

Základy geologie pro geografy (podzimní semestr 2022)

Datování geologické minulosti

MUNI

Daniel Nývlt (daniel.nyvlt@sci.muni.cz)

Datovací metody geologické minulosti

Absolutní X relativní datování

Radiometrické (radioizotopové) metody (terigenni radionuklidy, kosmogenni radionuklidy)

Radiační dozimetrické metody (luminiscence, elektronová spinová rezonance, racemizace aminokyselin, štěpné stopy)

Kvalitativní a srovnávací metody (přírůstkové metody – varvy, letokruhy, led; molekulární hodiny, magnetostratigrafie, biostratigrafie, tefrochronologie, lichenometrie, zvětrávání, pedogeneze, izotopické signály, superpozice, stratigrafické vztahy)

Terigenní radionuklidy

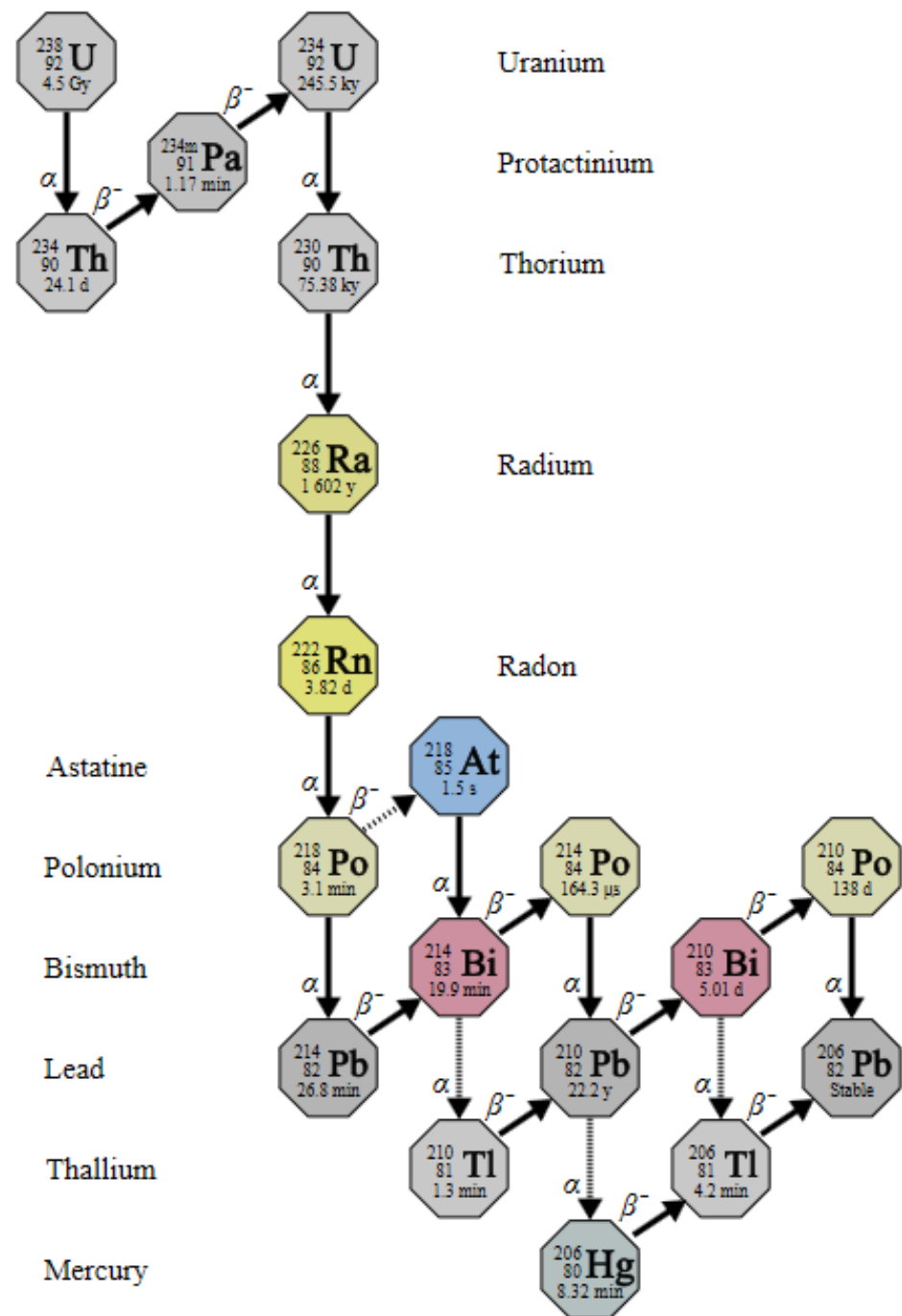
Produkty rozpadové řady ^{238}U

- **metoda uran-olovo** je založená na **stanovení stáří** na základě poměru dceřiného izotopu ^{206}Pb a mateřského izotopu ^{238}U ,

- jedna z nejstarších datovacích metod (Boltwood, 1907),

- obvykle aplikovaná na **zirkonech** (příp. monazit nebo titanit), které zachycují atomy uranu a thoria do své krystalové struktury, ale silně odpuzují olovo, proto lze považovat veškeré obsažené olovo za produkt radiogenního rozpadu až po vzniku minerálu,

- horní datovatelný limit je ~ 4.5 Ga s chybou pouze 0,1–1%.

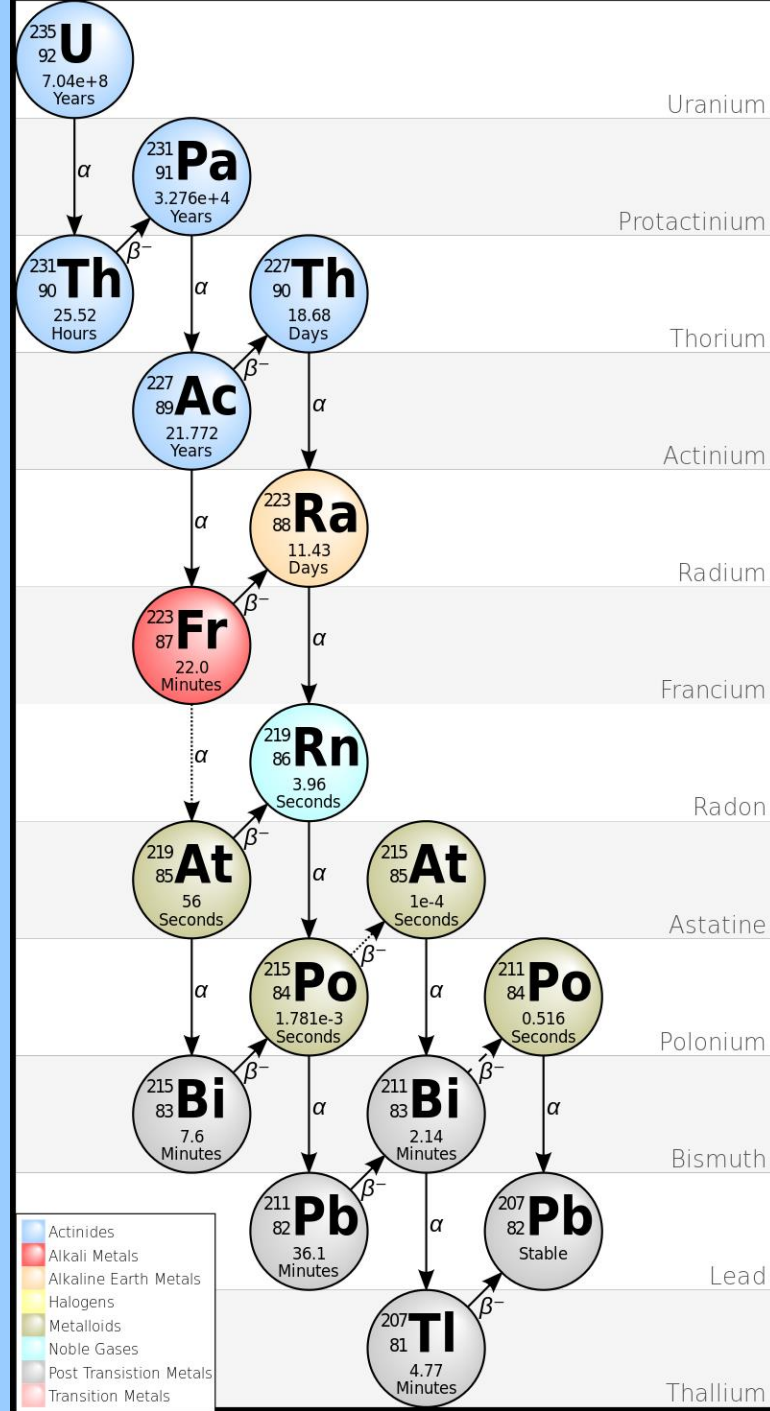


- **uran-thoriová metoda** je založená na **stanovení stáří** na základě stupně ustavené rovnováhy mezi rozpadem dceřiného izotopu ^{230}Th a mateřského izotopu ^{234}U ,
- protože je poločas rozpadu dceřiného izotopu kratší, než je poločas rozpadu izotopu mateřského, odpovídá v případě **dlouhodobé rovnováhy** množství rozpadů ^{230}Th za jednotku času množství rozpadů ^{234}U za stejný čas,
- pokud však systém není uzavřený (např. dochází k úniku radonu difuzí nebo ochuzování o vybrané izotopy zvětráváním a erozí) taková rovnováha nemůže být ustavena,
- uran je rozpustný ve vodě a proto jakýkoliv materiál, který se z takovéto vody vysráží bude obsahovat uran (typicky 0,01–100 ppm), proto je tato **metoda** vhodná k **datování mořských** (korálů) i **pevninských karbonátů** (speleotém),
- horní datovatelný limit je ~ 500 ka.

$$1 - \left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right) = e^{-\lambda_{230}T} - \left[\left(\frac{^{234}\text{U}}{^{238}\text{U}} \right) - 1 \right] \left(\frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \right) \times (1 - e^{(\lambda_{234} - \lambda_{230})T})$$

Produkty rozpadové řady ^{235}U

- **uran-protaktiniová metoda** ($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$) je také použitelná pro datování mladých událostí,
- protaktinium (obdobně jako thorium) není na rozdíl od uranu rozpustné ve vodě,
- stejné aplikace jako u uran-thoriové metody, tedy vhodné k **datování mořských** (korálů) i **pevninských karbonátů** (speleotém),
- dosah metody ~ 200 ka



Terigenní radionuklidy

Produkty rozpadové řady ^{238}U , ^{235}U a ^{232}Th

- **metoda olovo-olovo** je dále rozvinutou metodou založenou na **stanovení stáří** na základě poměru dceřiných izotopů ^{206}Pb , ^{207}Pb a ^{208}Pb a jejich mateřských izotopů,
- ideální v případech, když nejsou k dispozici zirkony/monazity a nebo je primárně přítomno neradiogenní olovo,
- první metoda, která umožnila správně datovat stáří Země ($4,55 \pm 0,07$ Ga; Patterson, 1956) nebo byla aplikována k datování chondritických meteoritů a tím pádem vzniku Sluneční soustavy ($4,57 \pm 0,0004$ Ga; Connelly et al., 2012).

