

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

A. F. Kovařík
O stáří země

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 62 (1933), No. 2, 24--39

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/121936>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1933

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

O stáří země.

A. F. Kovařík.

(Přednáška konaná na Karlově universitě dne 23. května 1932).

Mluvíme-li o stáří čehokoliv, je nutno, abychom měli předně aspoň poměrně přesně udaný bod, od kterého počítáme, a za druhé měřítko, kterým čas měříme. Básníku Lucretiovi se počíná svět, když básníci začali opěvovati své hrdiny; theologové, odhadující stáří biblického světa, činí tak dosti přesně podle generací udaných v písmě starého zákona, biologa pak zajímá doba, po níž existuje život, jak jej známe v přírodě. Všechny tyto a jiné světy mají své zvláštní významy a jsou pro nás všeobecně zajímavé.

Mluvíme-li o stáří matičky země, můžeme s astronomem míti na mysli dobu, po kterou země existuje jako planeta; přijmeme-li tedy hypotézu, že náš solární systém povstal z jednoho tělesa, na př. slunce, pak by stáří země znamenalo dobu uplynulou od času, kdy se od slunce oddělila ta část, z níž povstala země.

Možno také ptáti se s Lordem Kelvinem¹⁾ po stáří zemské kůry a vypočísti ji z rychlosti, s níž se země ochlazovala. Avšak, i kdyby konstanty, jichž Kelvin užil ve svém výpočtu, nám byly lépe známy, než on je znal, přece nebylo by možno jeho metodou přesně stanoviti dobu potřebnou k tomu, aby vznikla zemská kůra tloušťky několika kilometrů, neboť pozdějším badáním přišlo se na něco, o čem Kelvin neměl ani zdání, že totiž energie jest vydávána radioaktivními prvky, které jsou v zemské kůře, a že ta onu energii absorbuje a tím se její ochlazování zvolňuje. Známe průměrnou hustotu radioaktivních prvků jen v poměrně tenké vrstvě pod povrchem země, do níž se nám podařilo proniknouti; kdyby radioaktivní látky byly rozděleny s touž hustotou ne v celém objemu země, nýbrž jen v její kůře, jejíž tloušťku odhadujeme z měření seismografických, pak by se země místo ochlazování oteplovala.

¹⁾ Srv. souborné dílo: The age of the Earth. Bull. of the National Research Council, No 80. str. 443. 1931.

Astronom Halley první ukázal na to, že slanost moře lze vykládati tím, že všechna sůl v moři pochází z povrchu země, odkud byla řekami do moře dopravena. Mohli bychom tedy stanovit stáří moře, jak se Joly²⁾ pokusil, kdybychom znali všechna data, kterých jest třeba k výpočtu délky doby, v níž se sůl v moři nahromadila na to množství, jaké tam má nyní. Ale tato data přesně neznáme a nemůžeme též předpokládati, že civilisace posledních několika tisíců let neměla vlivu na hodnoty některých konstant k výpočtu potřebných. Zde počítáme vlastně stáří moře.

Geolog mluví o geologické době a míní tím čas, který uplynul od vzniku nejstarší geologické formace. Tuto dobu dělí na další období a mnoho jej zajímá, jak by bylo možno stanovit délky jednotlivých těchto období v jednotce času dané našimi astronomickým rokem. Po více než století odhadovali geologové správně délky oněch období tím, že vyšetřovali rozsáhlost formací a míru jejich produkce i destrukce, jak je možno zkoumati v dnešní době. Zde jest zápasiti s mnohými překážkami a možnost chyb jest tu veliká; přece však, když vše uvážíme, aspoň řádové velikosti dob tak určených měly by býti správné.

Všechny tyto výpočty jsou vědecky zajímavé. Mají též vědeckou cenu, neboť mohou utvrditi důvěru v jisté hypotézy, když výpočty stejně definovaných dob, provedené jinou metodou, dají výsledky aspoň zhruba souhlasné. Sem patří především *metody radioaktivní*.

Objevením radioaktivity věda pokročila v oboru fysiky a chemie netušenou měrou. Ukázalo se, že atomy každého prvku, dříve považované za nedílné, ve skutečnosti se skládají z částic stejných jako atomy kteréhokoli prvku jiného, a tak pojmenování a - tom, t. j. nedílný, ztratilo původní význam. Kdežto podle dřívějších názorů měly atomy míti jen malou energii pohybu, víme dnes, že mají ještě ohromnou energii potenciální. Každý jednotlivý atom jeví se nám jako nový a komplikovaný svět, který mění svoje složení, přihodí-li se katastrofa v jeho soustavě spojená s částečným rozkladem aneb disintegrací atomu. Tuto vlastnost atomu, kterou nemůžeme dosud uměle vzbuditi, označujeme názvem radioaktivita. Radioaktivní rozklad atomů se děje podle jistých zákonů a jeho poměrná rychlost zároveň s celkovým množstvím rozkládajících se atomů poskytuje nám možnost vypočísti dobu, které jest třeba, aby se rozpadlo dané množství atomů.

Máme-li nyní nějakou geologickou formaci, v níž se vyskytují minerály obsahující radioaktivní látky, a můžeme-li předpokládati, že tyto minerály vznikly současně s onou formací, pak radioaktivní látky a jejich produkty obsažené v minerálu jsou jakési

²⁾ l. c. str. 65.

hodiny zaznamenávající stáří minerálu a tím i stáří vrstvy. Toto zaznamenávání se děje trojím způsobem.

U některých radioaktivních prvků jest disintegrace atomu provázena vysláním částice α , která jest nám též známa jako jádro heliového atomu a která se dříve neb později spojí s dvěma elektrony obsaženými v atomech hmoty, v níž jest ona částice konečně absorbována. Celek pak jest atom heliový. Čím více částic α bylo vysláno, tím více se vytvoří heliových atomů.

