

Metody Fyzické geografie I (jarní semestr 2021)

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

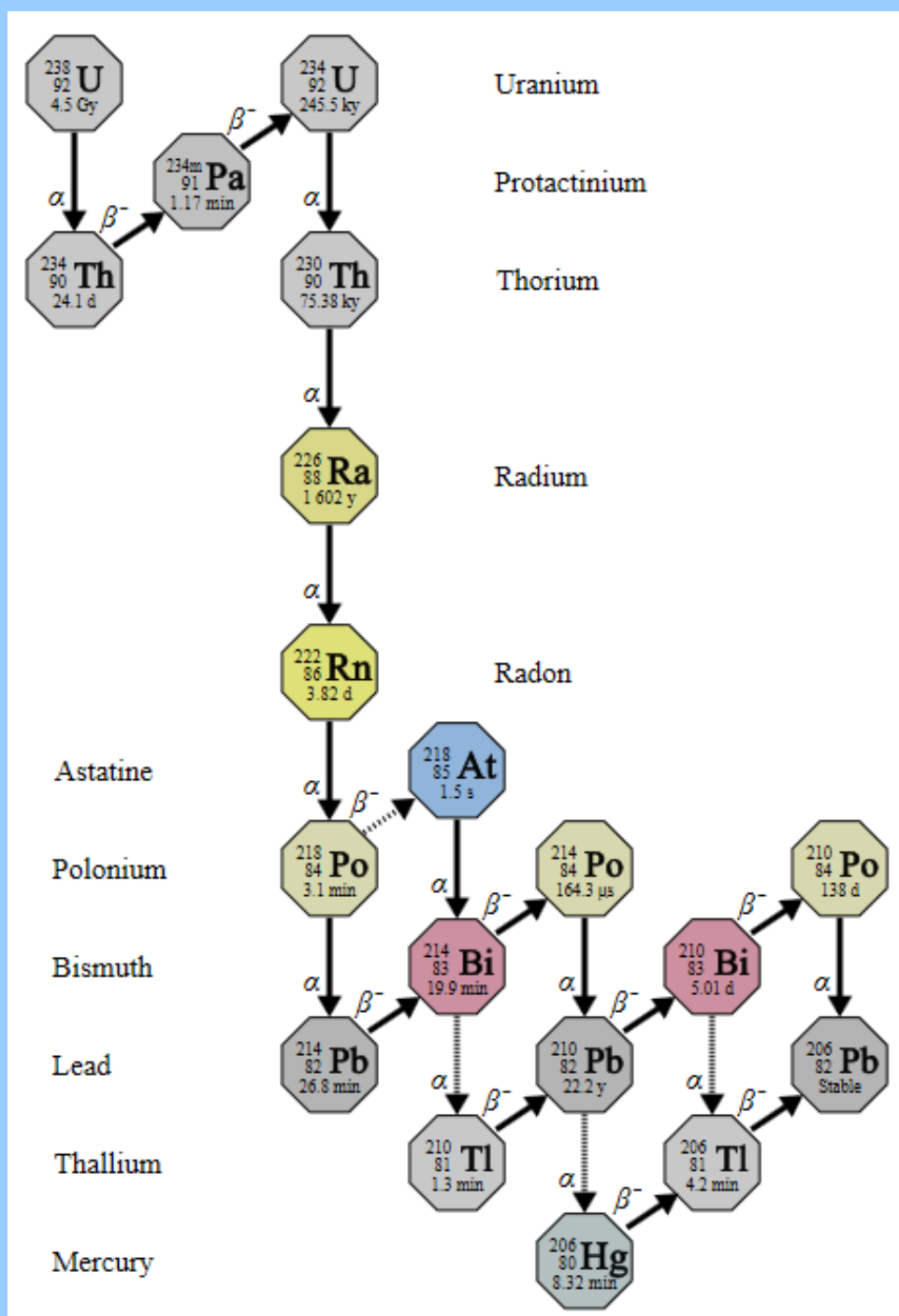
Produkty rozpadové řady ^{238}U

- **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%.

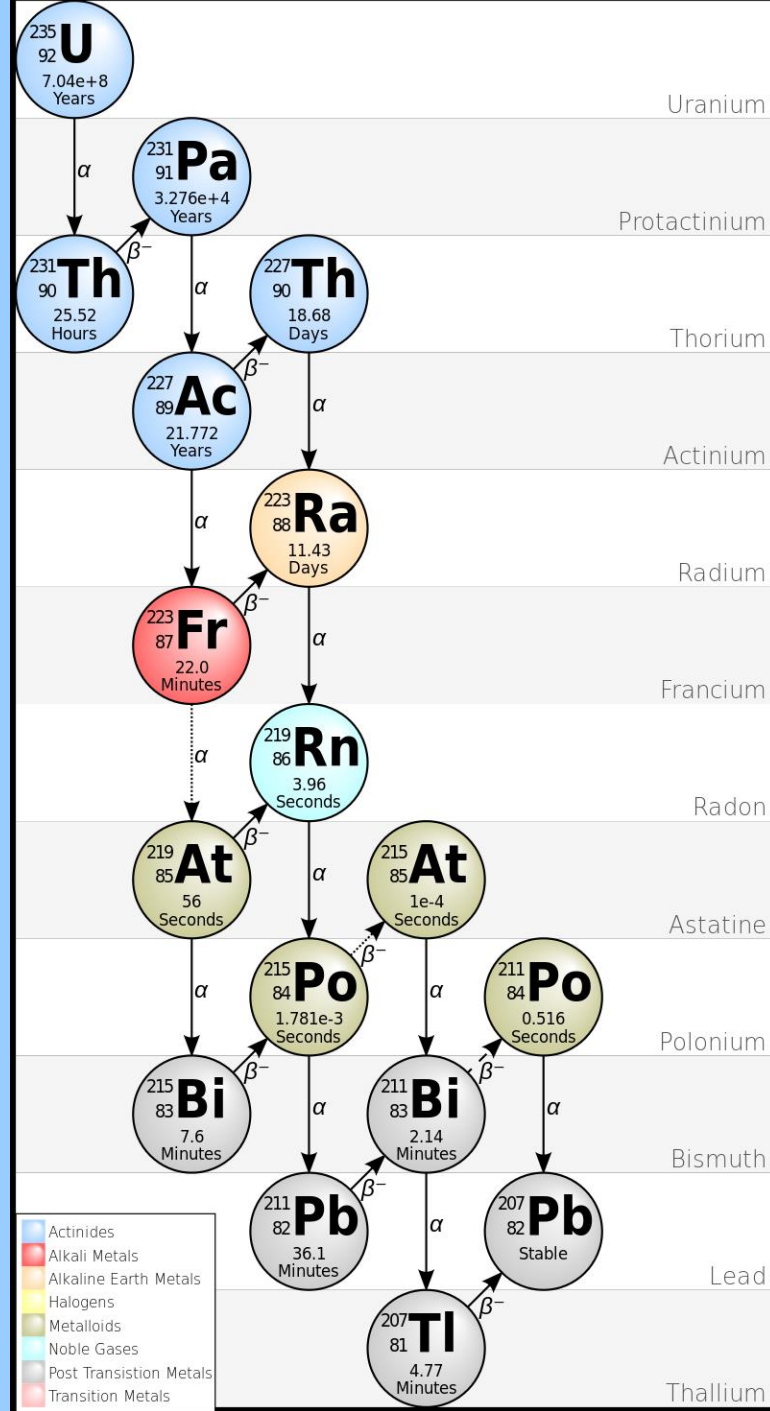


- **uran-thoriová metoda** je založená na **stanovení stáří** na základě stupně ustavené rovnováhy mezi rozpadem dceřiného izotopu ^{230}Th a mateřského izotopu ^{234}U ,
- protože je poločas rozpadu dceřiného izotopu kratší, než je poločas rozpadu izotopu mateřského, odpovídá v případě **dlouhodobé 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).

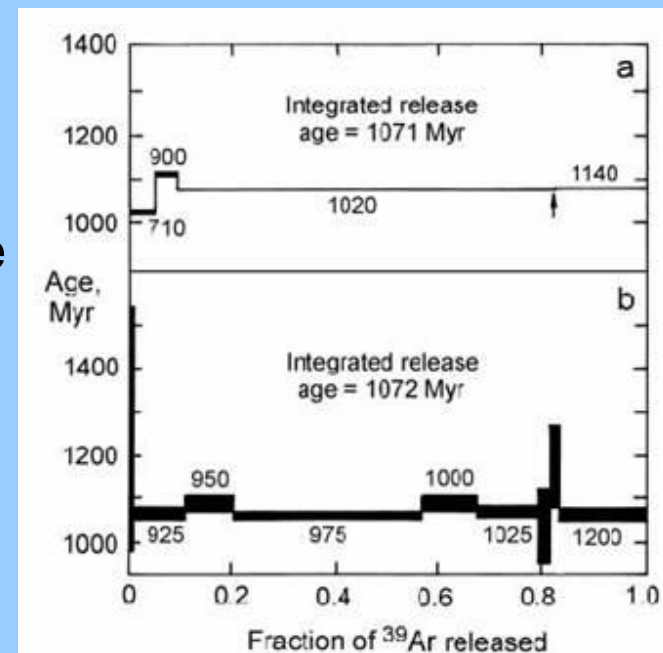
$$\left[\frac{\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_P - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_I}{\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_P - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_I} \right] = \left(\frac{1}{137.88} \right) \left(\frac{e^{\lambda_{235}t}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

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).