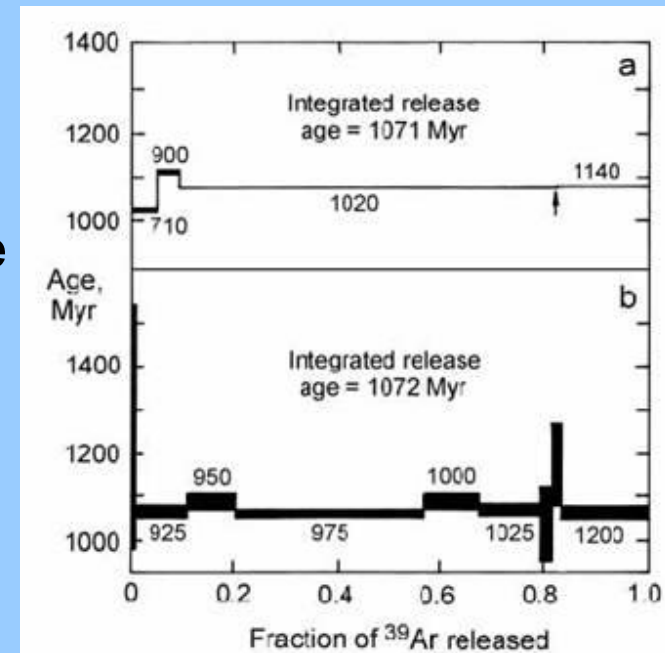
$$\left[\frac{\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_P - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_I}{\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_P - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_I} \right] = \left(\frac{1}{137.88} \right) \left(\frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1} \right)$$

Terigenní radionuklidy

Draslík-argonové datování

- **metoda draslík-argon ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$)** je založená na **stanovení stáří** na základě rozpadu radiogenního ^{40}K na ^{40}Ca (beta rozpad) a ^{40}Ar (zachycením elektronu),
- argon je vzácným plynem, který zůstává po vzniku zachycen v krystalové mřížce a můžeme ho z ní dostat zvýšením teploty nebo tlaku, což se používá při datování,
- draslík je běžný prvek v mnoha minerálech, jako jsou slídy, jílové minerály nebo živce,
- poločas rozpadu ^{40}K je 1,248 Ga, proto lze datovat velmi staré horniny,
- metoda je velmi vhodná k datování magmatických okamžik, kdy při chladnutí a tuhnutí taveniny klesne teplota pod Curieovu teplotu železa (770 °C).

$$t = \frac{t_{\frac{1}{2}}}{\ln(2)} \ln \left(\frac{K_f + \frac{Ar_f}{0.109}}{K_f} \right)$$



Terigenní radionuklidy

Argon-argonové datování

- **metoda argon-argon ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)** je metodou vycházející z $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ datování přinášející přesnější výsledky,
- datování je založené na ozáření horniny/minerálu neutrony (přeměna $^{39}\text{K} \rightarrow ^{39}\text{Ar}$) a tudíž je možné měřit poměr $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$,
- protože se jedná pouze o relativní datovací metodu musí být zároveň s datovaným vzorkem ozářen standard známého stáří (nejčastěji stanovený pomocí $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ datování),
- výhodou metody je možnost datovat pouze části krystalů minerálů a umožňuje datovat nižší uzavírací teplotu, než originální K-Ar datování,
- pomocí této metody byly v posledních 10 letech zpřesněny stáří významných geologických hranic, jako je hranice perm-trias (252,2 Ma) a křída-paleogén (66 Ma).

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln(J \times R + 1)$$

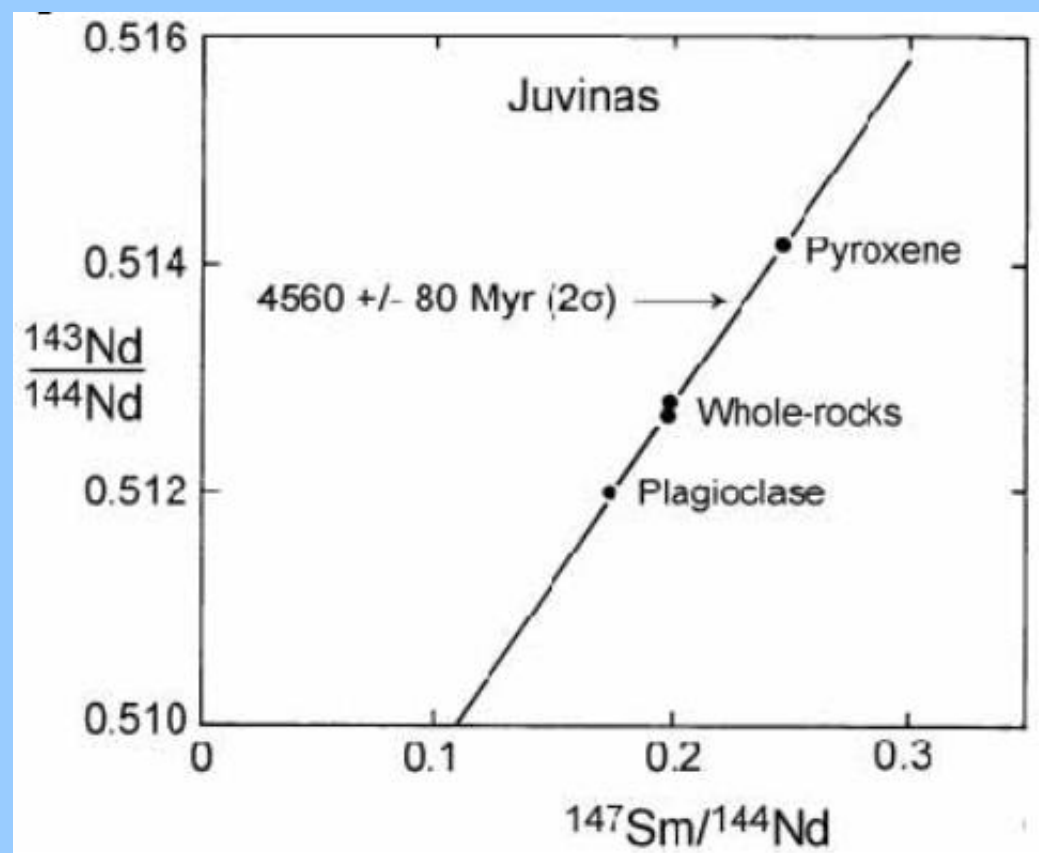
Terigenní radionuklidy

Samarium-neodymové datování

- datovací **metoda samarium-neodym** je založená na alfa rozpadu ^{147}Sm na ^{143}Nd s poločasem rozpadu 106 Ga,

- samarium a neodym se nabožacuje v silikátových minerálech s narůstajícím časem krystalizace, samarium je nabožacováno v mafických horninách (vysoký poměr Sm/Nd), naproti tomu neodym je bohatší ve felsických minerálech (nízký poměr Sm/Nd),

- pro výpočet stáří se využívá poměrů $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ a $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$.



Terigenní radionuklidy

Rubidium-stronciové datování

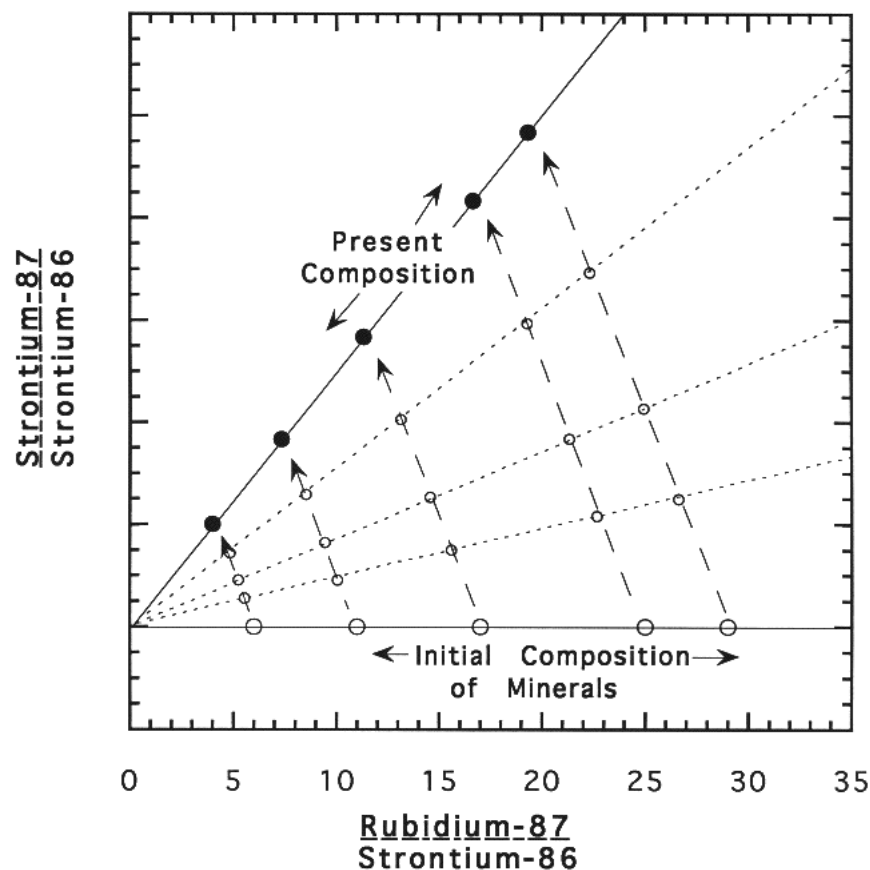
- datovací **metoda rubidium-stroncium** je založená na beta rozpadu ^{87}Rb na ^{87}Sr s poločasem rozpadu 48,8 Ga,

- rubidium je nabohacené v korových horninách, stroncium se při frakční krystalizaci koncentruje v plagioklasech a rubidium se dostává do minerálů krystalujících v pozdních fázích, mění se tak poměr Rb/Sr u jednotlivých minerálů a hornin (nejvyšší je u pegmatitů s hodnotou >10),

- obvykle se **datuje více minerálů** (u granitu nejčastěji plagioklas, draselný živec, amfibol, biotit a muskovit), protože mají jiné počáteční poměry Rb/Sr,

- pro výpočet stáří se využívá poměrů $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$.