Energie α -částice se spotřebuje na práci, které vyžaduje ionisace atomů hmoty, jež onu částici absorbovala, a při tom se často ukazuje zjev nový; zbarvení absorbující hmoty. Sem patří na př. zbarvení skleněné trubice, v níž bylo radium, dále pleochroické dvůrky v slídě, v biotitu a pod. Intensita zbarvení jest funkcí ionisace a tato opět závisí na množství částic α , jež zase jest funkcí množství radioaktivních atomů vysílajících tyto částice a doby vysílání.

Konečně víme, že po každé disintegraci zbytek hmoty a energie atomu vytvoří nový atom — atom docela jiného prvku — který může též býti radioaktivní; ale poslední, neradioaktivní člen každé z tří radioaktivních řad nám známých jest atom některého isotopu olova. Čím více jest atomů radioaktivního prvku, který je v čele takové řady, původně přítomno a čím delší čas uplyne, tím větší počet atomů isotopu olova na konec vznikne.

Celkem tedy máme tři úkazy, jejichž velikost je funkcí času, a to:

A. Vznik a hromadění helia.

B. Barvení látek vyskytujících se v přírodě, na př. biotitu, částicemi α vysílanými radioaktivními prvky.

C. Vznik isotopů olova.

Jde-li o látky nalezené v přírodě a nezměněné nijak než vlivy radioaktivními, máme naději, že bude možno jejich geologické stáří stanoviti, když najdeme správné metody:

1. jak měřiti množství radioaktivních prvků, které vzbudily pozorovaný úkaz;
2. jak měřiti tento úkaz kvantitativně;
3. jak měřiti rychlost jeho vzniku.

Musíme však při tom zároveň zjistiti, že mimo radioaktivitu nic jiného nemělo vlivu ani na pozorovaný úkaz ani na rychlost jeho vzniku.

Není třeba hlubokého badání, abychom se přesvědčili, že uvedené tři metody nemají stejnou cenu.

A. *Metoda heliová.* Tato metoda jest nejstarší. R. 1904 na mezinárodním kongresu věd a umění konaném v St. Louis ve Špo-

jených Státech Lord Rutherford³⁾ ukázal na možnost užití této metody k výpočtu stáří minerálů uranových. Ač se tehdy ještě nevědělo, že částice α jest jádro heliového atomu, přece Rutherfordova velmi dobře známá chápavost věci ne úplně vědecky zralých a potvrzených, utvrdila jej v mínění, že helium, které je vždy přítomno v minerálech, v nichž se vyskytuje i uran a v nichž ostatně bylo na naší zemi objeveno, musí míti nějaké spojení s uranem a že pak z poměru množství helia k množství uranu v minerálu dalo by se usuzovati na jeho stáří. Boltwood⁴⁾ a Hon. R. J. Strutt,⁵⁾ nyní Lord Rayleigh, zkoumali tuto možnost kvantitativně. Avšak Lord Rayleigh⁶⁾ a Gray⁷⁾ shledali pokusy provedenými v laboratoři, že helium z minerálů uchází; je tedy velmi pravděpodobné, že se totéž děje i v přírodě, takže množství helia, které se v minerálu měřením nalezne, jest malé a vypočtené stáří je vlastně jen *spodní mez*. Že tento závěr jest nepochybně správný, plyne i z toho, že, kdykoliv je možno stáří minerálu vypočísti jak heliovou metodou, tak i metodou Boltwoodovou (v. dále odst. C'). vždy jest číslo nalezené metodou heliovou menší a pro rozdílné minerály nezdá se míti stejný poměr k číslu vypočtenému metodou druhou. Že rozdíl obou čísel může býti ohromný, je vidno z tohoto příkladu. Pro stáří uraninitu z Keystone (Jižní Dakota), který podle analýse provedené Davisem obsahuje na 100 g látky 66.90 g U, 1.89 g Th a 4.35 cm³ = 7.765 · 10⁻⁴ g He, plyne metodou heliovou 56 · 10⁶ let, kdežto metoda Boltwoodova dává 1460 · 10⁶ let. Chceme-li tedy více než spodní mez stáří, musíme zavrhnouti tuto metodu jako málo přesnou.

B. Metoda pleochroických dvůrků. Joly⁸⁾ první ukázal na radioaktivní původ pleochroických dvůrků. Ty se vyskytují často v biotitu a v živci a, jak již bylo uvedeno, jsou výsledkem ionisace způsobené částicemi α , vysílanými ze středu dvůrku, kde se obyčejně nalezne zirkon s nějakou radioaktivní látkou. Intensita zbarvení vzniklého v této látce závisí na celkovém počtu částic α . Joly a Rutherford⁹⁾ ozářili biotit — stejný, v jakém se vyskytují

³⁾ Rutherford E.: Present problems in radioactivity. The Popular Science Monthly: May, str. 34. 1905.

⁴⁾ Boltwood B. B.: On the ultimate disintegration products of radioactive elements. Part I. Am. J. Science (4) 23, str. 77—78. 1907, Part II. (4) 25, str. 365—381. 1908.

⁵⁾ Strutt Hon. R. J.: On the accumulation of helium in geological time. Roy. Soc. Proc. A 81, str. 272—277. 1908; A 83, str. 96—99. 1909; A 83, str. 298—301. 1909; A 84, str. 194—196. 1910.

⁶⁾ Strutt, Hon. R. J.: The leakage of helium from radioactive minerals. Roy. Soc. Proc. A 82, str. 166—169. 1909.