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

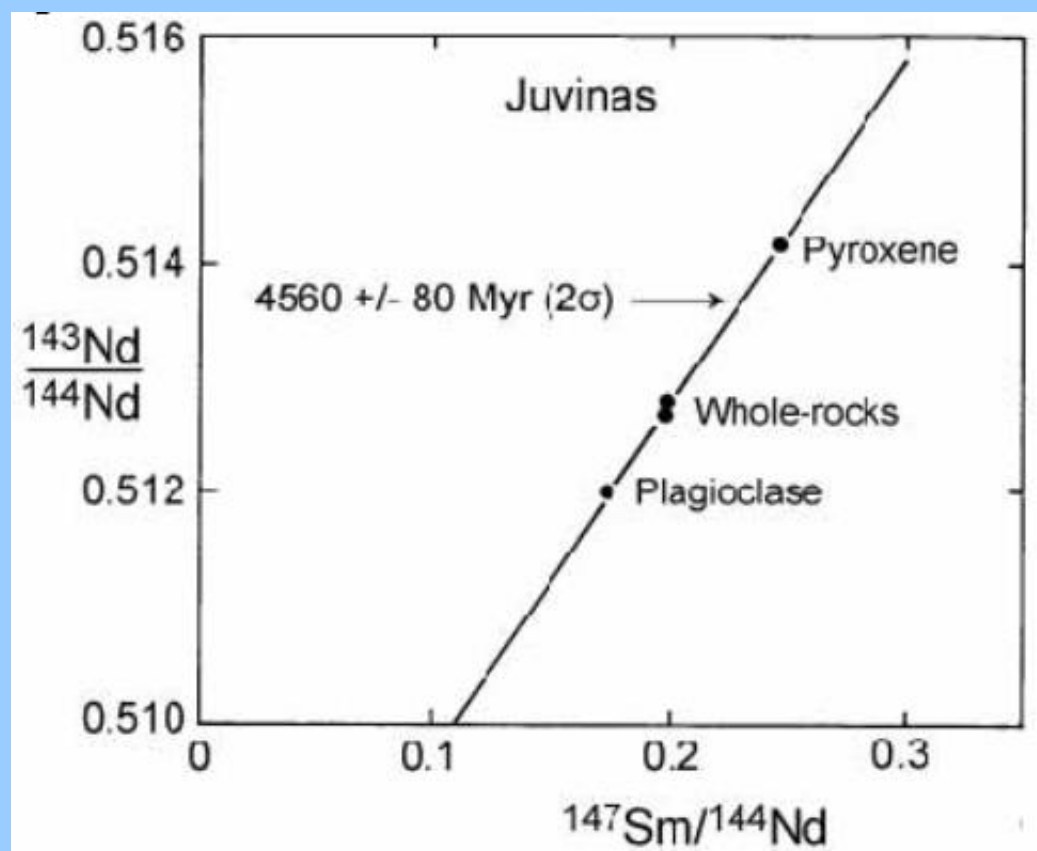
Terigenní radionuklidy

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 nabojuje v silikátových minerálech s narůstajícím časem krystalizace, samarium je nabožováno 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

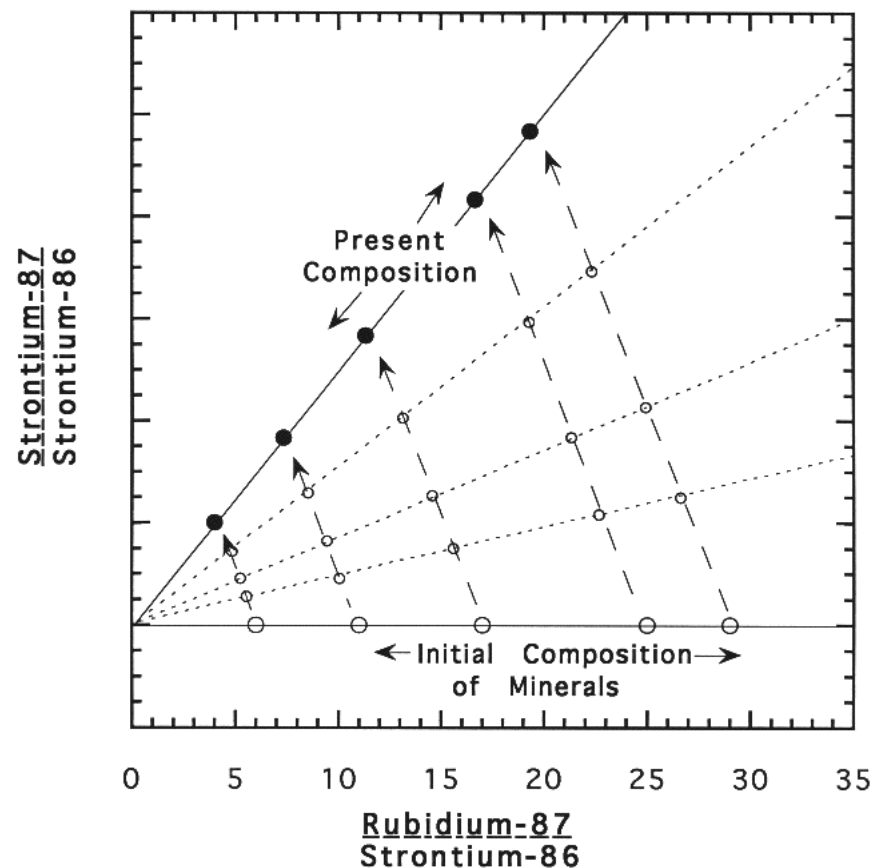
- datovací **metoda rubidium-stroncium** je založená na beta rozpadu ^{87}Rb na ^{87}Sr s poločasem rozpadu 48,8 Ga,

- 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 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$.