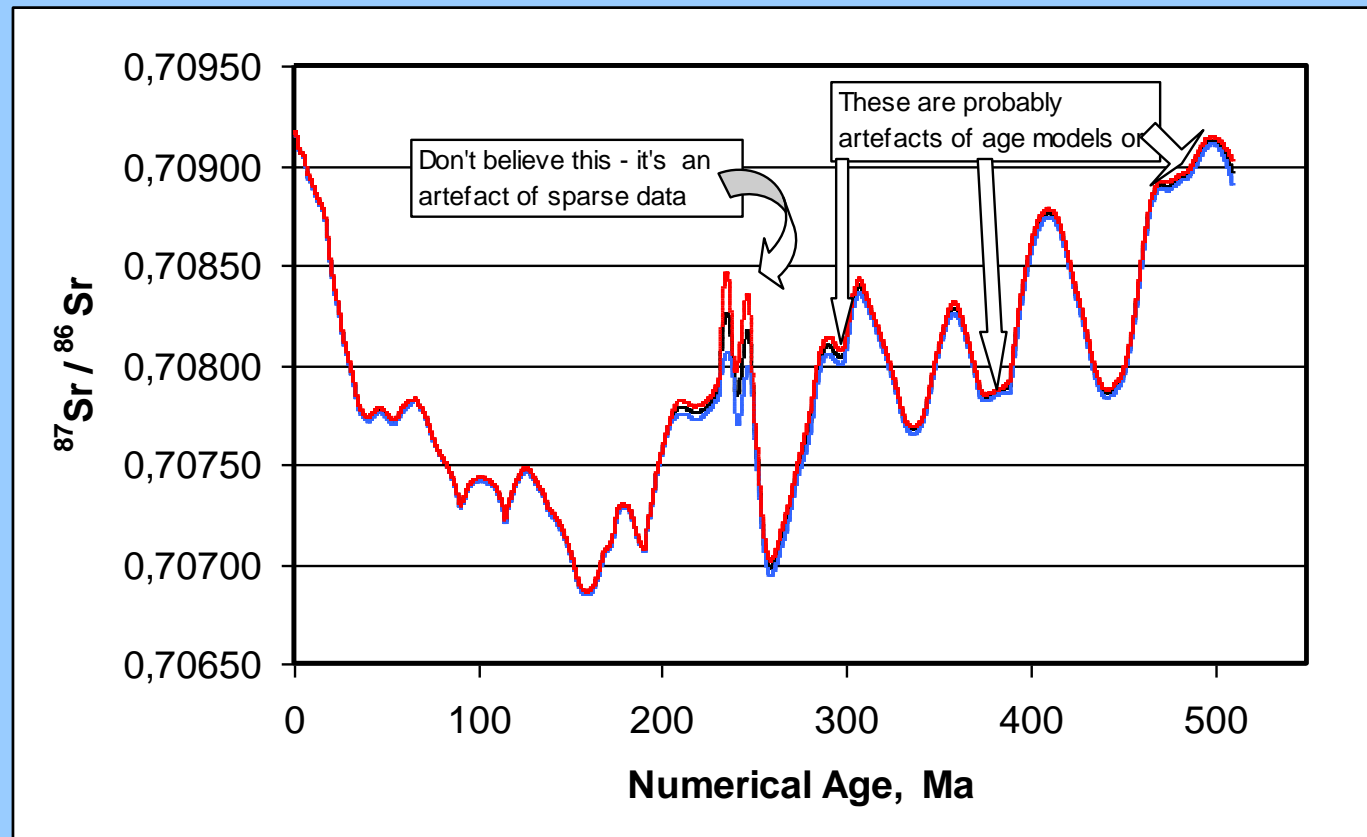
The Rubidium-Strontium System



Stronciové datování mořských organismů a sedimentů

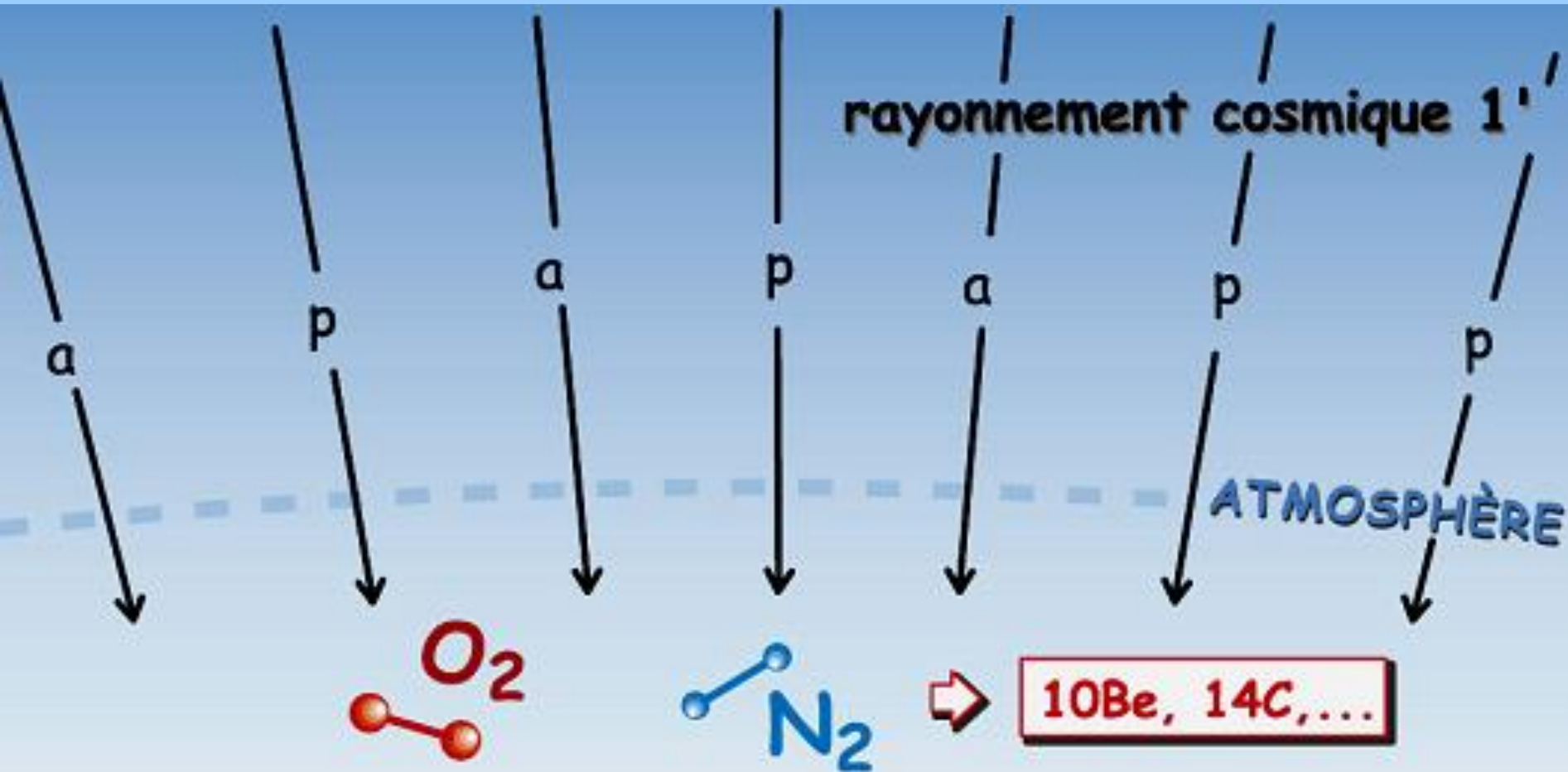
Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v biogenně a chemogenně vzniklých mořských organismech a sedimentech se během fanerozoika mění. Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v mořské vodě je závislý na poměrech $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v horninách, které jsou do moří erodovány a kterými sladká voda ještě na pevninách protéká. Intenzivní vulkanická aktivita během některých období přináší do oceánu materiál s nízkým poměrem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, proti tomu působí snos hornin kontinentální kůry s vysokým poměrem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ do oceánů v obdobích bez významnější vulkanické aktivity.

Pro mladší kenozoikum vhodná metoda datování s chránek mořských měkkýšů.

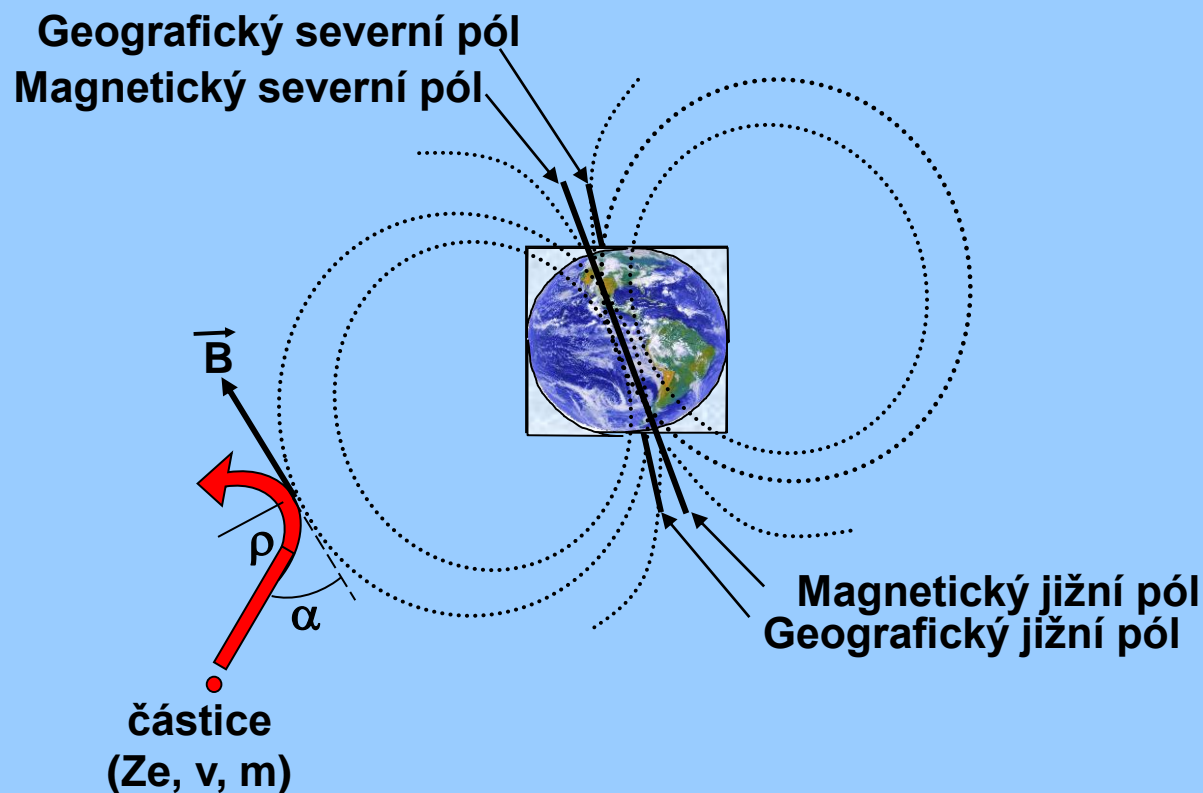


Kosmogenní radionuklidy – radiogenní izotopy vznikající štěpením atomových jader vlivem **vysokoenergetického kosmického záření**.

Působením primárního kosmického záření (vysoce energetické nukleony s energií >1 GeV: 89 % protony, <10 % alfa částice, 1 % jádra těžších prvků; <1 % beta částice) na atomy vzduchu (H, N, O, Ar, Cl) v horních vrstvách atmosféry vznikají **kosmogenní radionuklidy** (např. ^3He , ^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{39}Ar), které se zabudovávají např. do biosféry nebo hydrosféry.



Atmosférická i *in situ* produkce kosmogenních radionuklidů je závislá na **magnetickém poli Země**. Jejich produkce vzrůstá s nadmořskou výškou a magnetickou (zeměpisnou) šířkou.