⁷⁾ Gray J. A.: Liberation of helium from radioactive minerals by grinding. Roy. Soc. Proc. A 82, str. 301—306. 1909.

⁸⁾ Joly J.: Pleochroic halos. Phil. Mag. (6) 13, str. 381—383. 1907.

⁹⁾ Joly J. - Rutherford E.: The age of pleochroic halos. Phil. Mag. (6) 25, str. 644—657. 1913.

pleochroické dvůrky — velkým množstvím částic α , vysílaných radiem po tak dlouhou dobu, až biotit měl stejnou intenzitu zbarvení, jaká byla pozorována na přirozených pleochroických dvůrkách. Tím určili celkový počet částic α , jehož je třeba ke vzniku onoho zbarvení. Není však snadné přesně stanovit rychlost výkonu v přirozeném pleochroickém dvůrku, t. j. počet částic α , vysílaných na př. za jeden rok z toho malého množství radioaktivní látky v středu dvůrku. Přicházíme i na jiné obtíže této metody. Není jisto, že buď jakost zbarvení anebo jeho intenzita nebyly aspoň zčásti jinak způsobeny anebo změněny. Pokusy v laboratořích¹⁰⁾¹¹⁾ dokazují, že prodloužená ionisace a také zvýšená teplota může úplně zničit aneb aspoň změnit zbarvení dvůrků; nemáme tedy nikdy jistoty, že zbarvení přirozených pleochroických dvůrků nebylo nějak změněno. Proto i hodnota stáří minerálu tímto způsobem nalezená nemůže být pokládána za správnou.

Není třeba obírat se dále oběma těmito metodami, abychom mohli vyslovit dosti správný závěr, že metoda pleochroických dvůrků jest velmi nespolehlivá a metoda heliová nám nemůže dát více než spodní mez stáří minerálu.

C. Boltwoodova metoda. Třetí metoda je mnohem slibnější. Autorem této metody jest Bertram Borden Boltwood, můj bývalý kolega na universitě Yale. Boltwood byl chemik, ač skoro po celý svůj akademický život byl členem odboru fyzikálního. Zajímala jej radioaktivita, a to po stránce jak chemické, tak i fyzikální. Boltwood dokázal pokusně platnost disintegrační teorie pro uran a radium tím, že objevil ionium. Jako chemik učinil velmi důležitý objev ve své práci o ioniu, že totiž není možno ionium a thorium chemicky od sebe oddělit. Tento objev jest hlavním podkladem *isotopie*.

Velmi mnoho se Boltwood zabýval otázkou, co asi jest posledním produktem disintegrace celé řady urano-radiové. První léta po promoci pracoval v praktické analytické chemii a zvláště v jistém oboru ekonomické geologie. Analysoval mnoho minerálů a později se obíral jen minerály radioaktivními. Při tom dospěl k přesvědčení, že každý minerál obsahující uran obsahuje i olovo, a napadlo jej, že toto olovo jest asi poslední produkt uranu. Prozkoumal nejen všechny své analýze uranových minerálů, ale též velké množství analýs provedených Hillebrandem, vládním americkým geologem. Nalezl, že poměr olova k uranu není ve všech minerálech stejný, a když si sestavil tabulku toho poměru a pro-

¹⁰⁾ Poole J. H. J.: The action of heat on pleochroic halos in biotite. Phil. Mag. (7) 5, str. 132—141. 1928. Note on the formation of pleochroic halos in biotite. Phil. Mag. (7) 5, str. 444. 1928.

¹¹⁾ Schilling A.: Die radioaktiven Höfe im Flussspat von Wölsendorf. Neues Jahrb. f. Mineral. Beil. Bd 53 A, str. 241—265. 1925.

zkoumal stáří formací, z nichž minerály pocházely, přišel k dalšímu poznání,⁴⁾ že, čím starší je geologická formace, v níž minerál byl nalezen, tím větší je onen poměr. Nejdříve přijal hypotézu, že všechno olovo v minerálu pochází z uranu, a tak vypočetl z poměru olovo-uran stáří minerálu v letech.

Tato práce Boltwoodova je základem třetí metody k vypočítávání stáří radioaktivních minerálů. Později chemikové Richards¹²⁾ a jeho žák Hönigschmid¹³⁾ a jin¹⁴⁾ ukázali, že poslední produkty ve všech třech radioaktivních řadách jsou isotopy olova.

Nelze však vyloučiti, že mimo tyto isotopy olova ještě obyčejné olovo je obsaženo v minerálu, a to právě tak, jako v něm může býti kterýkoli jiný prvek. Máme příčinu považovati za pravděpodobné, že smolnec z Jáchymova obsahuje obyčejné olovo, a to nejen proto, že se v místech kde se dobývá uranová ruda, vyskytuje galenit¹⁵⁾ (PbS), nýbrž i pro příčiny jiné. Kirsch,¹⁶⁾ aby dostal jistý poměr konstant λ_u/λ_{Th} , odhaduje, jak velké množství obyčejného olova by smolnec mohl obsahovati.

Nezdá se to býti možné, že po dobu skoro dvaceti let velké množství analýs minerálů bylo vykonáno hlavně k tomu účelu, aby byl určen poměr Pb/U . Ač později byl tento poměr nahrazen poměrem $Pb/(U + k \cdot Th)$, bylo vždy pokládáno za jisté, že všechno olovo v radioaktivním minerálu obsažené jest původu radioaktivního a že formule založená na tomto poměru dá správnou hodnotu stáří minerálu. Je-li však obyčejné olovo přítomno a budeme-li považovati všechno olovo v minerálu za produkt disintegrace, jest jasné, že takto vypočtená hodnota stáří bude *větší* než hodnota skutečná, a pak se ovšem mineme s cílem našich počtů.