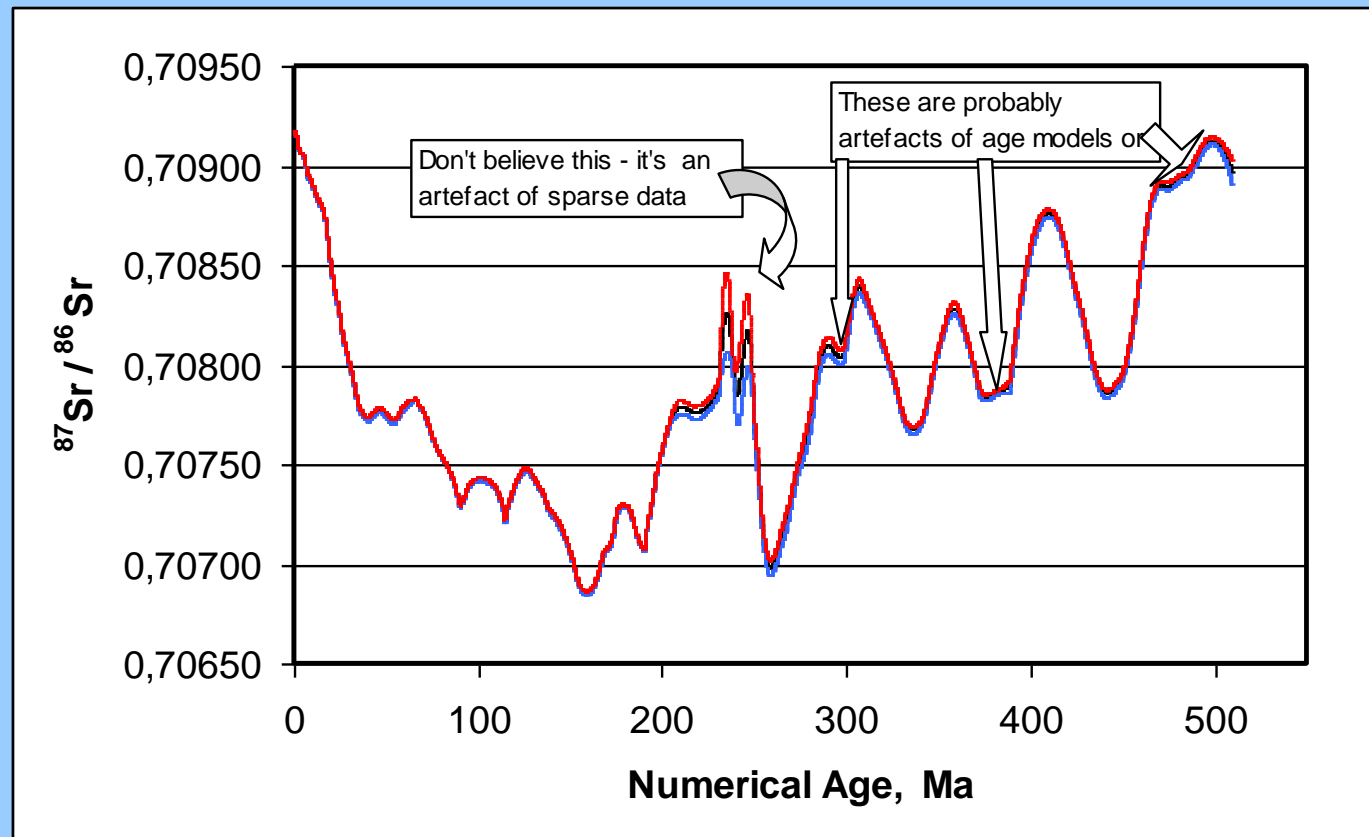
The Rubidium-Strontium System



Stronciové datování mořských organismů a sedimentů

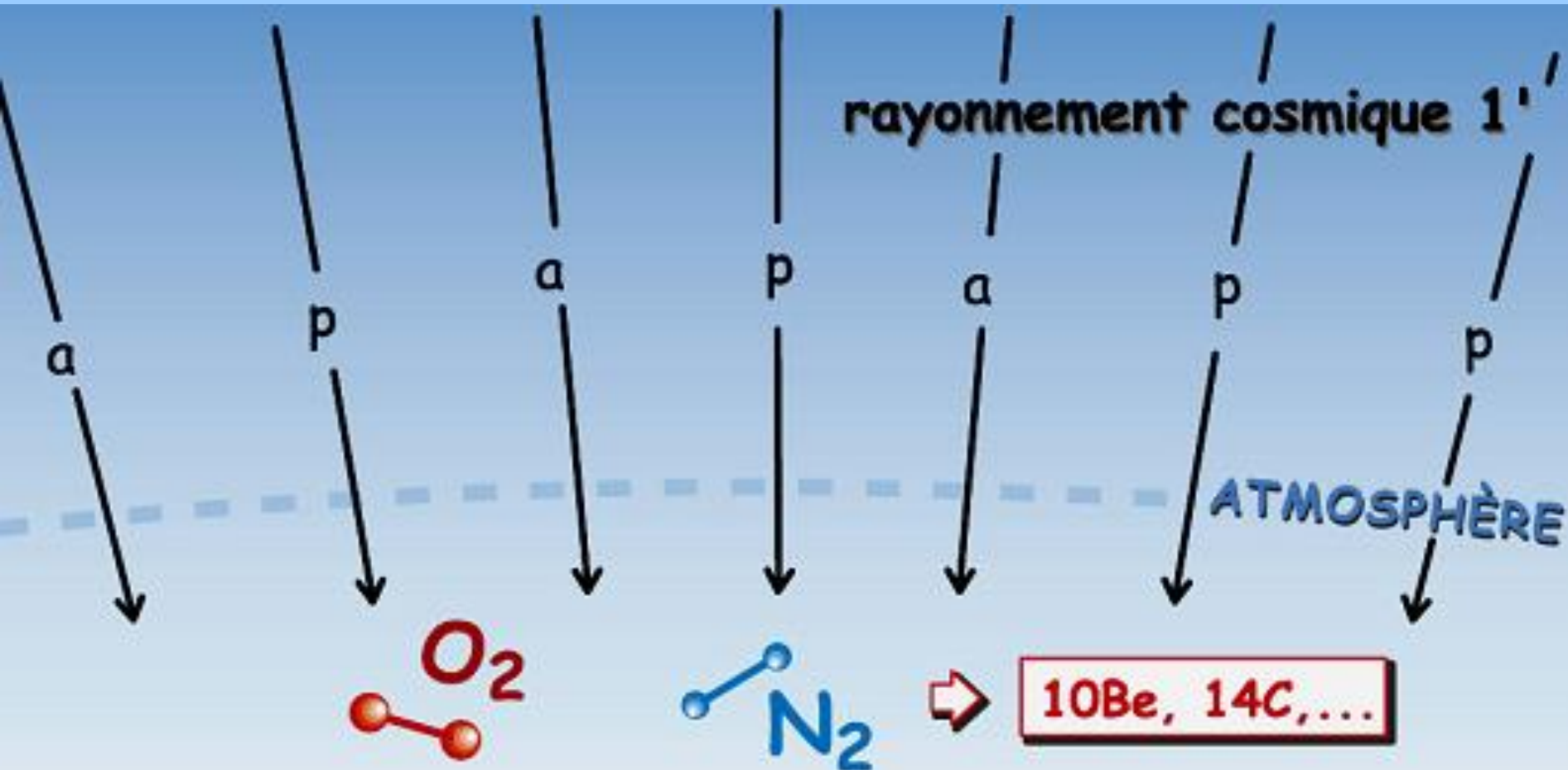
Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v biogenně a chemogenně vzniklých mořských organismech a sedimentech se během fanerozoika mění. Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v mořské vodě je závislý na poměrech $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v horninách, které jsou do moří erodovány a kterými sladká voda 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 schránek mořských měkkýšů.

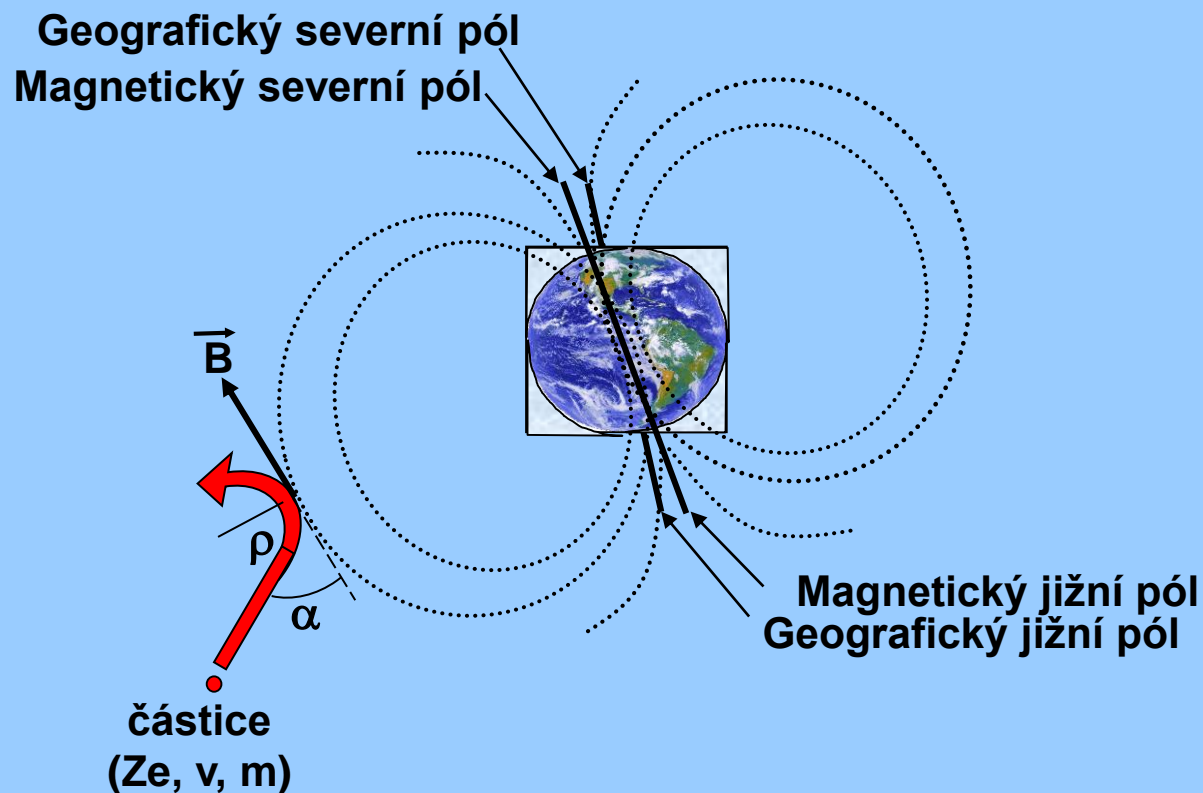


Kosmogenní radionuklidy – radiogenní izotopy vznikající štěpením atomových jader vlivem **vysokoenergetického kosmického záření**.

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.