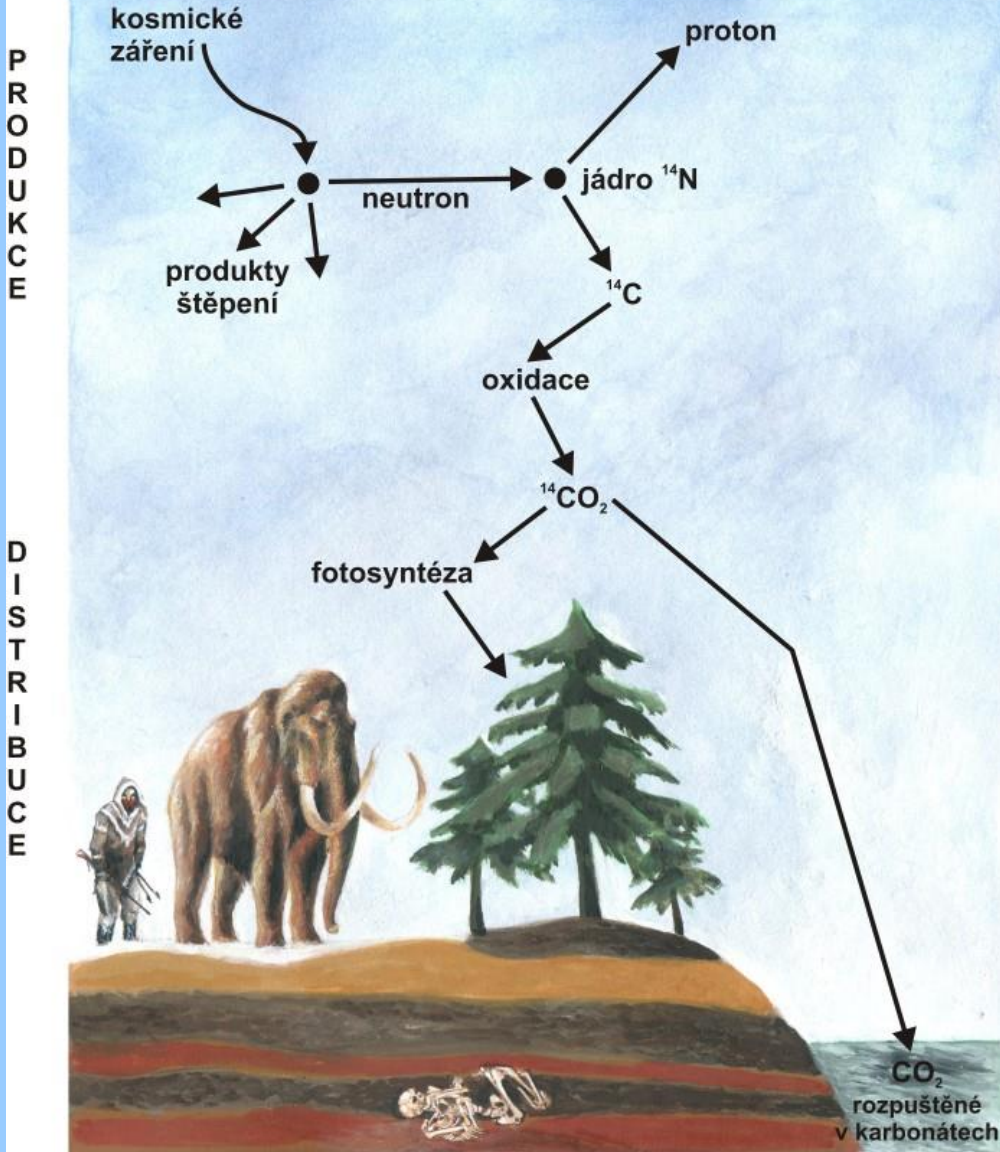


$$B \cdot \rho \cdot c = (m \cdot v \cdot c) / Z_e \cdot \sin \alpha$$

Radiouhlík – ^{14}C

Uhlík má **dva stabilní** (^{12}C – 98,9 % a ^{13}C – 1,1 %) a **jeden radiogenní** (^{14}C) izotop rozpadající se na ^{14}N s emisí β záření. Radiouhlík **vzniká v atmosféře** na hranici troposféry a stratosféry a především ve vyšších geomagnetických šířkách **při srážkách** vysokoenergetických neutronů s molekulou dusíku (N_2).

V troposféře je v důsledku proudění „téměř“ homogenně rozšířen a reaguje s kyslíkem za vzniku $^{14}\text{CO}_2$. Ten se dostává **fotosyntézou do rostlin** a dále potravním řetězcem **do zvířat a člověka** (globální cyklus uhlíku). Z atmosféry se dostává také do mořské i sladké vody, proto je **zabudován do vlastních těl** také **vodními organismy**.



ROZPAD

rovnovážná koncentrace: $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \approx 10^{-12}$

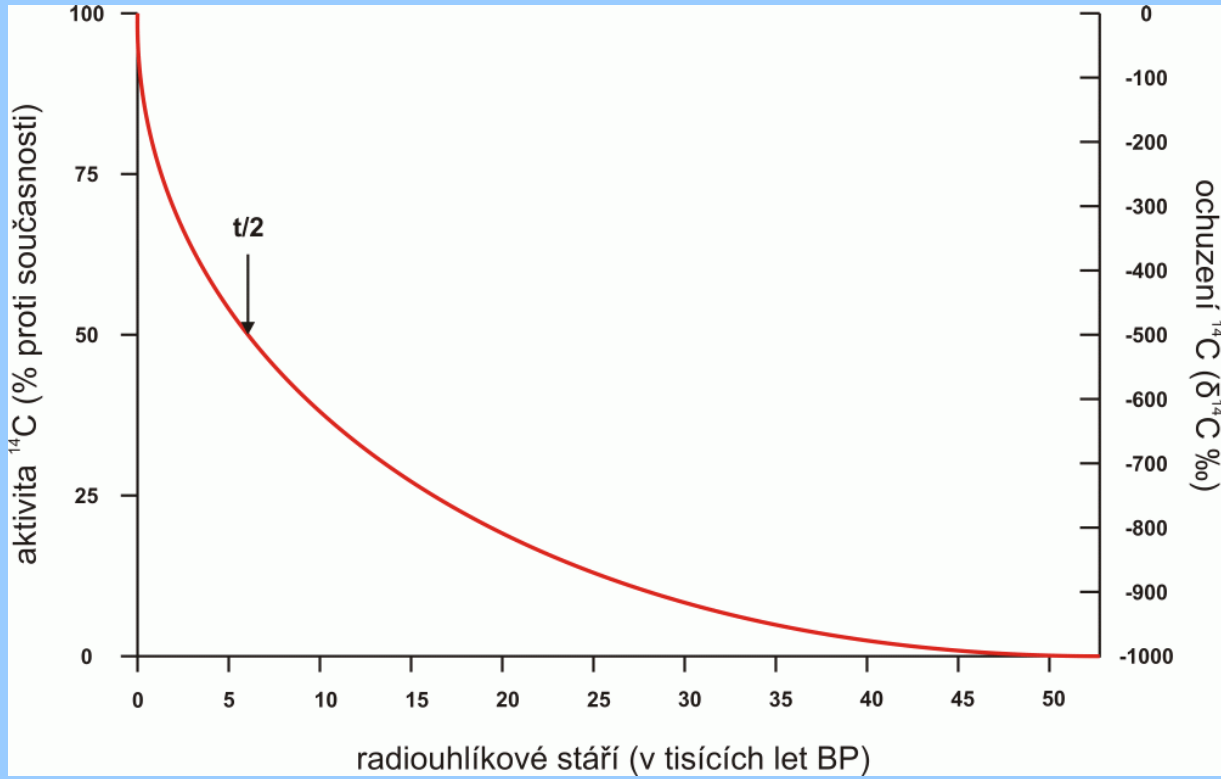
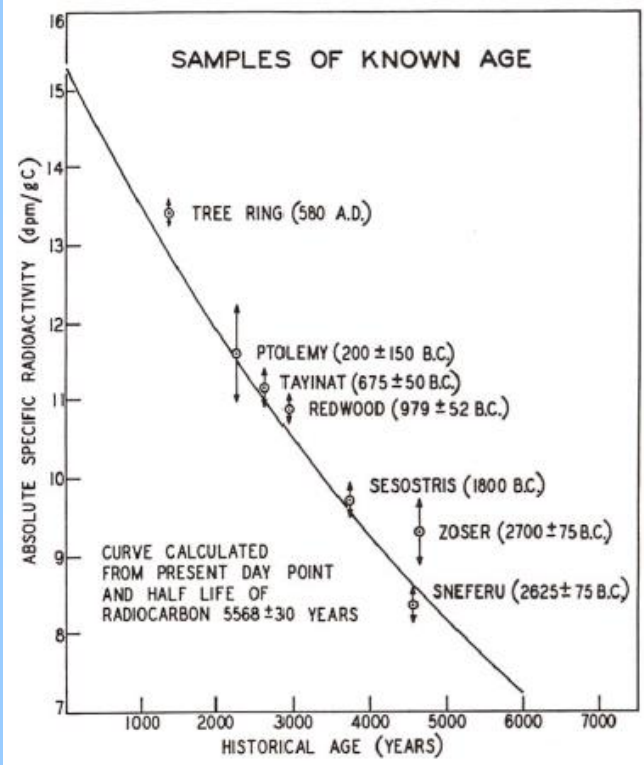
rozpad: $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu^-$

poločas rozpadu: 5730 let

1 gram \rightarrow ~10 rozpadů za minutu

Radiouhlík – ^{14}C

Poločas rozpadu (přeměny) izotopu ^{14}C je 5730 ± 40 let (tzv. cambridgeský poločas rozpadu). Původní poločas rozpadu použitý W. F. Libbym (1949) byl 5568 ± 30 let.



W.F. Libby – Nobel Prize winner 1960 – „Seldom has a single discovery in chemistry had such an impact on the thinking in so many fields of human endeavor.“ Nobel Committee (1960)

Radiouhlíkové datování

Jaký materiál datujeme? dřevo, rašelinu, organické jezerní sedimenty, karbonáty, zbytky rostlin, uhlíky, ulity měkkýšů, korály, CO₂ rozpuštěné ve vodě, kosti, papír, látky, kůže, pigmenty...

Jak starý materiál lze odatovat? běžně osminásobek poločasu rozpadu, tedy ~ 45 tisíc let, max. 60–65 tisíc let

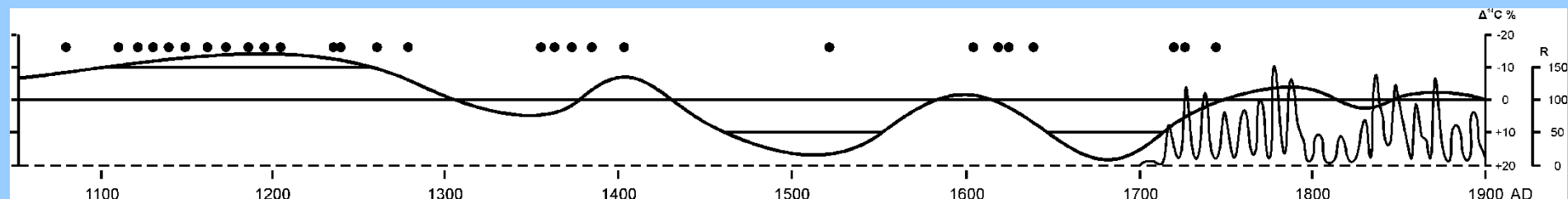
Co z laboratoře dostanete? laboratorní kód vzorku; konvenční radiouhlíkové stáří BP s interní chybou $\pm 1\sigma$

standardně udáváno **BP** (konvenčně před rokem 1950 AD/CE/n.l.)