Poněvadž se mnoho výsledků touto metodou nalezených nesrovnává mezi sebou ani s jinými výpočty geologickými, ustanovila Národní rada badatelská (National Research Council) ve Spojených Státech výbor, složený hlavně z geologů, který by

¹²⁾ Richards T. W. - Lambert M. E.: Atomic weight of lead of radioactive origin. J. Am. Chem. Soc. 36, str. 1329—44. 1914. Richards T. W. - Hall L. P.: *ibid.* 48, str. 104—8. 1926.

¹³⁾ Hönigschmid O. - Birkenbach L.: Zur Kenntnis des Atomgewichtes des Uranbleis. Ber. d. Chem. Ges. 56 B, str. 1837—9. 1923. Hönigschmid O.: Neuere Atomgewichtbestimmungen. ZS. f. Elektrochem. 25, str. 91—97. 1919.

¹⁴⁾ Fajans K.: Über das Thoriumblei. Sitzungsber. d. Heidelberger Akad. d. Wiss. Abt. A 1918, str. 3—23, 3. Abh.

¹⁵⁾ Zückert R.: Die Paragenesen von gediegenem Silber u. Wismut mit Kobalt-Nickel-Kiesen und der Uranpechblende zu Skt. Joachimsthal in Böhmen. Mit. d. Abt. f. Gesteins-, Erz-, Kohle- u. Salzmiterstudungen. Preuss. Geol. Landesanst., Heft 1. 1926.

¹⁶⁾ Kirsch G.: Über den genetischen Zusammenhang zwischen Thor u. Uran u. über Altersbestimmungen an radioaktiven Mineralen. Die Lebensdauer des Thoriums. Wien. Ber., 131, IIa, str. 551—568. 1922.

podrobně studoval otázku stáří naší země. Národní rada však žádala, aby i fysik byl jeho členem, a ta čest i práce byla nabídnuta mně. Podrobným zkoumáním uveřejněných prací a metod přišel jsem k opravdově netušenému poznání, že mnohé analýzy jsou bezcenné, že velmi často data uvedená nejsou dostačitelna a že se často, co v laboratoři mělo býti měřeno, pouze odhadovalo, čímž vědecká cena výpočtů byla zničena. Proto, ke konci prvního roku naší práce, jsem se rozhodl začítí „de novo“.¹⁷⁾ Vytknul jsem si napřed za úkol vyšetřiti, co jest třeba věděti, čeho lze v laboratoři dosáhnouti a co jest nutno připustiti z důvodů logických nebo jiných.

1. Na prvé místo jest nutno, aby minerál byl zaručeně primární a nebyl nijak změněn ať již z vnějšku nebo uvnitř, vyjma procesy radioaktivními. Jsem jist, že v té věci nebylo vždy vše opatrně vykonáno.

2. Výsledek analýzy minerálu musí obsahovati data množství uranu, thoria, olova (směs isotopů), na př. na 100 gramů minerálu, a mimo to i atomovou váhu směsi olova; *to vše z téhož vzorku.*

3. Disintegrační konstanty musíme znáti z nezávislých pokusů.

4. Musíme znáti atomovou váhu jednotlivých isotopů olova i radioaktivních prvků stojících v čele jednotlivých radioaktivních řad.

5. Musíme znáti podrobně řadu, jejíž posledním produktem jest příslušný isotope olova.

6. Musíme připustiti možnost, že i obyčejné olovo bylo již od počátku obsaženo v minerálu.

Co se týče první podmínky, myslím, že není třeba ji zvlášť odůvodňovati, ale stojí za zmínku, že ne všechny vzorky prošly jen rukama opatrných geologů; některé jistě měly zastaveníčka v kabinetech kupců a často jediným jejich ověřením bylo slovo překupníka.

Jak již uvedeno, máme poměrně málo úplných analysí s datem atomové váhy olova. Kde sebe menší množství obyčejného olova jest možné, nelze data bez atomové váhy olova pro přesné počty připustiti, neboť každé množství obyčejného olova, je-li považováno za uran-olovo nebo thorium-olovo, zvětší vypočtený věk minerálu.

Radioaktivní řady známe dosti podrobně, ač dosud nejsme jisti, je-li řada aktiniová odbočkou řady urano-radiové od jednoho z uranů, aneb, je-li to řada samostatná, počínající dosud nám neznámým isotope uranu. To však nebude nám příliš stěžovati práci, budeme-li znáti poměr aktiniů k uranu.

¹⁷⁾ Kovarik A. F.: Basis for computing the age of a radioactive mineral from the lead content. *Am. J. Sci.* (5) 20, str. 81—100. 1930. Srv. též *The age of the Earth. Bull. of the National Research Council*, No 80, str. 73—123. 1931.

Pravil jsem, že jest nutno dbáti také toho, že i obyčejné olovo může býti přítomno v minerálu. Při tom přicházíme k otázce, není-li možné, aby kterýkoliv z isotopů olova byl také obsažen v minerálu již od počátku. Na tuto otázku sotva budeme moci odpověděti experimentálně. Je-li to však možné, pak nebudeme s to, abychom matematicky rozřešili hlavní problém, neb budeme míti více neznámých veličin než rovnic ony veličiny obsahujících. Proto jest tu někdy nutno dbáti rozmanitých okolností a důvodů logických, jež musí nahraditi přímý pokus.