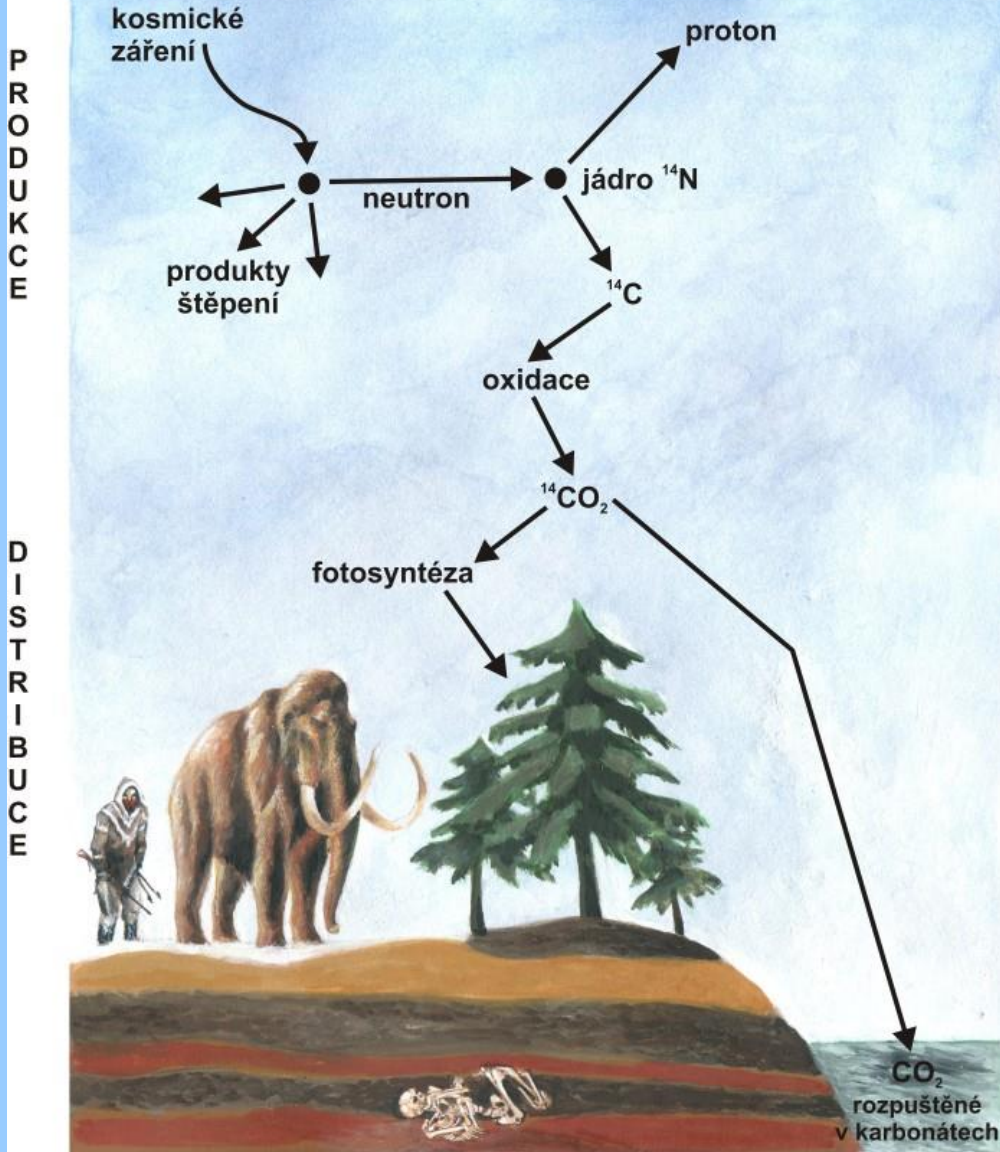


$$B \cdot \rho \cdot c = (m \cdot v \cdot c) / Ze \cdot \sin \alpha$$

Radiouhlík – ¹⁴C

Uhlík má **dva stabilní** (¹²C – 98,9 % a ¹³C – 1,1 %) a **jeden radiogenní** (¹⁴C) izotop rozpadající se na ¹⁴N 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 (N₂).

V troposféře je v důsledku proudění „téměř“ homogenně rozšířen a reaguje s kyslíkem za vzniku ¹⁴CO₂. 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: $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \approx 10^{-12}$

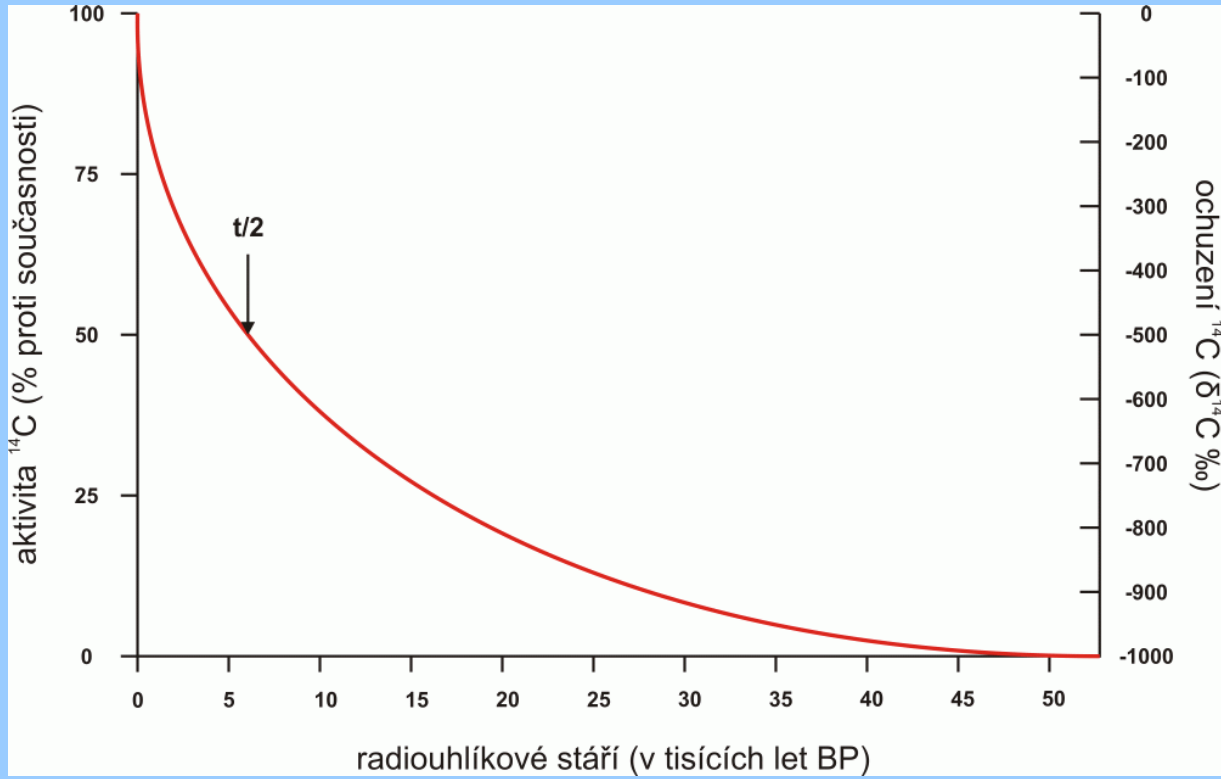
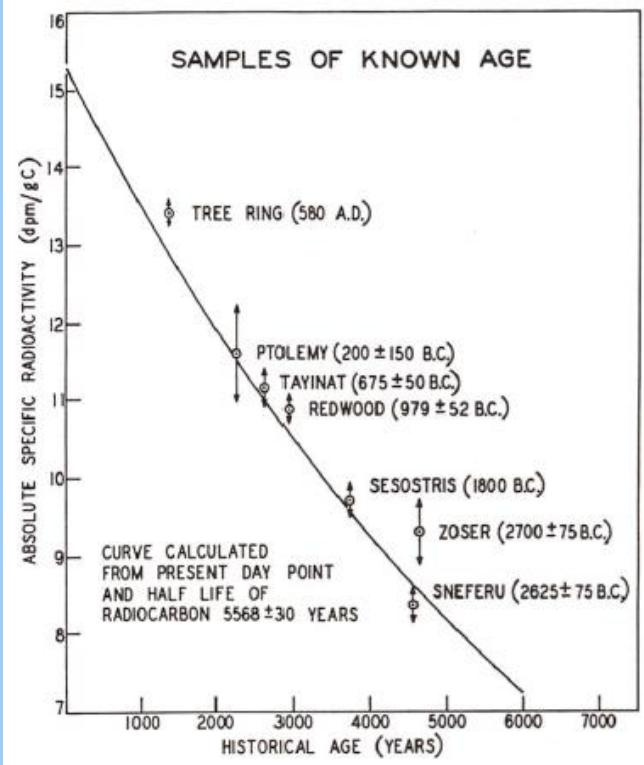
rozpad: $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu^-$

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)

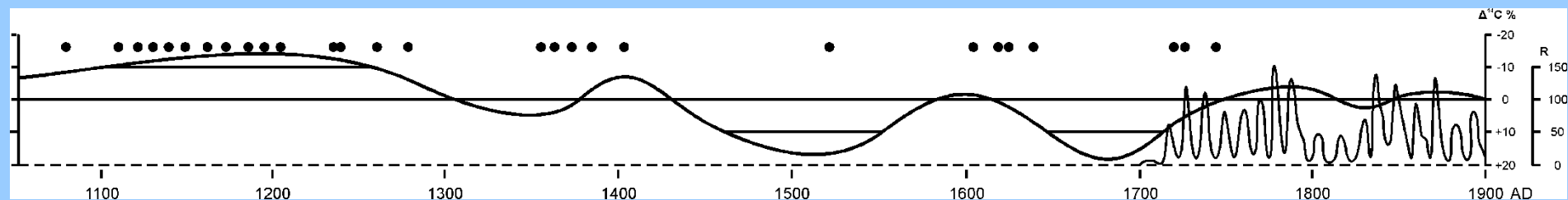
Radiouhlíkové datování

- 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).

