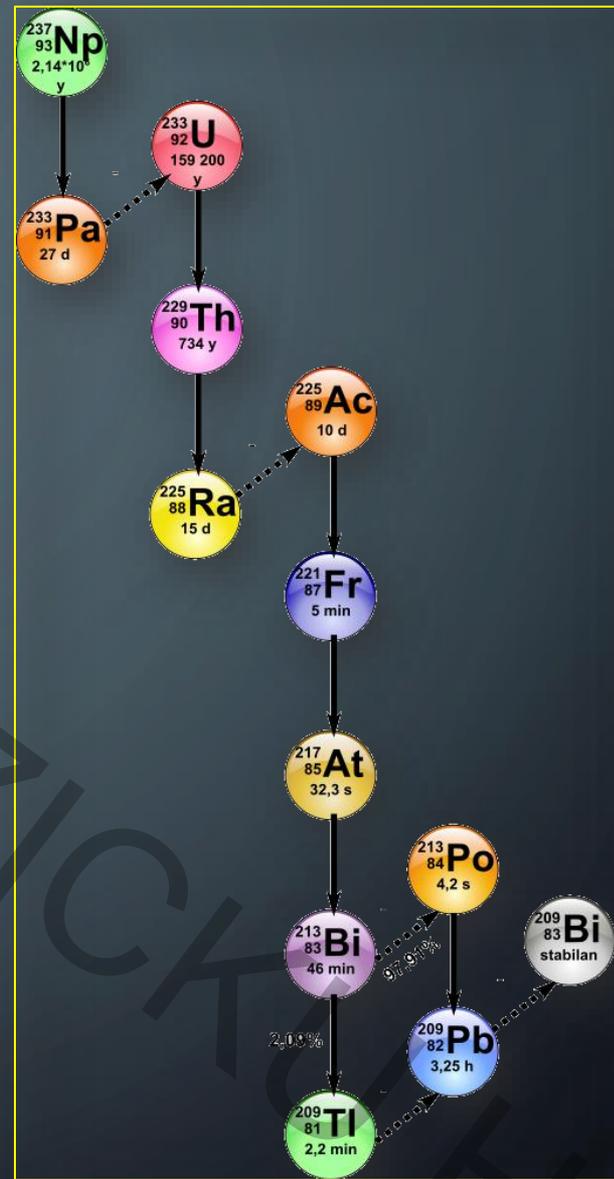
Торијумова  $4n$  серија



$^{238}\text{U}$   $4n+2$  серија



Актинијумова  $^{235}\text{U}$   $4n+3$  серија



$^{237}\text{Np}$   $4n+1$  серија

# РАДИЈУМ И РАДОН У ПРИРОДИ

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

- Скандинавске земље- посебно Шведска

- У ваздуху изнад депозита уранијумом богатих шкриљаца око  $1 \text{ MBq m}^{-3}$

- 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  $500 \text{ Bq/kg}$ )

- Већина грађевинског материјала садржи уранијум тако да се у стамбеним просторијама радон континуално емитује.

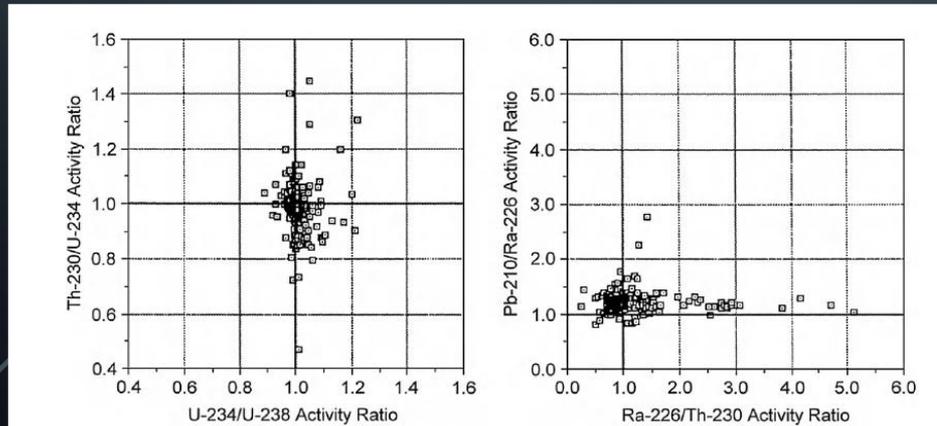
- Вредности  $<70 \text{ Bq m}^{-3} \text{ } ^{222}\text{Rn}$  се сматрају безбедним

# 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 у облику теже растворног  $Th^{4+}$  који се сорбује или преципитира.