Kalibrace radiouhlíkových dat

Prvotním přiblížením bylo uvažováno, že **produkce radiogenního uhlíku je stálá v čase a v prostoru** a že mezi jeho produkcí a rozpadem je tedy v přírodě dlouhodobá dynamická rovnováha. Avšak již v roce 1958 de Vries studiem letokruhů ukázal, že stáří získaná jako konvenční radiouhlíková stáří neodpovídají stářím ročních přírůstků.

Produkce radiogenního uhlíku v atmosféře je totiž v čase a prostoru nerovnoměrná (dochází ke kvaziperiodickým změnám atmosférické aktivity ^{14}C v periodách od 200 do 2300 let, myšleno na krátkých časových škálách).



Ta souvisí především se **změnami intenzity kosmického záření pronikajícího do atmosféry** v důsledku **změn geomagnetického pole** a **solární aktivity** a s některými pozemskými procesy (především změny mořského proudění).

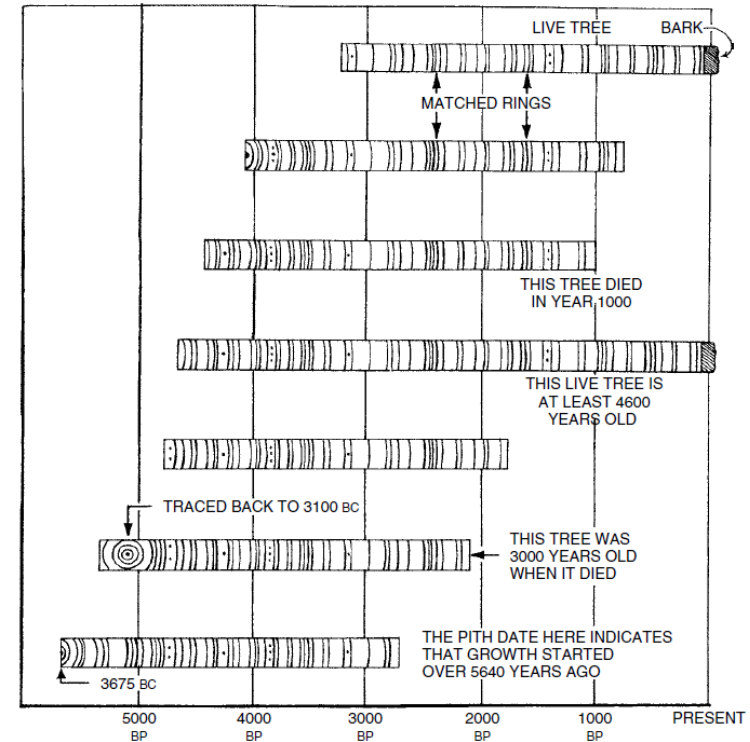
Od průmyslové revoluce významný **vliv člověka** na frakcionaci uhlíku v atmosféře (**spalování fosilních paliv** ředí radiogenní uhlík v atmosféře dodáváním izotopicky lehčí směsi uhlíku bez ^{14}C – tzv. **Suessův efekt**; naopak **termonukleární výbuchy** zvyšují podíl radiogenního uhlíku v atmosféře na hodnoty, které nemají v přírodní historii období).

Jaké jsou nejčastější metody kalibrace radiouhlíkového stáří?

Dendrochronologická kalibrace – přímé srovnání letokruhů datovaných radiouhlíkovou metodou a jejich přesného stáří stanoveného dendrochronologicky – dnes kalibrace po stáří 13.900 cal. let BP podle nejdelší dendrochronologické řady (dubová a borovicová křivka z Německa a Švýcarska).

Varvová chronologie, mělkomořské laminované sedimenty, speleotémy

Srovnání s jinými datovacími metodami



Kosmogenní radionuklidy

Sekundární radiací mezonů K a π (rozpadajících se na miony) a zejména energetických nukleonů (nejčastěji neutronů s energií >10 MeV) vznikají přímo na zemském povrchu **in situ tvořené kosmogenní radionuklidy** (TCN – terrestrial in situ cosmogenic nuclides: ^3He , ^{10}Be , ^{21}Ne , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca).

In situ produkce kosmonuklidů:

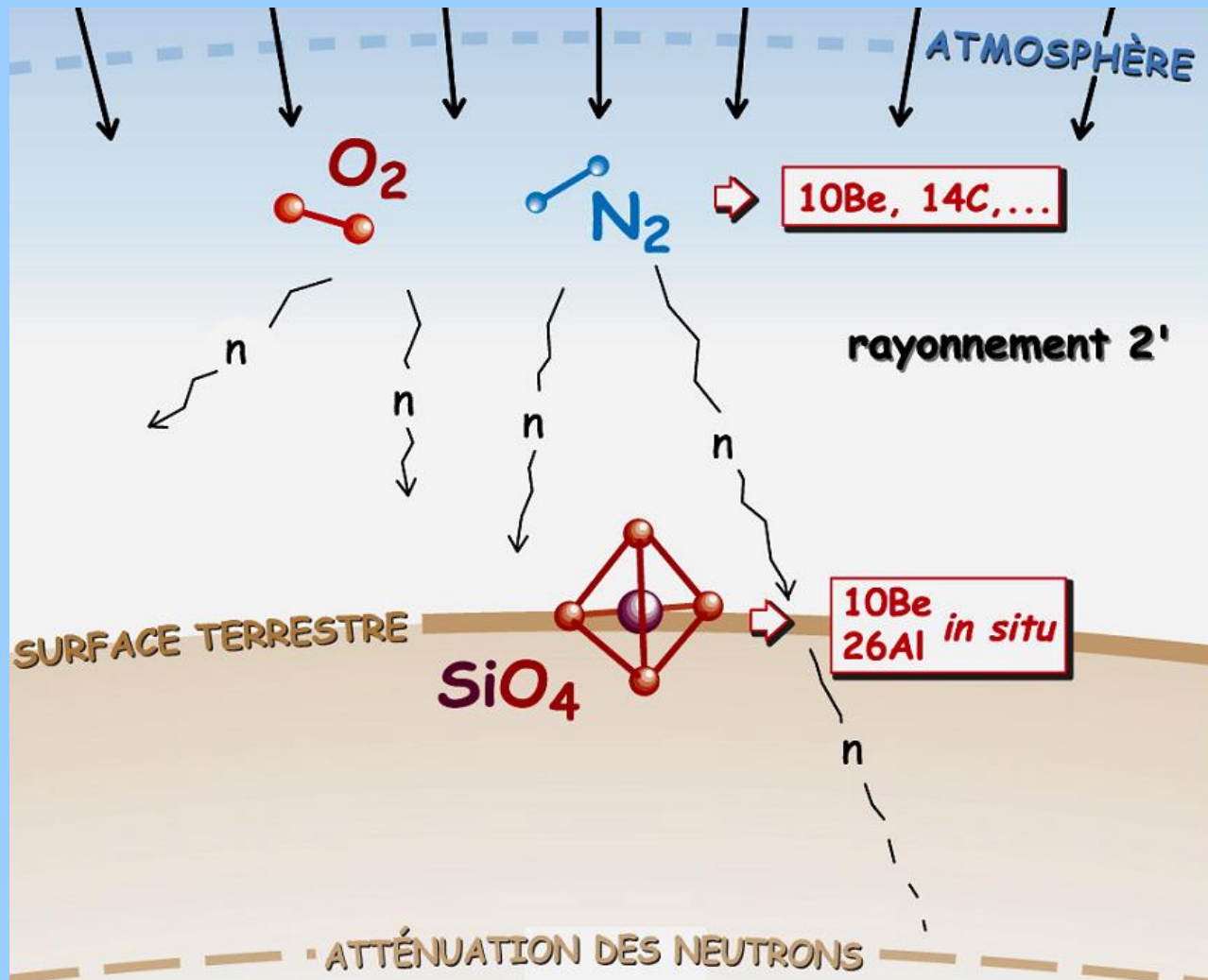
^3He : 75–100 at·g⁻¹·a⁻¹

^{10}Be : 4–7 at·g⁻¹·a⁻¹

^{21}Ne : 18–21 at·g⁻¹·a⁻¹

^{26}Al : 30–36 at·g⁻¹·a⁻¹

^{36}Cl : 8–10 at·g⁻¹·a⁻¹

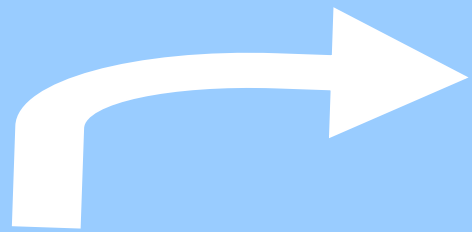
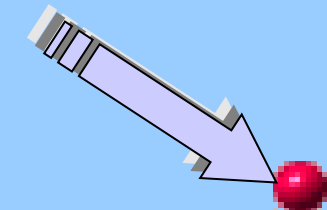


Produkce ^{10}Be v krystalové mřížce křemene

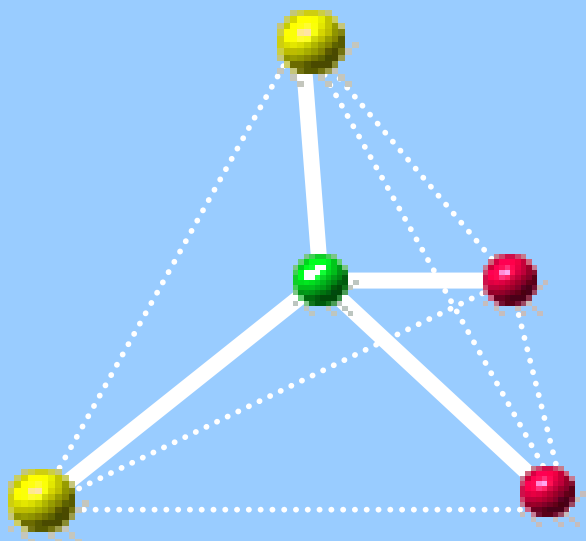
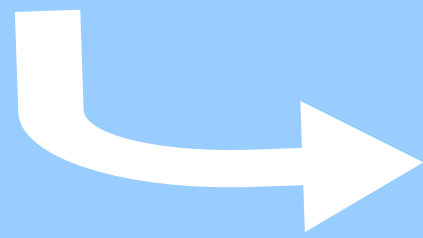
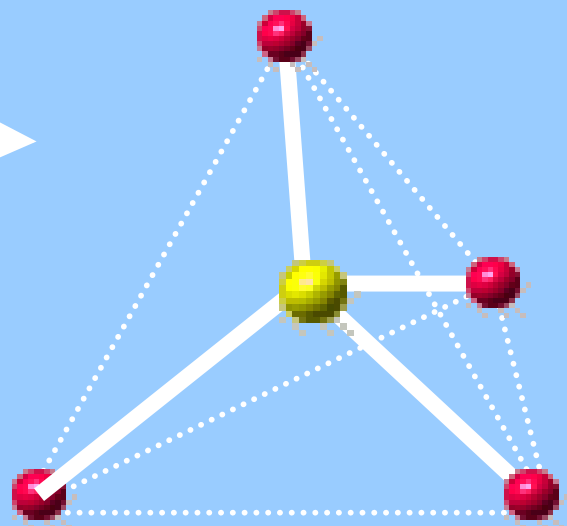
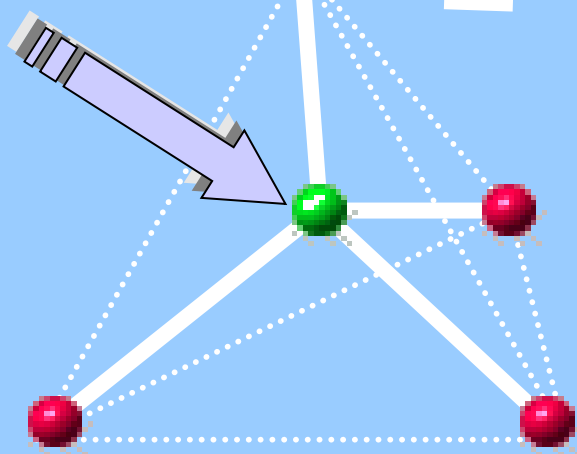
^{10}Be atm $T_{1/2} = 1.387 \pm 0.012$ Ma