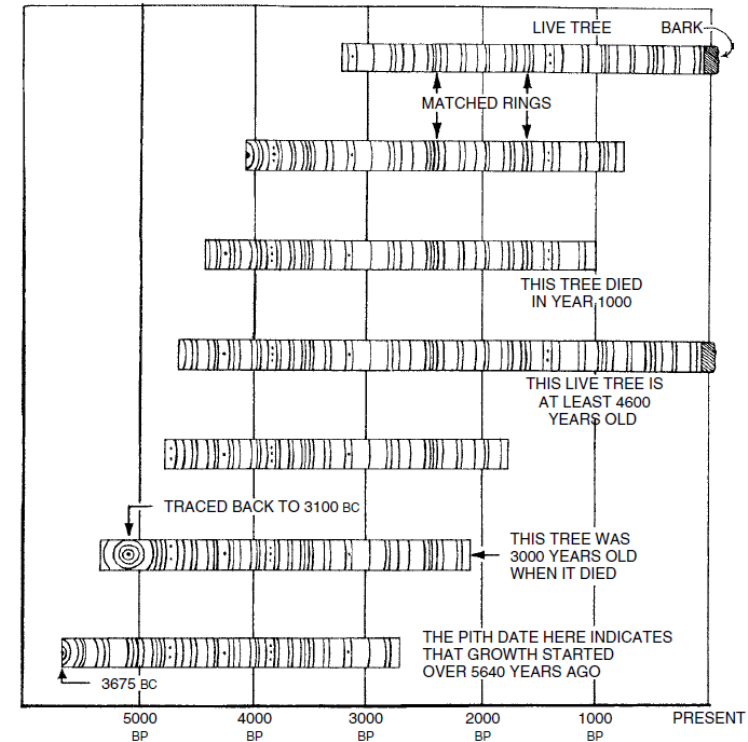
Od průmyslové revoluce významný **vliv člověka** na frakcionaci uhlíku v atmosféře (**spalování fosilních paliv** ředí radiogenní uhlík v atmosféře dodáváním izotopicky lehčí směsi uhlíku bez ^{14}C – tzv. **Suessův efekt**; naopak **termonukleární výbuchy** zvyšují podíl radiogenního uhlíku v atmosféře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

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, ¹⁰Be, ²¹Ne, ²⁶Al, ³⁶Cl, ⁴¹Ca).

In situ produkce kosmonuklidů:

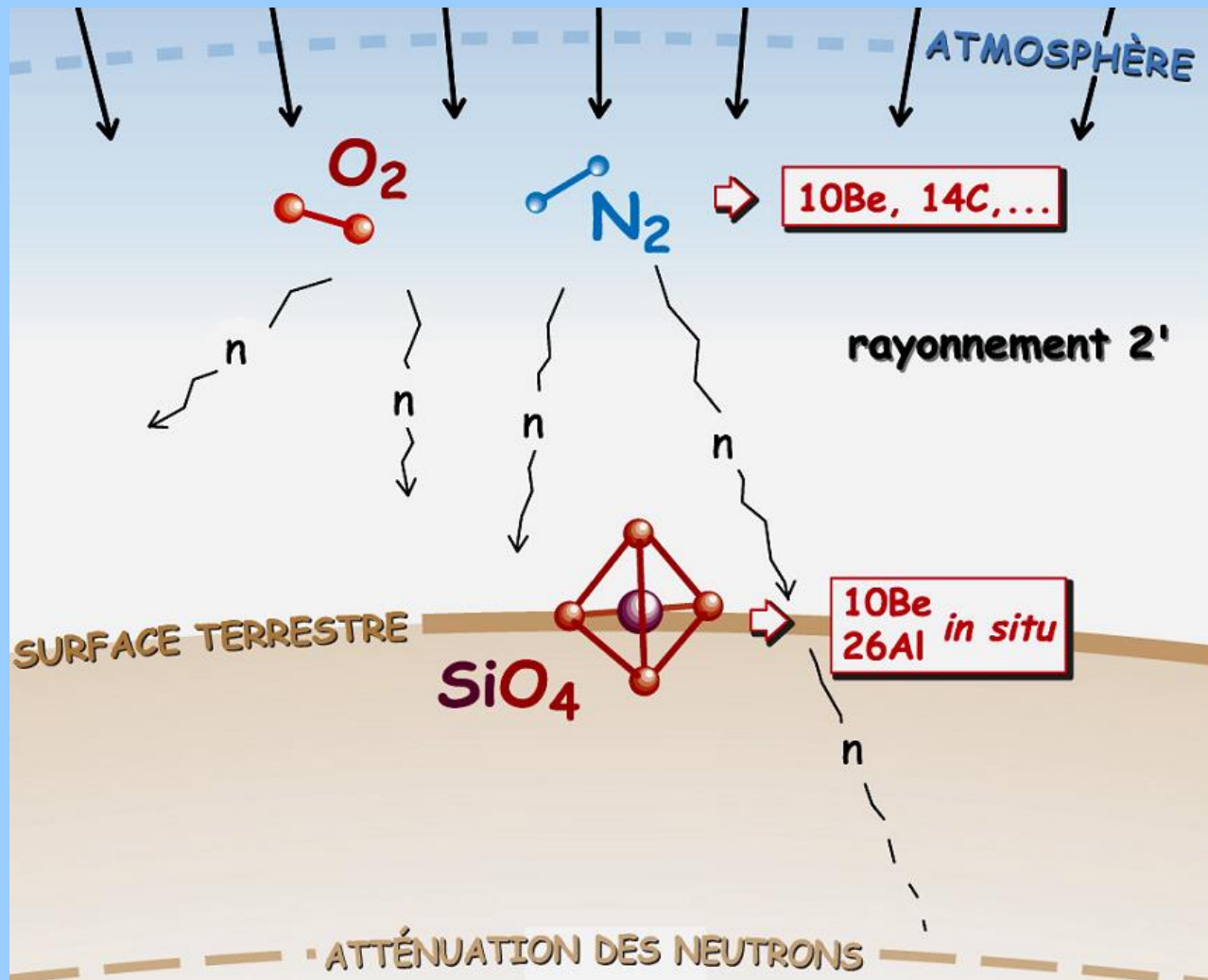
³He: 75–100 at•g⁻¹•a⁻¹

¹⁰Be: 4–7 at•g⁻¹•a⁻¹

²¹Ne: 18–21 at•g⁻¹•a⁻¹

²⁶Al: 30–36 at•g⁻¹•a⁻¹

³⁶Cl: 8–10 at•g⁻¹•a⁻¹



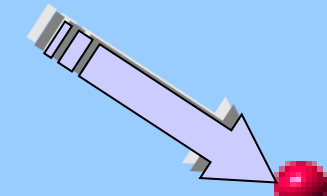
rayonnement 2'