Nevíme, jak chemické prvky byly stvořeny. Víme však, že mnohé prvky jsou směsí isotopů a že atomová váha takového smíšeného prvku jest vlastně průměrná atomová váha onoho prvku. Měření vykonaná s chlorem připraveným z minerálů, jejichž původ pravděpodobně není mořský, dala touž atomovou váhu, jakou má chlor připravený z moře. Nikl původu kosmického má stejnou atomovou váhu jako nikl pozemský. Podobný závěr možno učiniti i o boru a rtuti, i když jejich původ dokazuje, že jsou najisto velmi rozdílného geologického stáří. Olovo, jiné atomové váhy nežli 207,20, vyskytuje se jen v minerálech radioaktivních, v nichž se postupem času uran, thor a aktinium mění v isotopy olova. Soudíme z toho, že obyčejné olovo, a jenom toto olovo atomové váhy 207,20, jest chemický element právě jako kterýkoliv jiný smíšený prvek, který jako takový byl stvořen podle plánů, pravidel nebo přirozených zákonů, nám dosud neznámých, které řídily i stvoření jiných smíšených prvků.

Přijmeme-li tyto uvedené hypotézy jako pravděpodobné, můžeme problém stáří radioaktivních minerálů matematicky rozluštit.

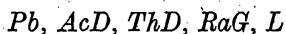
Sestavení základních rovnic. To se zakládá na těchto třech samozřejmých větách:

1. Celkové množství AcD , ThD , RaG a obyčejného olova jest všechno olovo analýs nalezené v minerálu.

2. Celkový počet atomů AcD , ThD , RaG a obyčejného olova jest roven počtu atomů olova v minerálu nalezeného, jehož atomová váha analýs stanovena necht' činí A .

3. Počet rozpadlých atomů matečního radioaktivního prvku stojícího v čele každé samostatné radioaktivní řady musí býti roven počtu atomů vzniklého konečného produktu, kterým jest v každé řadě isotope olova.

V dalším označíme symboly



hmotu směsi olova nalezenou analýs, pak hmoty aktinia D , thoria D , radia G a obyčejného olova; všechny tyto hmoty necht'

jsou měřeny v gramech. Podobně symboly

$$AcU, Th, U$$

necht' značí hmoty aktinium-uranu, thoria a uranu, zase v gramech. Atomové váhy jednotlivých druhů olov, a to atomovou váhu směsi olova nalezenou analýs, pak atomové váhy aktinium - olova AcD , thorium - olova ThD , radium - olova RaG a obyčejného olova Pb označíme

$$A, C, D, G, P,$$

kdežto atomové váhy aktinium - uranu, thoria a uranu necht' jsou

$$W_{acu}, W_{th}, W_u;$$

počet atomů aktinium - uranu, thoria, uranu, aktinium - olova, thorium-olova, radium-olova a obyčejného olova, obsažených v minerálu, označíme

$$acu, th, u, c, d, g, p.$$

Disintegrační konstanty aktinium-uranu, thoria a uranu necht' jsou

$$\lambda_{acu}, \lambda_{th}, \lambda_u$$

a konečně necht' značí N Avogadrovo číslo, t stáří minerálu. Symboly s indexem nula budou označovati hodnoty příslušných veličin v době, kdy minerál vznikl.

Pak první dvě věty formulovány matematicky znějí takto:

$$AcD + ThD + RaG + L = Pb,$$

aneb také vzhledem k tomu, že je $AcD = cC/N$ atd.,

$$\frac{c}{N}C + \frac{d}{N}D + \frac{g}{N}G + \frac{p}{N}P = Pb.$$

I.

$$a \quad c + d + g + p = \frac{Pb}{A}N.$$

II.

Z třetí věty pak plynou tyto rovnice:

$$\begin{aligned} c &= acu_0 - acu \\ &= acu (e^{\lambda_{acu}t} - 1) \\ &= \frac{AcU}{W_{acu}} N (e^{\lambda_{acu}t} - 1) \end{aligned} \quad \text{III.}$$

$$d = \frac{Th}{W_{th}} N (e^{\lambda_{th}t} - 1) \quad \text{IV.}$$

$$g = \frac{U - AcU}{W_u} N (e^{\lambda_u t} - 1) \quad \text{V.}$$

$$p = p_0 = \frac{L}{P} N = \frac{L}{207,20} N. \quad \text{VI.}$$

Z druhé rovnice (I.) a z rovnice (II.) vyloučíme p , když pak dosadíme z rovnic (III.) až (V.) za c , d a g , dostáváme rovnici

$$(C - P) \frac{AcU}{W_{acu}} (e^{\lambda_{acu}t} - 1) + (D - P) \frac{Th}{W_{th}} (e^{\lambda_{th}t} - 1) + \\ + (G - P) \frac{U - AcU}{W_u} (e^{\lambda_u t} - 1) = Pb \frac{A - P}{A}, \quad \text{VII.}$$

která nám dá neznámé t , známe-li ovšem všechny ostatní veličiny. Podobně dostaneme pro hmotu (v gramech) obyčejného olova obsaženého v minerálu rovnici

$$L = P \left[\frac{Pb}{A} - \frac{AcU}{W_{acu}} (e^{\lambda_{acu}t} - 1) - \frac{Th}{W_{th}} (e^{\lambda_{th}t} - 1) - \right. \\ \left. - \frac{U - AcU}{W_u} (e^{\lambda_u t} - 1) \right]. \quad \text{VIII.}$$

Tyto rovnice vyjadřují vše, co souvisí s radioaktivní proměnou v minerálu. Máme však v nich veličinu AcU , kterou analýsami neurčíme, a též atomovou váhu W_{acu} , kterou pokusně neznáme. Jest tedy viděti, že narážíme na jisté obtíže při řešení svého problému, je-li aktinium-uran samostatný isotop uranu. Tyto obtíže však možno obejít a odvoditi praktickou formuli, které lze upotřebiti a která v případě, že se aktiniová řada odvětňuje z řady uranové u UI , jest zcela přesná.