sekundární radiace (>10 MeV)

energetické
nukleony

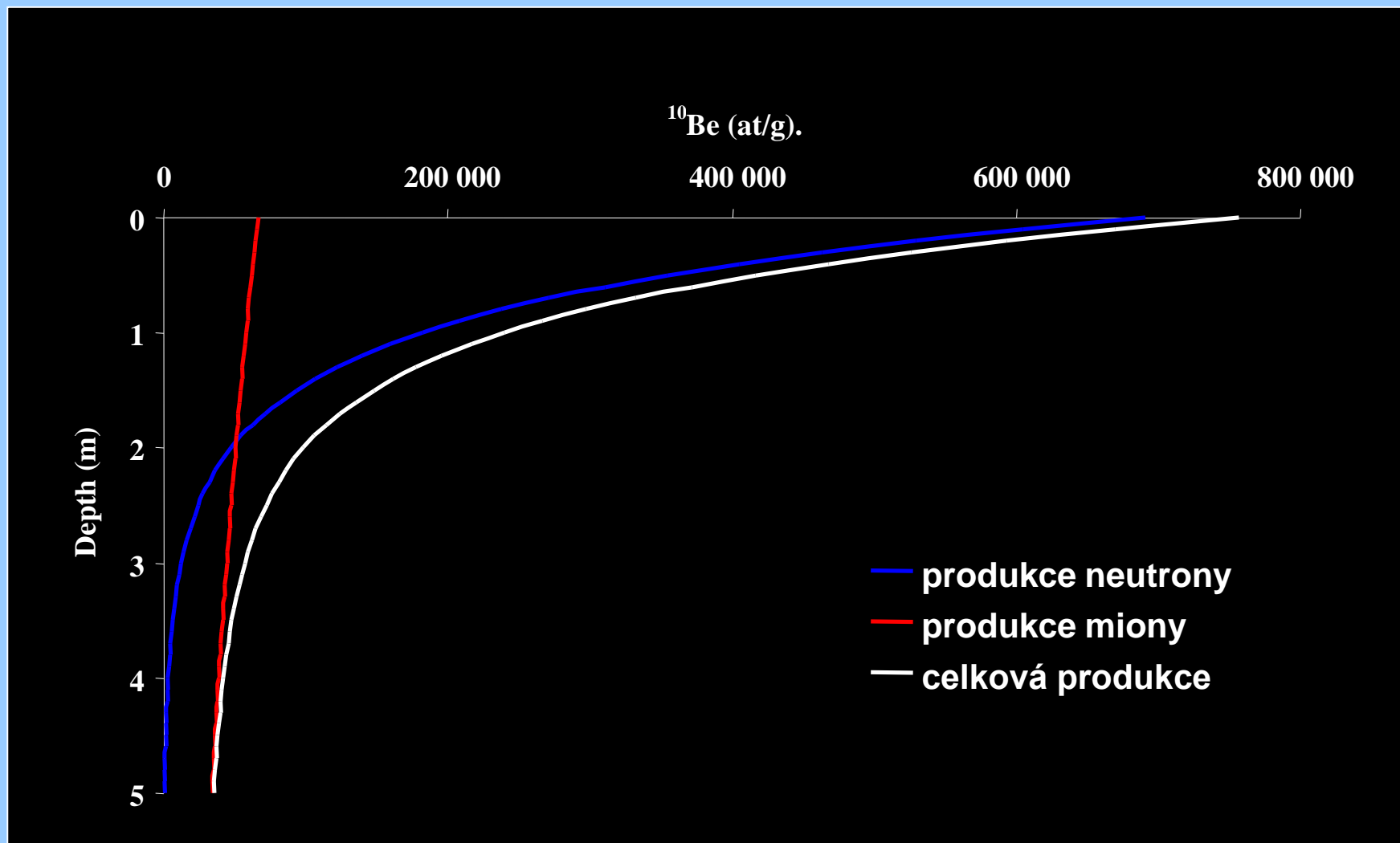


mezony

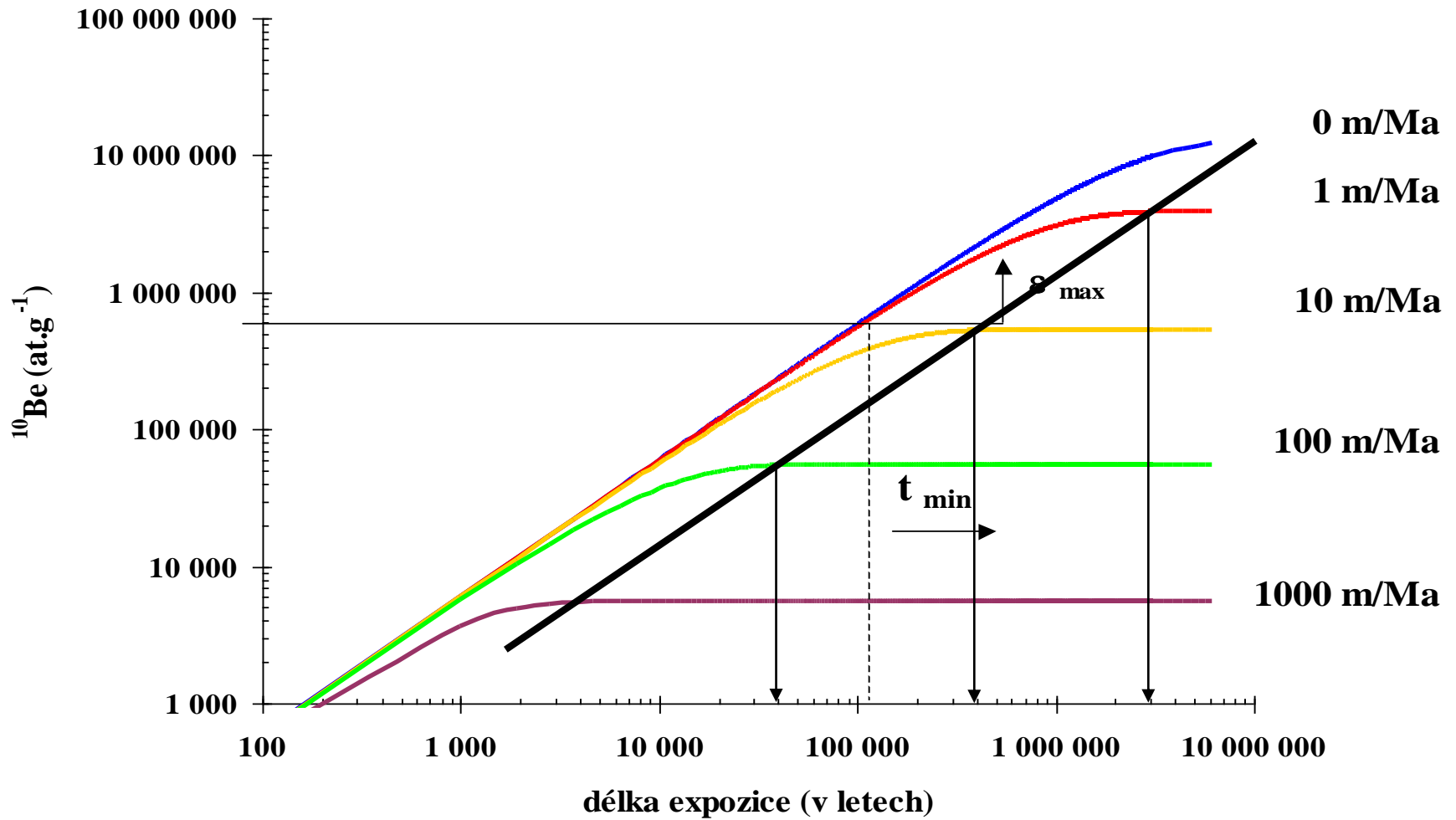


- ^{10}Be 
- ^{16}O 
- ^{28}Si 

Koncentrace ^{10}Be v závislosti na hloubce



Závislost povrchové koncentrace ^{10}Be na erozi povrchu



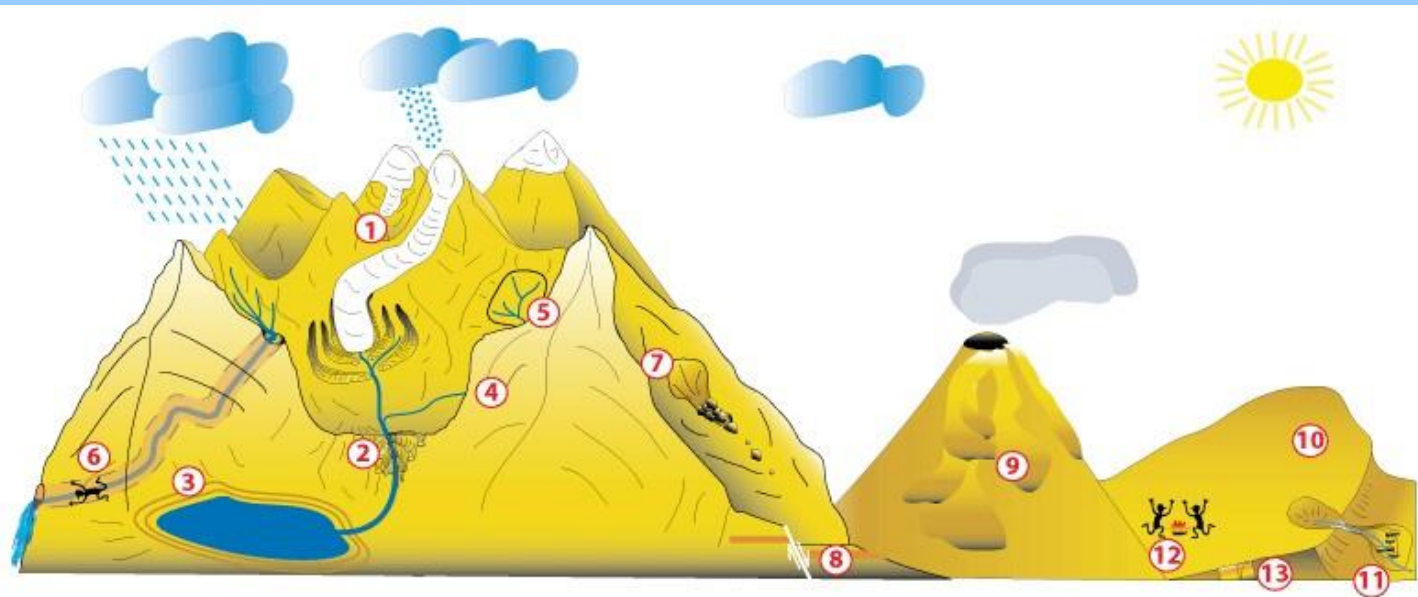
Výpočet expozičního stáří povrchu kosmogenními radionuklidy