Produkce ^{10}Be v krystalové mřížce křemene

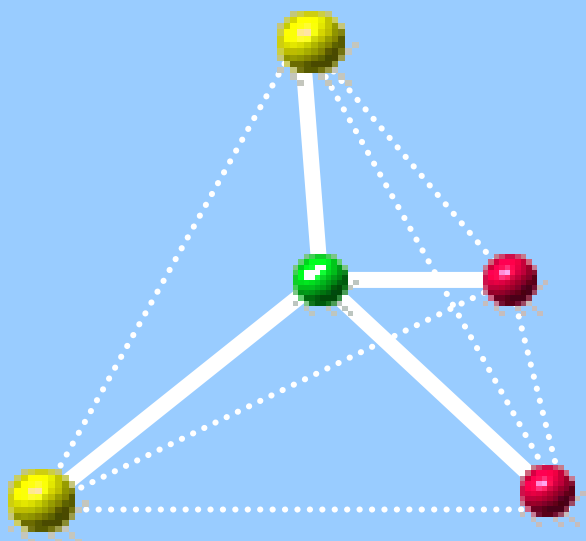
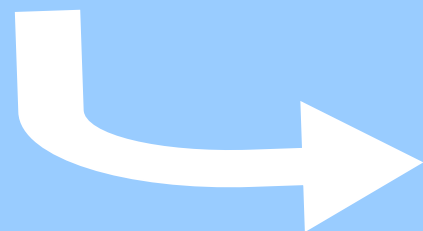
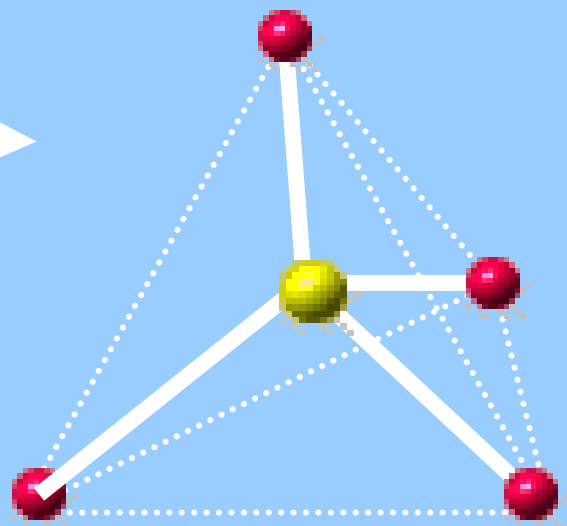
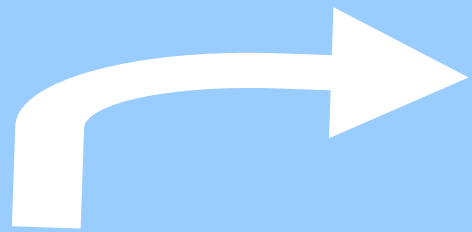
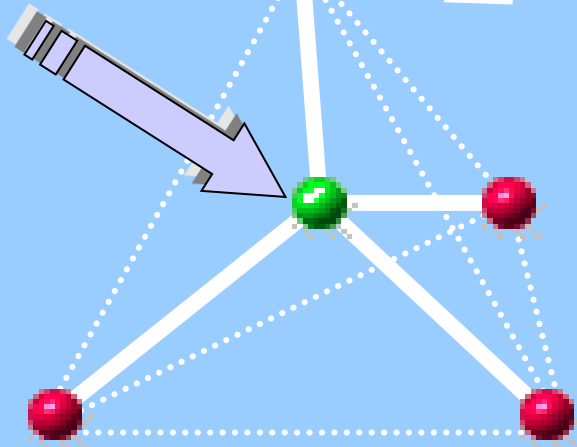
^{10}Be atm $T_{1/2} = 1.387 \pm 0.012$ Ma

sekundární radiace (>10 MeV)