Z Astonovy práce o isotopech olova připraveného z bröggeritu soudíme, že poměrný počet atomů váhy 207 jím nalezený jest příliš veliký, než lze očekávati za předpokladu, že tyto atomy patří obyčejnému olovu, a že tedy 207 je atomová váha AcD , které je isotopem olova, pro což ostatně svědčí i jiné důvody.

Z dat analýse bröggeritu z Karlhus, Raade, Norvéžsko, zároveň s výsledky uvedené práce Astonovy, lze dále souditi, jaká jest disintegrační konstanta aktinium-uranu, λ_{acu} , a moje počty dávají hodnotu

$$\lambda_{acu} = 2,5_4 \cdot 10^{-9} \text{ rok}^{-1}.$$

Poněvadž pak disintegrační konstanta uranu jest značně menší, totiž

$$\lambda_u = 1,52 \cdot 10^{-10} \text{ rok}^{-1},$$

plyne z toho, že čím jest starší minerál, tím větší je množství isotopu AcD v poměru k množství isotopu RaG (uran-olovo). Vzhledem k tomu, že v minerálech kolem 500 milionů roků stáří činí obsah aktinia jen asi 3 až 4% obsahu uranu, neučiníme velkou chybu, když AcD (207) nahradíme obyčejným olovem (207,20). Když pak to odečteme od celkového množství olova v minerálu, zbývá nám jen RaG a ThD .

Jinak však můžeme předpokládati, že řada aktiniová vzniká odvětvením z řady uranu-radiové, jak se až do nedávna soudilo a někteří badatelé dosud soudí. V tom případě plynou z rovnic VII. a VIII., dávajících neznámé t a L , aneb přímo z patričně pozměněných původních rovnic I.—VI. tyto rovnice:

$$(D - P) \frac{Th}{232,15} (e^{\lambda_{Th}t} - 1) + (G - P) \frac{U}{238,17} (e^{\lambda_U t} - 1) = Pb \left(\frac{A - P}{A} \right) \quad \text{IX.}$$

$$L = Pb - \frac{Th}{232,15} (e^{\lambda_{Th}t} - 1) D - \frac{U}{238,17} (e^{\lambda_U t} - 1) G$$

aneb

$$L = P \left[\frac{Pb}{A} - \frac{Th}{232,15} (e^{\lambda_{Th}t} - 1) - \frac{U}{238,17} (e^{\lambda_U t} - 1) \right]. \quad \text{X.}$$

V případě odvětvení udává L správně množství obyčejného olova a AcD jde s RaG . Je-li však aktiniová řada samostatná a počíná-li isotope uranu, aktinium-uranem, pak L se skládá z obyčejného olova a z větší části AcD . Poněvadž chceme počítati jenom s RaG a s ThD , jejichž konstanty lépe známe a pro které možno obdržeti data z chemické analýse, můžeme v tom i onom případě říci, že rovnice IX. a X. nám dávají rozluštění našeho problému, aniž v případě druhém mnoho pochybíme.

V rovnici IX. rozvineme nyní exponenciální funkce v řady, z nichž podržíme jen první dva členy, a po dosazení číselných hodnot dostaneme první přibližný výraz pro t v tvaru

$$t_1 = \frac{Pb \frac{207,20 - A}{A}}{U - \frac{0,80}{1,20} \frac{238,17}{232,15} \frac{\lambda_{Th}}{\lambda_U} Th} \cdot \frac{238,17}{1,20} \cdot \frac{1}{\lambda_U} \quad \text{XI.}$$

Abychom dostali přesnější hodnotu t , dosadíme do rovnice IX. $t = t_1 + (t - t_1)$ a rozvineme obě exponenciální funkce, které mají v exponentu rozdíl $t - t_1$, v řady, z nichž podržíme zase jen lineární členy. Označíme-li pak

$$Q_1 = \frac{1,20}{238,17} (e^{\lambda_U t_1} - 1) - \frac{0,80}{232,15} (e^{\lambda_{Th} t_1} - 1), \quad \text{XII.}$$

což je levá strana rovnice IX. pro $t = t_1$, dostaneme rovnici

$$t_1 - t = \frac{Q_1 - Pb \frac{207,20 - A}{A}}{\frac{1,20}{238,17} U \lambda_u e^{\lambda_u t_1} - \frac{0,80}{232,15} Th \lambda_{th} e^{\lambda_{th} t_1}}, \quad \text{XIII.}$$

kteřá dává přesnější hodnotu t .

Později vyložím kratší způsob počítání. Nyní však bych rád zdůraznil nutnost bráti zřetel k tomu, že minerál může obsahovati obyčejné olovo. Není-li ho v minerálu, pak jest v rovnici X. $L = 0$ a z toho plyne při prvním stupni přiblížení pro t hodnota

$$t_1 = \frac{Pb}{U + \frac{238,17 \lambda_{th}}{232,15 \lambda_u} Th} \cdot \frac{238,17}{A} \cdot \frac{1}{\lambda_u} = \\ = \frac{Pb}{U + k \cdot Th} \cdot \frac{238,17}{A} \cdot \frac{1}{\lambda_u}, \quad \text{XIV.}$$

což se obyčejně píše v tvaru

$$t_1 = \frac{Pb}{U + k \cdot Th} C, \quad \text{XV.}$$

kdež k a C bývají pokládány za konstanty, ač C konstantní hodnotu jistě nemá. Tento výraz pro přibližnou hodnotu t_1 jest správný jen tehdy, když $L = 0$, když tedy žádné obyčejné olovo není přítomno v minerálu (aneb v druhém případě žádné obyčejné olovo a žádné AcD).