CRONUS-Earth online calculators (<http://hess.ess.washington.edu/math/>)

CosmoCalc (An Excel Add-In for cosmogenic nuclide calculations)

(<http://sites.google.com/site/cosmocalc/>)

Aplikace kosmogenních radionuklidů

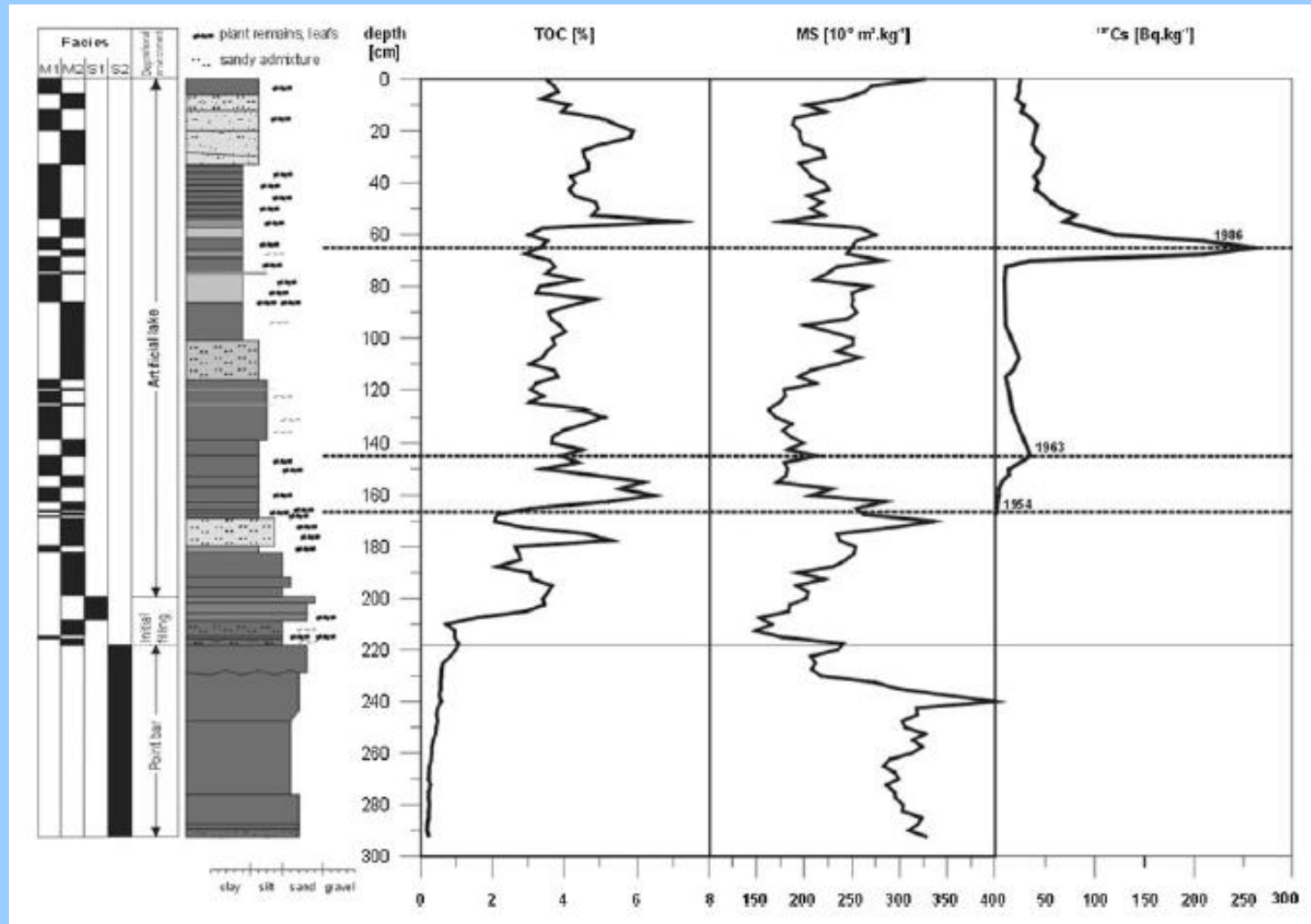


- | | | |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|
| ① glacial chronologies
(alpine, ice-sheets) | ⑤ catchment wide
denudation rates | ⑨ volcanic eruption chronologies |
| ② fluvial chronologies
(terraces, incision) | ⑥ burial chronologies
(caves, terraces, paleosols) | ⑩ desert chronologies |
| ③ shoreline chronologies
(terraces, lacustrine, marine) | ⑦ landslide chronologies | ⑪ alluvial fan chronologies |
| ④ hillslope rates | ⑧ fault scarp chronologies | ⑫ archeology |
| | | ⑬ pedogenic chronologies |

Datování pomocí izotopů s krátkým poločasem rozpadu

^{137}Cs (poločas rozpadu 30 let), vhodné pro jezerní sedimenty, rašeliny

- vzniká v důsledku termojaderných výbuchů, v prostředí se významněji objevuje kolem roku **1954**, maximum v roce **1963/1964** a pro Evropu **1986** a nejnověji pro rok **2011**.

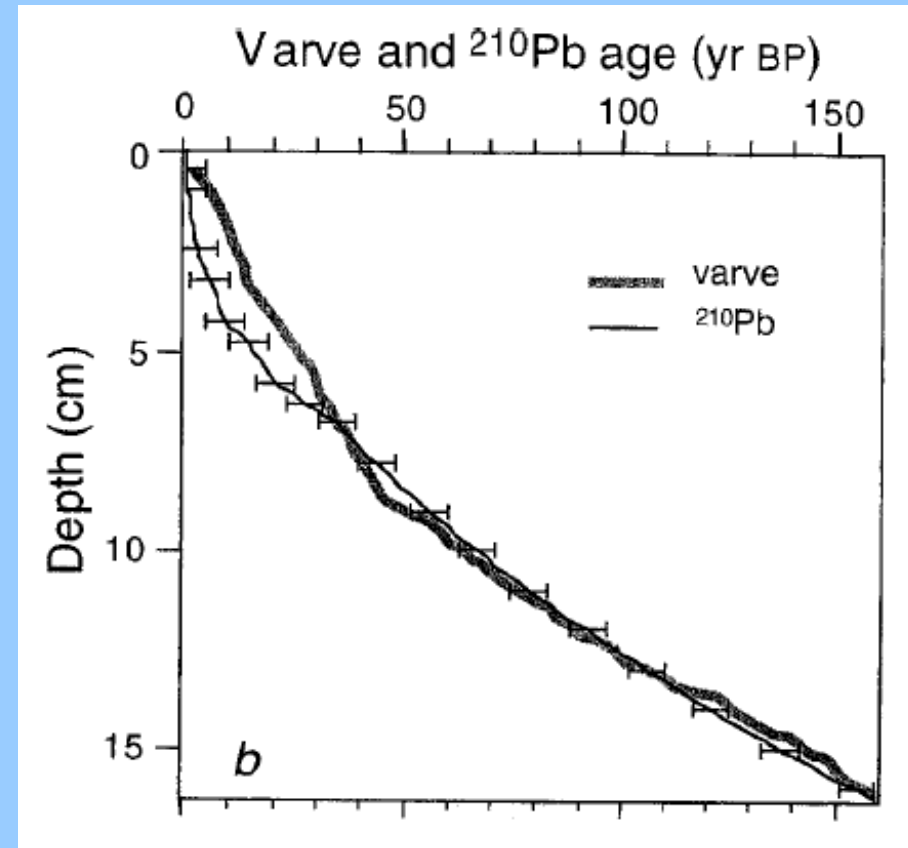


^{210}Pb (poločas rozpadu 22,26 let), vzniká rozpadem ^{222}Rn a rozpadá se na ^{206}Pb , které je již stabilní

- použitelnost pro posledních ~ 200 let, **pro jezerní sedimenty, rašeliny**
- dva modely pro výpočet stáří:

1) **konstantní počáteční koncentrace (CIC) ^{210}Pb** v rámci celého profilu, což v průběhu času vede k monotónnímu úbytku koncentrací ^{210}Pb směrem do hloubky. Bohužel změny v rychlosti sedimentace v dané pánvi obvykle neumožní konstantní počáteční koncentraci ^{210}Pb .

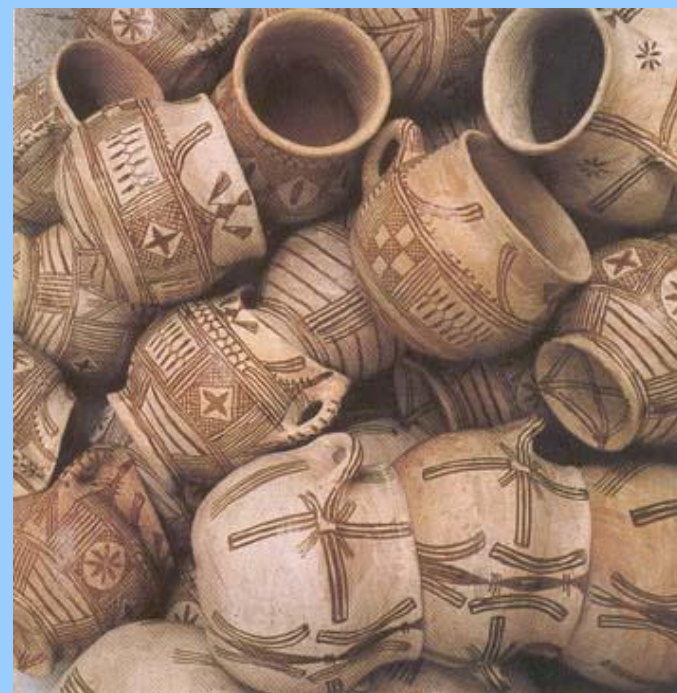
2) Proto je častěji využíván druhý model, který předpokládá **konstantní rychlost přísunu (CRS) ^{210}Pb** během posledních 150–200 let.



Luminiscenční datovací metody

Termoluminiscence (TL) – standardně měřen křemen nebo živce, ale principiálně mohou být použity i jiné minerály.

Datovatelný materiál: keramika, vypálené sedimenty, cihly, kachle, přepálené artefakty a kameny, vulkanické produkty, spraše, jezerní sedimenty a dokonce hlubokomořské sedimenty.



Laboratorní měření: separovaný křemen nebo živec je zahříván na $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vyzářené světlo je pomocí fotonásobičů převáděno na elektrické impulzy.

Intenzita TL je vynášena vůči teplotě – dostaneme **křivku záření**, v níž vrcholy odpovídají prožité termální historii jednotlivých populací elektronových pastí ve vzorku.