energetické nukleony

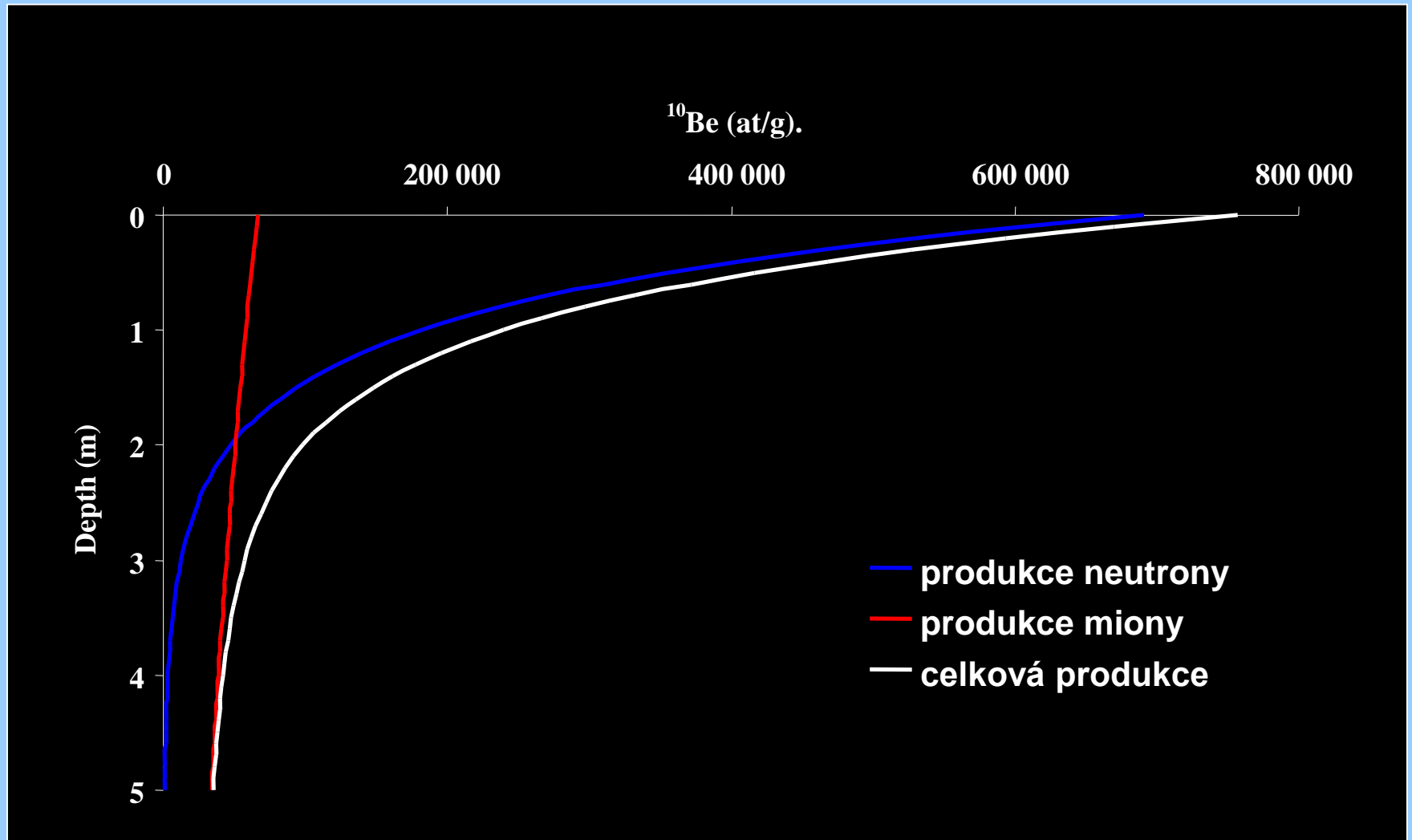


mezony

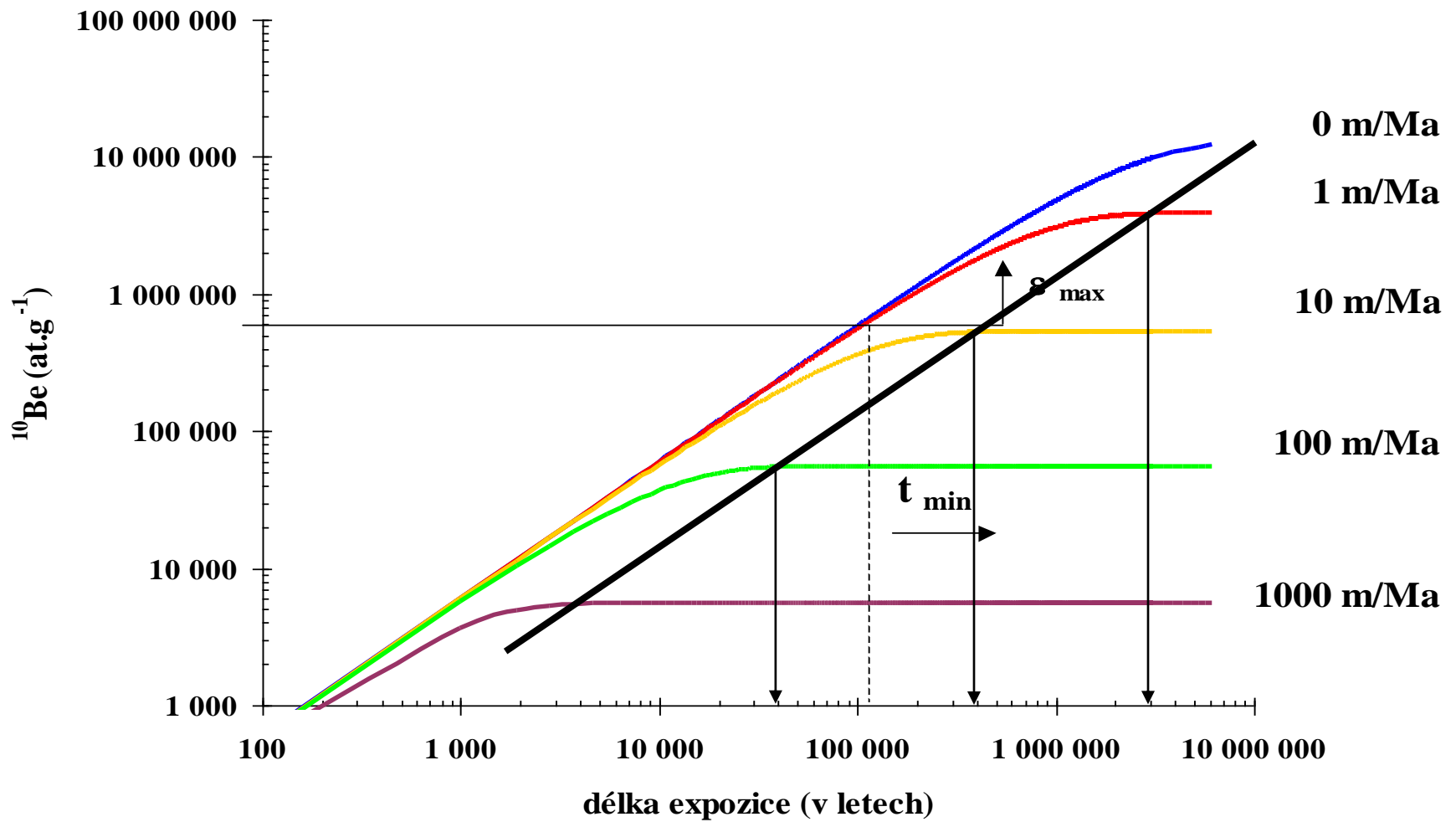


- ^{10}Be 
- ^{16}O 
- ^{28}Si 

Koncentrace ^{10}Be v závislosti na hloubce



Závislost povrchové koncentrace ^{10}Be na erozi povrchu



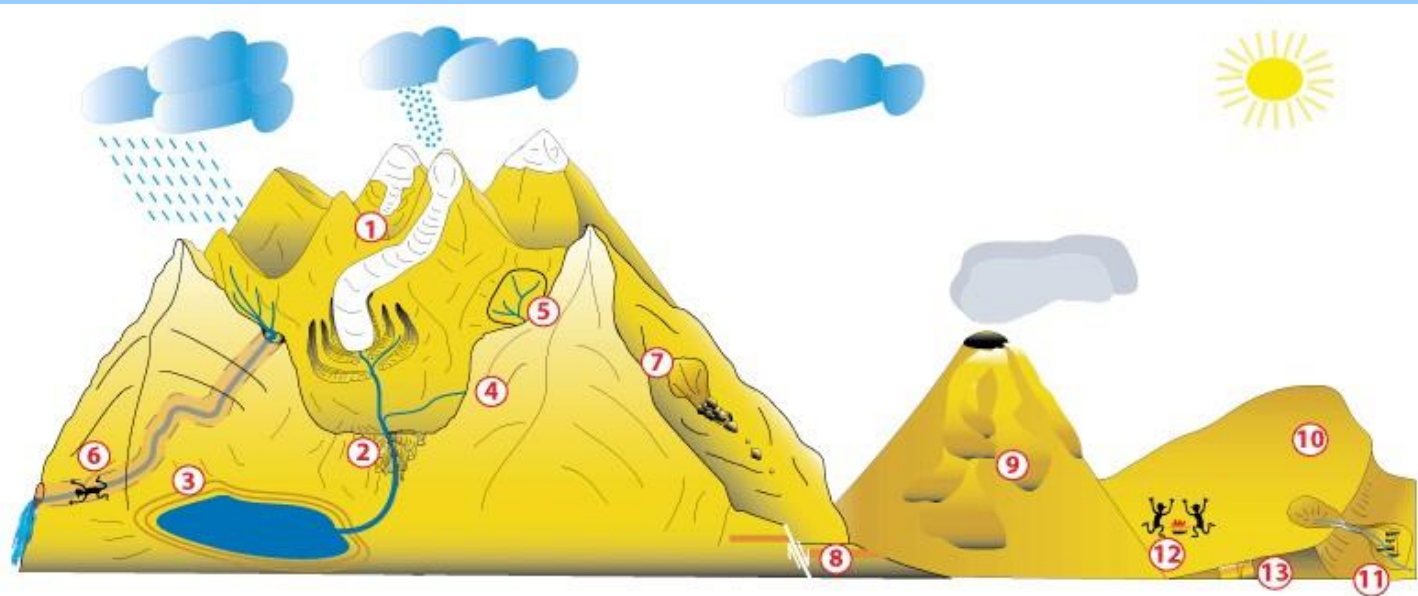
Výpočet expozičního stáří povrchu kosmogenními radionuklidy

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

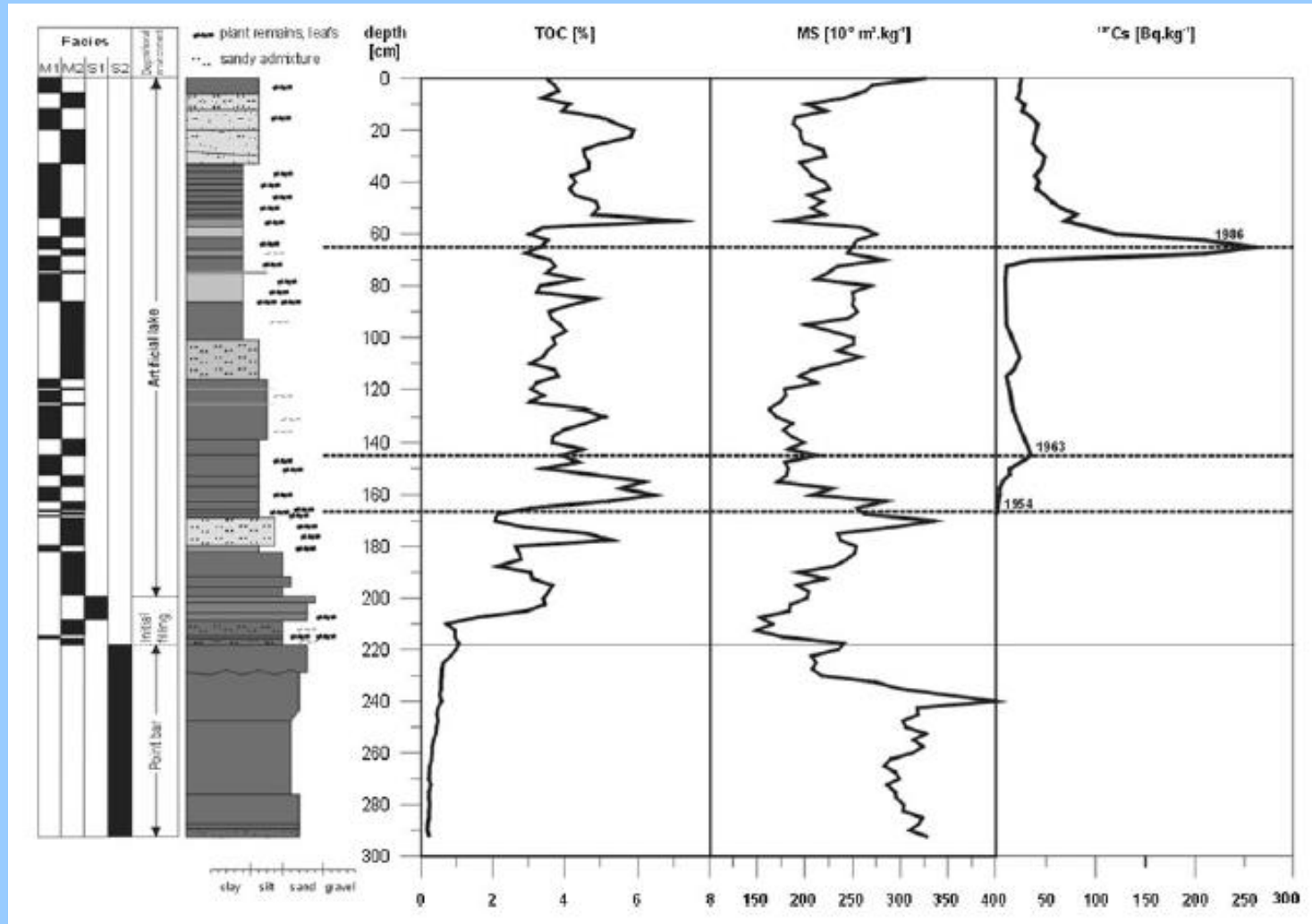


- | | | |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|
| ① glacial chronologies
(alpine, ice-sheets) | ⑤ catchment wide
denudation rates | ⑨ volcanic eruption chronologies |
| ② fluvial chronologies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