Abych mohl lépe upozorniti na to, že tato formule, ačkoli se jí obyčejně užívá k stanovení stáří minerálu, nemůže dáti ani prostředně přesnou hodnotu t — a to v mnohých případech — odvodil jsem vzorec pro L . Tento vzorec má praktickou cenu. Možno ho upotřebiti, aniž známe stáří minerálu, ovšem právě proto jest hodnota L jen přibližná, přece však dosti přesná, že odchylka od správné hodnoty činí při stáří minerálu

$$t = 5 \cdot 10^8 \text{ roků } 0\%, \\ t = 1 \cdot 10^9 \text{ roků } 2\%, \\ t = 2 \cdot 10^9 \text{ roků } 3,5\%.$$

Tato formule zní

$$L = \frac{207,20 Pb \left[\frac{\lambda_u}{\lambda_{th}} U \cdot 208 (A - 206) - Th \cdot 206 (208 - A) \right]}{A \left[\frac{\lambda_u}{\lambda_{th}} U \cdot 208 \cdot 1,20 - Th \cdot 206 \cdot 0,80 \right]} \quad \text{XVI.}$$

a dá se odvoditi z těchto vět:

1. Poměr $\lambda_u : \lambda_{th}$ se rovná poměru množství *RaG* na gram uranu obsaženého v minerálu k množství *ThD* na gram thoria v minerálu. Tato hodnota poměru $\lambda_u : \lambda_{th}$ je ovšem jen. přibližná.

2. Počet atomů atomové váhy A' v $(Pb - L)$ aneb v $(RaG + ThD)$ jest týž jako počet atomů v *Pb* atomové váhy *A* zmenšený o počet atomů v *L* atomové váhy 207,20 (obyčejné olovo).

3. Množství *RaG* a taktéž množství *ThD* lze vypočísti z množství *Pb - L* a z atomových vah *RaG*, *ThD* a *Pb - L*, totiž 206, 208 a A' .

Matematicky se dají ty věty vyjádřiti takto:

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_{th}} = \frac{\frac{RaG}{U}}{\frac{ThD}{Th}} \quad A$$

$$\frac{Pb - L}{A'} = \frac{Pb}{A} - \frac{L}{207,20} = \frac{207,20 Pb - AL}{207,20 A} \quad B$$

$$RaG = \frac{208 - A'}{2} \frac{206}{A'} (Pb - L) \quad C$$

$$ThD = \frac{A' - 206}{2} \frac{208}{A'} (Pb - L)$$

Podrobné odvození těchto rovnic bylo publikováno jinde¹⁷⁾. Z nich pak lze snadno odvoditi výše udaný vzorec který budeme raději psáti ve tvaru

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_{th}} = \frac{Th}{U} \frac{206}{208} \left[\frac{207,20 Pb (208 - A) - 0,80 AL}{207,20 Pb (A - 206) - 1,20 AL} \right]$$

A nyní, není-li obyčejné olovo přítomno v minerálu, je $L = 0$ a pak

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_{th}} = \frac{Th}{U} \frac{206}{208} \frac{(208 - A)}{(A - 206)}$$

Prozkoumejme, co to bude znamenati pro minerály, pro něž máme z analýse nejúplnějši data. Poněvadž λ_u a λ_{th} jsou konstanty, má míti poměr $\lambda_u : \lambda_{th}$ konstantní hodnotu ve všech případech.

Tabulka I.

Minerál	Naleziště	<i>Pb</i>	<i>U</i>	<i>Th</i>	<i>A</i>
Uraninit	Flat Rock Mine, N. C.	3,86	76,96	2,44	206,40
Thorit	Brevik, Norvéžsko	0,35	0,45	30,10	207,90
Bröggerit	Raade, Norvéžsko	8,64	61,67	6,30	206,12
Cleveit	Aust-Agder, Norv.	10,61	66,73	0,82	206,17
„	Saetersdalen, Norv.	7,83	53,30	4,61	206,08

Minerál	Naleziště	Pb	U	Th	A
Bröggerit	Karthus, Raade, Nor.	8,018	61,158	4,377	206,19
Uraninit	Keystone, S. Dak.	15,24	66,90	1,89	206,071
„	Sinjaja Pala, Rusko	18,10	61,14	0,13	206,06
Thorianit	I. Ceylon	2,34	11,8	68,9	207,21
„	II. „	3,11	20,2	62,7	206,91
„	III. „	3,50	26,8	57,0	206,84
Uraninit	Wilberforce, Kanada	9,26	53,52	10,37	206,195

Tabulka II.

Minerál a naleziště	$\lambda_u : \lambda_{th}$
Thorianit I., Ceylon	3,78
Thorianit II., Ceylon	3,68
Thorit, Brevik, Norv.	3,50
Cleveit, Saatersdalen, Norv.	2,06
Uraninit, Wilberforce, Kanada	1,77
Bröggerit, Raade, Norv.	1,58
Uraninit, Flat Rock Mine, N. C.	1,26
Uraninit, Již. Dak., S. S.	0,76
Bröggerit, Karthus, Raade, N.	0,67
Cleveit, Aust-Agder, Norv.	0,07 ₄
Uraninit, Sinjaja Pala, Rusko	0,07

Tabulka I. nám podává příslušná data, v tabulce II. jsou pak uvedena jména minerálů a jejich nalezišť z tabulky I. a při každém z nich jest udána hodnota poměru $\lambda_u : \lambda_{th}$ plynoucí ze svrchu uvedené formule. Jest jasné, že poměr $\lambda_u : \lambda_{th}$ pro rozdílné minerály daleko není konstantní. Poněvadž jsme odvodili jeho hodnotu z předpokladu, že obyčejné olovo (nebo po případě obyčejné olovo a *AcD*) v minerálu není, nelze žádné formule pro stáří minerálu založené na stejné hypotéze a tedy ani formule

$$t = \frac{Pb}{U + k \cdot Th} C$$

užítí k vypočtení stáří minerálu, dokud neopravíme hodnotu *Pb* tím, že odečteme napřed obyčejné olovo a *AcD*, aby čítec *Pb* ve výrazu pro *t* znamenal jen *RaG* + *ThD*. To lze učiniti. I zde pak vidíme praktičnost vzorce XVI., neb možno z něho vypočísti přibližnou hodnotu *L*, aniž známe stáří minerálu.