Услед тога је нарушен однос активности у низу  $A(^{238}U)/A(^{234}U) \neq 1$

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



## ДАТИРАЊЕ НА ОСНОВУ РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

- 1907 Boltwood на основу распада у серији  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  израчунао старост уранијумових и торијумових минерала
- $^{14}\text{C}$  -датирање материјала биолошког порекла- археолошка старост
- $^3\text{H}$  – 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 $^{14}\text{C}$ – АРХЕОЛОШКО ДАТИРАЊЕ

- 1949. W. Libby – датирање на основу  $^{14}\text{C}$
- Претпоставке
  - Космогени  $^{14}\text{C}$  се производи константном брзином
  - Количина атропогеног  $^{14}\text{C}$  је много мања од количине космогеног
  - После смрти живог организма не долази до размене  $^{14}\text{C}$  са околином
- Специфична активност  $^{14}\text{C}$  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  $\text{CO}_2$  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  $^{12}\text{C}$  угљеника од стране биљака

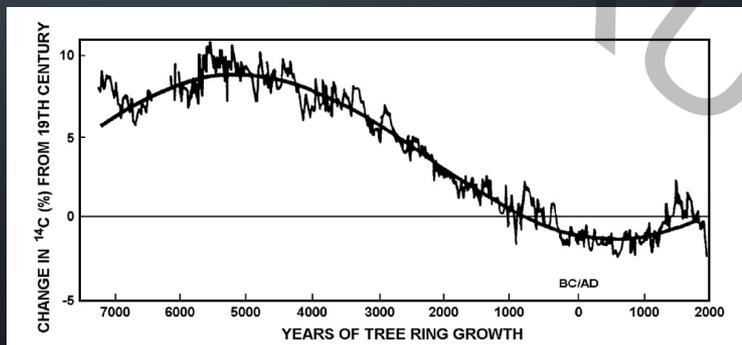
$$N(^{14}\text{C})_{cor} = N(^{14}\text{C})\{1 - 2(\delta(^{13}\text{C}) + 25)/1000\}$$

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

- На одступања од константности брзине производње

• *Sequoia gigantean*

Садржај  $^{14}\text{C}$



- Неке од успешних примена

- Трајање леденог покривача у Северној Америци – датирање узорака дрвета је показало да се лед повукао пре око 11 000, а не пре 35 000

година

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

# $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ метод

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



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

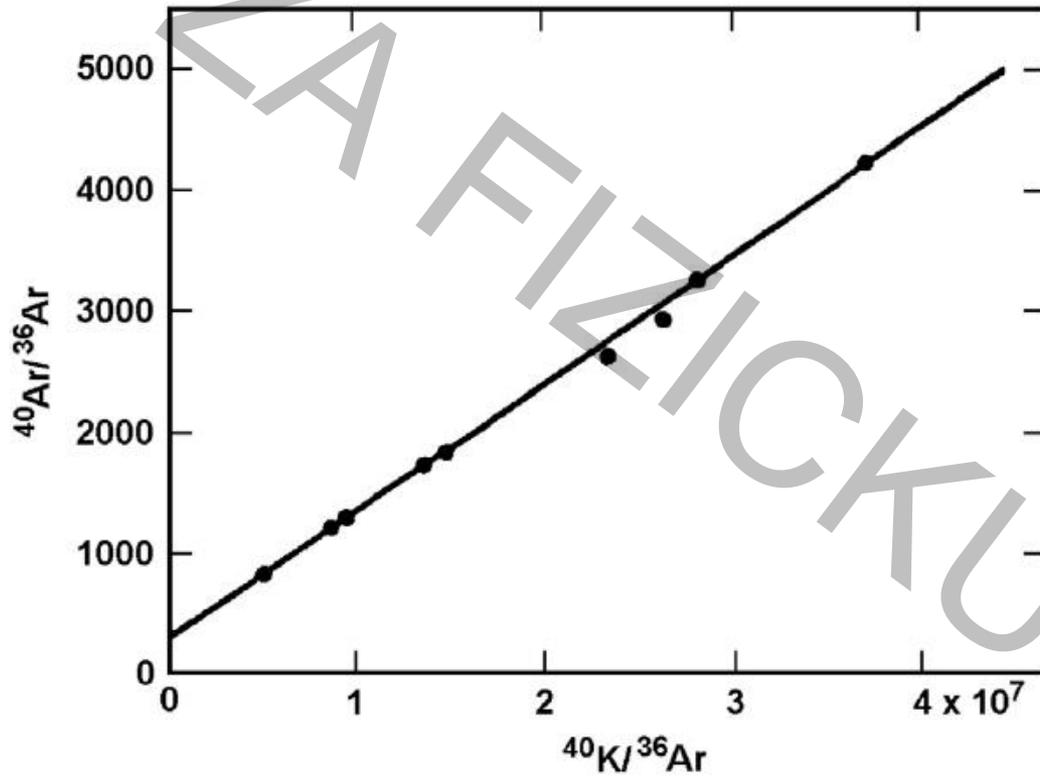
$$t = \frac{1}{\lambda_{uk}} \ln \left[ \frac{N(^{40}\text{Ar})}{0,107 N(^{40}\text{K})} + 1 \right]$$