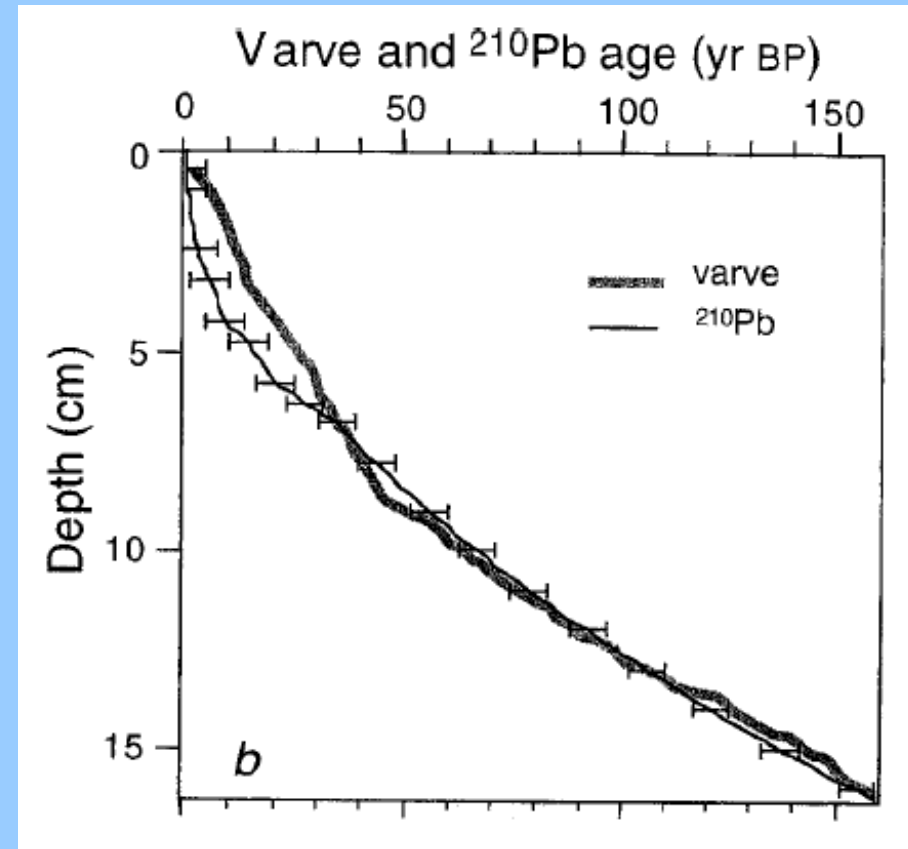


^{210}Pb (poločas rozpadu 22,26 let), vzniká rozpadem ^{222}Rn a rozpadá se na ^{206}Pb , které je již stabilní

- 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 .

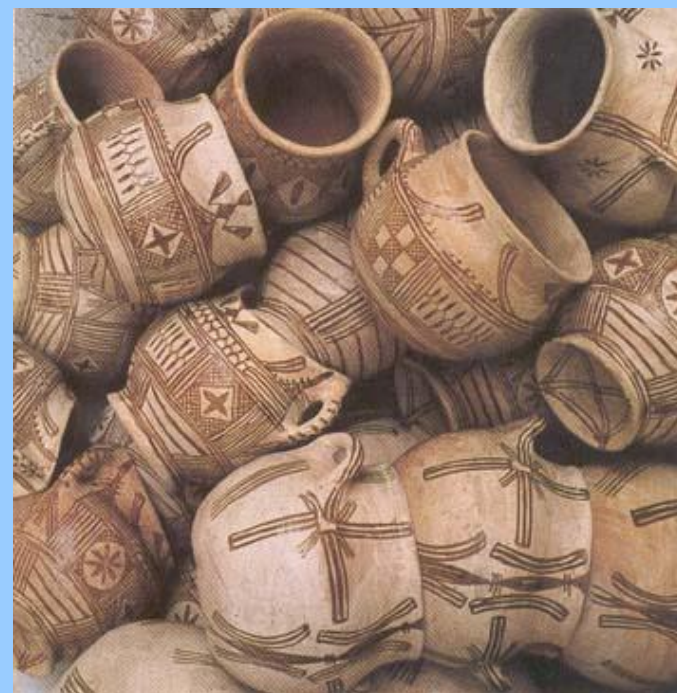
2) Proto je častěji využíván druhý model, který předpokládá **konstantní rychlost přísunu (CRS) ^{210}Pb** během posledních 150–200 let.



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.

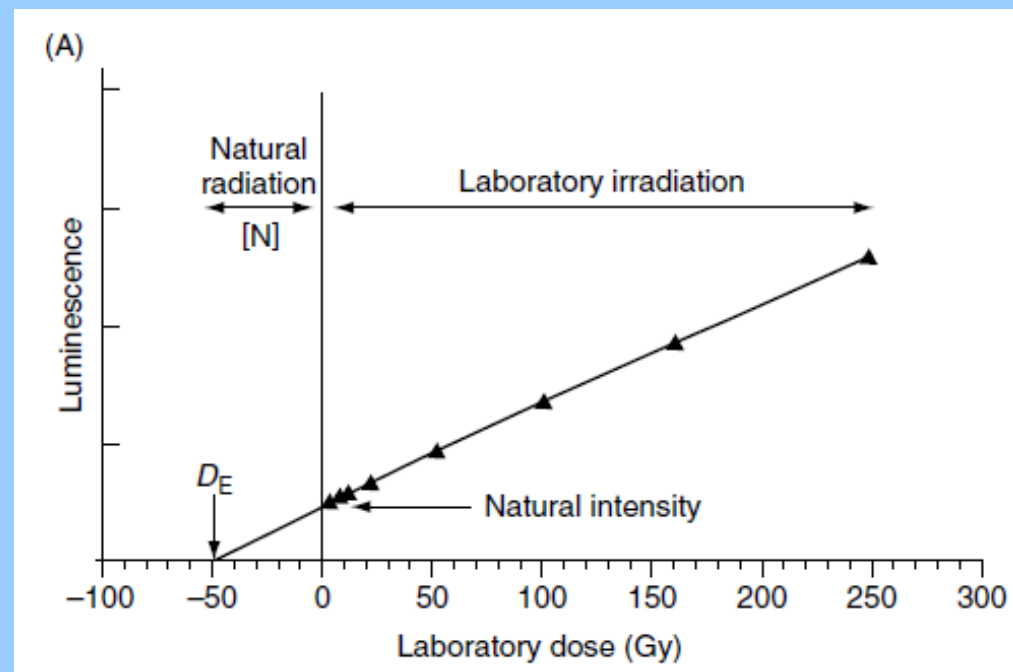
Optická luminiscence (OSL)

- 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

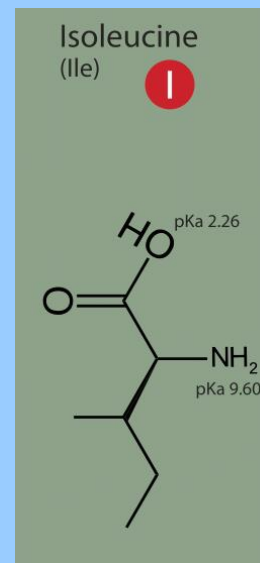
Racemizace aminokyselin

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.

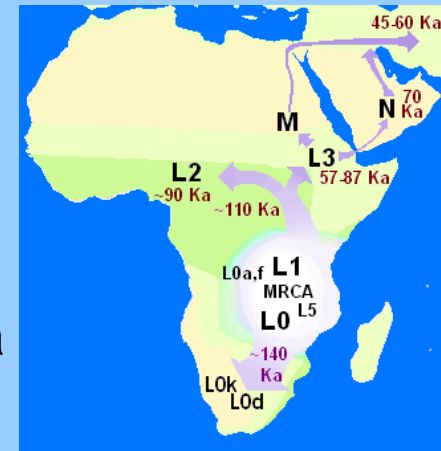
Nejvhodnějším datovatelným materiálem jsou kosti a ulity.



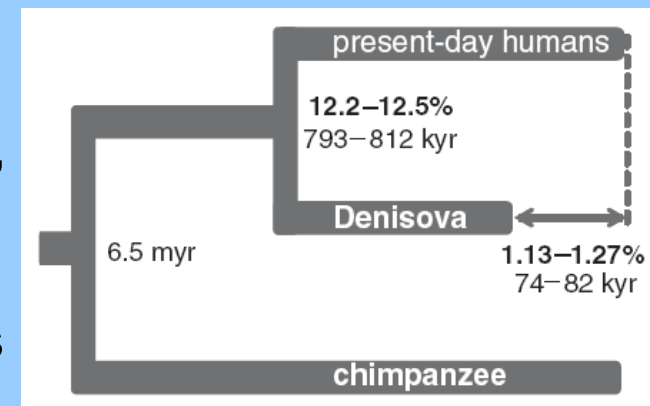
Molekulární (DNA) hodiny

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 ~160 ka starý (*H. sapiens idaltu*)



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...