Oč nám především běží, je naléztí co nej přesnější hodnotu pro *t*, stáří minerálu. Jak bylo již uvedeno, lze rovnici IX. odvozenou za předpokladu, že minerál může obsahovati obyčejné olovo, rozřešiti použitím rovnic XI., XII. a XIII. a tak dostati přesnou a správnou hodnotu *t*. Jest však možno práci zkrátiti a naléztí

přesnou hodnotu, dáme-li se jiným směrem. Předně vypočteme přibližnou hodnotu L podle vzorce XVI. a tu odečteme od čísla udávajícího množství všeho olova v minerálu. Pak užijeme logaritmické formule

$$t_1 = \frac{\log_{10} [U + 0,360 Th + 1,155 (Pb - L)] - \log_{10} [U + 0,360 Th]}{6,601 \cdot 10^{-11}} \text{ roků.}$$

Ta nám dá přesnou hodnotu t v případě, že $(Pb - L)$ přesně znamená hodnotu $(RaG + ThD)$. L jest však hodnota přibližná — ač se těsně blíží hodnotě pravé — a proto je nutno učiniti další korekci. Poněvadž si přejeme užiti hlavní věty odvozené z původně uvedených hlavních tří vět a poněvadž v korekci obsažené v rovnici XIII. jest vše zahrnuto, co bylo vyvoděno v thesi této práce, odečte se hodnota $t_1 - t$ od hodnoty t_1 plynoucí z logaritmického vzorce výše uvedeného a takto vypočtené t nám dá správně a přesně stáří minerálu. Že není třeba v korekci pokračovati, jest odůvodněno tím, že L jest velmi blízké pravé hodnotě L uvedené v rovnici X., což lze viděti i z tabulky III.:

Tabulka III.

Minerál	Naleziště	Přibližná formule		Pravidelná formule	
		L	$t \cdot 10^{-6}$	$t \cdot 10^{-6}$	L
Uraninit	Flat Rock Mine, N. Car.	1,244	249	251	1,241
Thorit	Brevik, Norv.	0,009	225	224	0,011
Brögerit	Raade, Norv.	0,39	911	915	0,40
Cleveit	Aust-Agder, Norv.	1,44	966	967	1,43
Cleveit	Saatersdalen, Norv.	0,145	978	986	0,13
Uraninit	Keystone, Již. Dak.	0,66	1469	1465	0,67
Uraninit	Sinjaja Pala, Karelia	0,89	1853	1852	0,91
Uraninit	Wilberforce, Kanada	0,60	1061	1062	0,61

V této tabulce jsou uvedeny hodnoty L (množství obyčejného olova, po případě obyčejného olova + části AcD) v gramech na 100 g minerálu podle přibližné i podle pravidelné formule a dále stáří těch minerálů (v rocích), jejichž analytická data jsou nejúplnější (v. tab. I.). Při tom za disintegrační konstanty uranu a thoria byly vzaty hodnoty $\lambda_u = 1,52 \cdot 10^{-10} \text{ rok}^{-1}$, $\lambda_{th} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ rok}^{-1}$. Kritiku těchto hodnot provedu v přednášce příští zároveň se zprávou o novém stanovení disintegrační konstanty uranu.

Hodnoty stáří minerálů mají pro geologa veliký význam. Geolog považuje primární minerály nalezené v jisté formaci za geologicky stejně staré jako je ona formace. A je-li možno vyjádřiti

stáří minerálů takových v rocích — což lze provésti pro minerály radioaktivní — pak lze též vyjádřiti v rocích trvání geologických period, pro něž jsme znali až dosud jen poměrná čísla. Právě proto se geologové mnoho zajímají o radioaktivní metody, poněvadž ty se zakládají na konstantách, které možno v nezávislých pokusech stanoviti.

Hodnoty stáří minerálů svrchu uvedených značí tudíž stáří jistých formací a nejstarší z nich pro nás znamenají pak, že země jest aspoň tak stará. Oč je starší to nelze — aspoň tímto způsobem — stanoviti.

*

Sur l'âge de la Terre.

(Extrait de l'article précédent.)

L'auteur donne une critique des méthodes radioactives de la détermination de l'âge des minéraux et fait voir que la méthode la plus précise est celle de Boltwood reposant sur la considération de la naissance des isotopes du plomb. Cependant, il faut tenir compte de ce que le minéral a pu contenir, lors de sa naissance, du plomb ordinaire (au poids atomique 207,20); c'est pourquoi les formules usuelles pour l'âge d'un minéral, qui négligent cette circonstance peuvent donner des chiffres trop hauts. L'auteur établit des formules précises pour l'âge t d'un minéral (formule VII) et pour la masse L du plomb ordinaire contenu dans le minéral (formule VIII). Dans ces formules figurent la masse AcU contenue dans le minéral et le poids atomique W_{acu} ; nous ne connaissons pas ces quantités et l'auteur fait voir comment cette difficulté peut être levée. Il obtient, pour l'âge d'un minéral, d'abord une formule approximative XI, ensuite une formule plus exacte, XIII. Mais, en règle générale, on peut se contenter de la formule de la page 38 pour t_1 , où l'on substitue pour L la valeur fournie par l'équation XVI.