Přírodní TL signál je srovnáván s umělým signálem získaným tak, že část vzorku vystavujeme známým dávkám záření z kalibrovaného zdroje radioizotopů. To nám umožňuje stanovit **ekvivalentní dávku (paleodávka; D_E)**, která odpovídá množství záření, které by bylo zapotřebí k vytvoření stejného TL signálu, který daný vzorek získal během posledního vynulování.

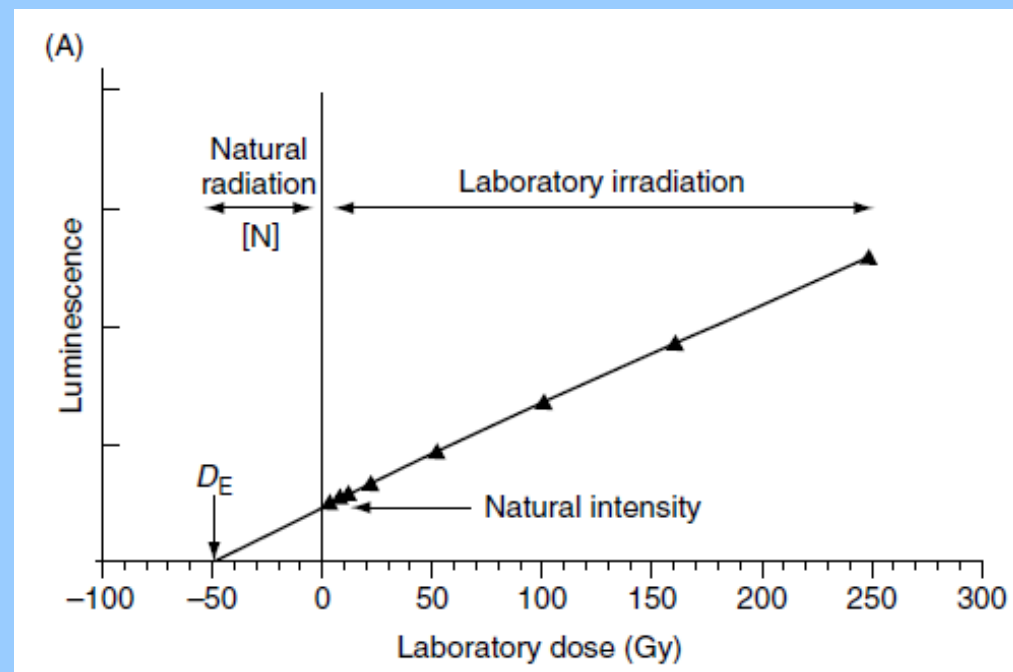
Optická luminiscence (OSL)

- obdobný přístup, jen luminiscence je indukována zeleným světlem,

- dnes pro datování sedimentů již TL skoro není používána,

- v poslední době se významně využívá **datování jednotlivých křemenných zrn**, které umožňuje zjistit, jestli všechna zrna v daném

vzorku mají stejná zdánlivá stáří. Tato zdánlivá stáří mohou být různá, protože např. některá z nich nebyla vůbec vystavena slunečnímu záření po dostatečně dlouhou dobu, aby byl vynulován jejich luminiscenční signál a nebo protože sediment obsahuje různě starý materiál.



Infračervená luminiscence (IRSL)

- pouze pro živce

- IR záření generuje mnohem silnější luminiscenční signál, což je speciálně pro živce důležité, protože živce se obecně výrazně hůře nulují, než křemen

Elektronová spinová rezonance (ESR)

Podobný princip jako u luminiscenčních metod (také je třeba stanovit **ekvivalentní a roční dávku**). Ale tato **metoda je nedestruktivní** a nedochází při měření k uvolnění elektronů zachycených v krystalové mřížce. Je stanovováno jejich množství na základě jejich paramagnetických vlastností. Vzorek je měřen **v silném magnetickém poli** a vystaven **vysokofrekvenční elektromagnetické radiaci**. Magnetické pole se pomalu mění a **při určité frekvenci** se začnou **elektrony excitovat a rezonují**.

Rezonance je měřena ESR spektrometrem, kde počet rezonujících elektronů, který udává stáří vzorku, měříme absorpcí elektromagnetické energie.

Datovatelný materiál: speleotémy, zubní sklovina, koráli, měkkýši, přepálené artefakty, vulkanity

Dosah metody: od pár tisíců let až teoreticky do 2 miliónů let. Ale přesnost metody je poměrně nízká, chyba bývá obvykle >10 %.

Štěpné stopy v minerálech a datování termálních událostí

Je založena na **rozpadu jader atomů ^{238}U** (poločas rozpadu $\sim 10^{16}$ let), štěpení je spojeno se vznikem neutronů a štěpných produktů. Tyto štěpné úlomky získávají značnou energii a při průchodu nabitě částice hmotou (krystalem minerálu) způsobují štěpné produkty trvalé poškození – tzv. **latentní štěpnou stopu**. Pro určení stáří vzorku je nutné stanovit objemovou hustotu spontánních latentních štěpných stop ^{238}U , která je funkcí obsahu uranu a stáří. Štěpné stopy mohou být zviditelněny a studovány pod mikroskopem.

Nejčastější metodou ke zjištění koncentrace uranu je **objemová hustota indukovaných štěpných stop ^{235}U** , které lze získat při bombardování jader tohoto izotopu pomalými (termálními) neutrony v jaderném reaktoru. Stáří jednotlivých zrn je vypočteno z poměru spontánního a indukovaného počtu štěpných stop a neutronového toku. Metoda spontánního štěpení ^{238}U je nejčastěji kalibrována pro studium časově-teplotního záznamu vývoje hornin pro zirkony a apatity v rozmezí $\sim 60\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro apatity a $210\text{--}310\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro zirkony.

aplikace

- stanovení časově-teplotního modelu výzdvihu/subsidence sediment. pánví
- stanovení provenience detritického materiálu

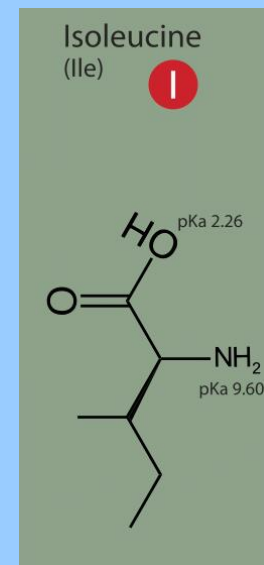
Racemizace aminokyselin

Datovací technika využívající **změn aminokyselin od jejich vzniku**. Všechny aminokyseliny kromě glycinu (nepolární) jsou díky přítomnosti chirálního uhlíku opticky aktivní (stáčivé) a mají schopnost stáčet rovinu polarizovaného světla vlevo (L-) nebo vpravo (D-) a tvoří zrcadlově odlišné páry. Až na výjimky tvoří **živé organismy levotočivé aminokyseliny**. **Po smrti** daného **organismu** se **aminokyseliny** postupně mění na **pravotočivé**, čemuž se říká racemizace. Stanovení **poměru L- a D- aminokyselin** lze proto určit ke stanovení **doby**, která proběhla **od smrti** daného **organismu**.

Rychlost přeměny je ovlivněná především *teplotou*, *vlhkostí* a *kyselostí substrátu*, což ovlivňuje jak časový dosah metody, tak i její přesnost. V běžných podmínkách je dosah až 2 Ma a chyba ~20 %, při záporných teplotách se časový dosah může prodloužit až na 10 Ma.

Nejčastěji se používá **L-iso-leucin**, kapalinovou chromatografií lze sériově stanovovat větší množství aminokyselin, které lze použít pro různá časová rozpětí.

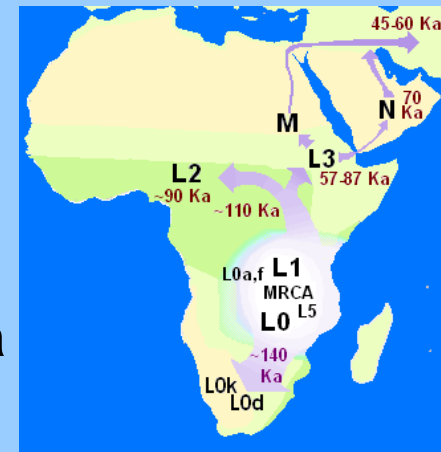
Nejvhodnějším datovatelným materiálem jsou kosti a ulity.



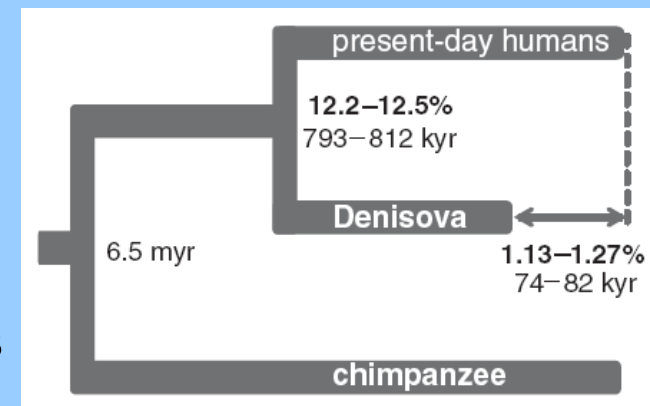
Molekulární (DNA) hodiny

Metoda založená na předpokladu, že míra mutací v mtDNA je za určitý čas konstantní. Díky tomu je možné stanovit **evoluční vzdálenost** mezi dvěma druhy. Mutace mtDNA se projeví odlišnou stavbou aminokyselin. Nejedná se o absolutní datování, lze tak jen kvantifikovat rozdílné časové úseky evoluční vzdálenosti mezi dvěma druhy. Kalibraci pomocí nezávislých chronologických metod je pak nutné odvodit vlastní stáří.

Mitochondriální Eva – tak označujeme ženu, která je v mateřské linii **společným předkem** všech **dnes žijících lidí**. Její MtDNA se postupným děděním rozšířila na veškerou lidskou populaci na světě. Žila zhruba před 200 ka někde ve východní Africe. Nejstarší nalezený Homo sapiens je ~315 ka starý (nálezy z roku 2017 z Maroka).



Homo denisoviensis (Hominin X) – mtDNA z prstního článku z vrstvy staré 48–30 ka v Denisově jeskyni (Altaj) ukázala, že se nejedná o neandrtálce, ani o moderního člověka. Od linie vedoucí k modernímu člověku se podle mtDNA **Homo denisoviensis** oddělil před ~800 ka a je tak pro nás vzdálenější, než neandrtálec, jenž se o od předchůdců moderního člověka oddělil před ~470 ka.



K dalšímu čtení a studiu:

Aitken M.J. (1998): *An Introduction to Optical Dating*. Oxford University Press.

Bradley R.S. (1999): *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*. Second Edition. International Geophysics Series, 64, Academic Press.

Dickin A.P. (2005): *Radiogenic Isotope Geology*. 2nd ed. Cambridge University Press.

Dunai T.J. (2010): *Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge University Press.

Gornitz V., Ed. (2009): *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer.

Gosse J.C., Phillips F.M. (2001): Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: Theory and application. *Quaternary Science Reviews* 20, 1475–1560.

Nývtová Fišáková M. (2012): Radiouhlíkové datování. *Přehled výzkumů* 53, 89–99.

Walker M.J.C. (2005): *Quaternary Dating Methods*. Wiley & Sons.

That's all for this term, folks...