- Иницијално присутни  $^{40}\text{Ar}$ ?

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

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

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



## $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ метод



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

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

# ДАТИРАЊЕ БАЗИРАНО НА РАСПАДУ $^{238}\text{U}$

- Преко емисије  $^4\text{He}$

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

- 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

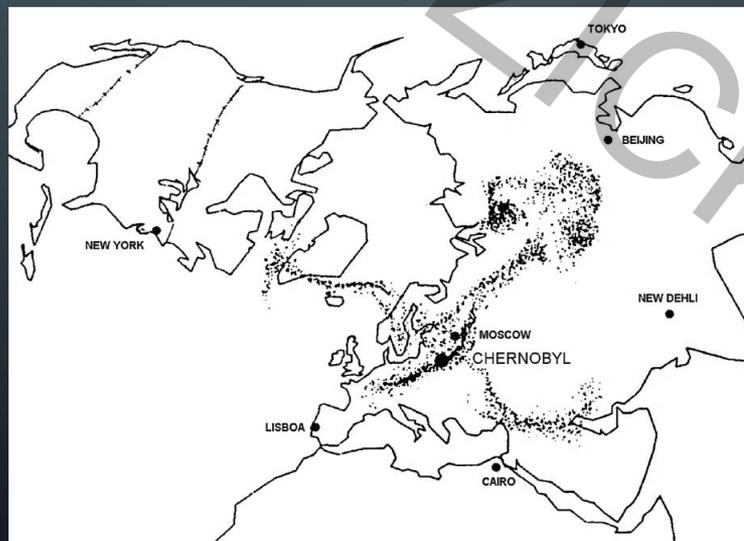
- Тестирање нуклеарног оружја до 1963. године

- 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  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$

- Акциденти у нуклеарним постојењима

- 1957. Winscale реактор, Велика Британија – паљење графита који је служио као модератор
  - Ослобођено:  $700 \text{ TBq } ^{131}\text{I}$ ,  $20 \text{ TBq } ^{137}\text{Cs}$ ,  $3 \text{ TBq } ^{89}\text{Sr}$  и  $0.3 \text{ TBq } ^{90}\text{Sr}$
  - Укупна ослобођена активност у ваздуху  $20 \text{ kBq/m}^3$
- 1957. експлозија у складишту ислуженог реакторског горива код Свердловска СССР (реакција нитрата и органског материјала)
  - Контаминација подручја од  $1600 \text{ km}^2$   $2 \cdot 10^8 \text{ Bq/m}^2$
  - Подручје је и даље контаминирано

- 1979. делимично топљење језгра реактора, острво Три миље, Harrisburg, Pennsylvania. USA
  - Већина физионих производа остала у згради реактора.
  - У ваздух емитовани Хе, Кр и  $1\text{TBq } ^{131}\text{I}$
- 1986. Чернобил, СССР (данашња Украјина)
  - Током неколико дана велика количина физионих 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