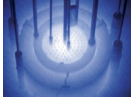


■ ELTE Kémiai Intézet

Paul Kazuo Kuroda és az oklói ősreaktorok

87



Reprinted from THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS, Vol. 25, No. 4, 781-782, October, 1956
Printed in U. S. A.

On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals

P. K. KURODA

Department of Chemistry, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas
(Received July 26, 1956)

AN attempt is made in this paper to apply the nuclear reactor theory in geochronology and to explain certain interrelations between the age and the nuclear physical stability of the uranium minerals, as well as the geological environments of the mineral formation.

The infinite multiplication constant, k_{∞} , may be considered as an indicator of the stability of the uranium minerals, which are the natural assemblages of uranium, moderator, and impurities. We may consider a system to be quite "stable," when the infinite multiplication constant of the assemblage is far less than unity. The system will be nuclear physically "unstable," when the infinite multiplication constant is greater than unity.

According to the nuclear reactor theory,

TABLE II. The water-uranium ratio and the values of ρ , f , s , and k_{∞} (Johanngeorgenstadt pitchblende, 2100 million years ago).

ρ	1/4	1/2	1	2	3	4	5	10
f	0.29	0.47	0.62	0.74	0.79	0.82	0.84	0.86
s	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.91	0.89	0.81
k_{∞}	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91	1.91
k_{∞}	0.55	0.88	1.15	1.34	1.40	1.42	1.43	1.33

uranium ratio could have easily caused a sharp upward change ρ , without affecting f considerably, and the result of which could have been enough to make the system nuclear physically "unstable."

It is generally accepted that the deposition of the uranium

3. ábra. A feltételezést ismertető egyoldalas cikk részlete

háború befejezése után hozta létre. Ezáltal Franciaország lett az első olyan ország a világon, amely civil atomenergia-bizottságot létesített. Ennek keretében indult meg Franciaországban az intenzív nukleáris kutatás, épültek meg kutatási atomreaktorok és atomerőművek. [9]

Annak ellenére, hogy de Gaulle tábornok a háború után erőteljesen szorgalmazta Franciaország nukleáris fegyverekkel való felszerelését, a békeépítési tilalmak következtében erre csak 1954-ben kerülhetett sor, a „Force de Frappe” (ütőerő) program keretében. [10] Annak ellenére, hogy Közép-Franciaországban, Limoges környékén már 1950 körül jelentős uránérclelőhelyeket fedeztek fel, és az ércek fel-

dolgozására felépült például a pierrelatte-i dúsítóüzem is, a katonai nukleáris program beindulásával a hazai igények fedezésére az uránércartalékok már elégtelennek bizonyultak. Ennek jegyében merült fel a külföldi uránérc behozatalának igénye.

Gabon és az oklói uránércbányászat

Gabon az afrikai országok méretéhez képest kis köztársaság Közép-Afrikában; régebben francia gyarmat volt, ma önálló (5. ábra). Északon Egyenlítői Guinea és Kamerun, keleten és délen a Kongói Köztársaság, nyugaton pedig az Atlanti-óceán határolja.



5. ábra. A közép-afrikai Gabon Köztársaság és az oklói bányavidék

1910-ben Gabon Francia Egyenlítői Afrika négy területének egyike lett. Ez így maradt 1959-ig; 1960-ban függetlenné vált a terület. Gabon még francia gyarmat volt, amikor a francia Commissariat de l'Energie Atomique később COGEMA, majd Areva NC néven ismertté vált ipari részlegének geológusai 1956-ban uránlelőhelyeket fedeztek fel ezen az Európától távoli he-

lyen. Franciaország rögtön a COMUF (Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville) által működtetett uránbányákat és uránérc-előfeldolgozó üzemeket nyitott Mountana falu mellett a jelentős uránércartalékok kitermelésére. Gabon állam a ki-sebbségi részesedést kapta a társaságból. Oklo egy Franceville városka melletti terület Gabon Haut-Ogoone tartományában, körülbelül 400 kilométernyire az Atlanti-óceán partvidékétől. E helyen alakították ki a legtermelékenyebb uránbányákat (6. ábra). Az ország tengerparti kikötőjéből heti rendszerességgel szállították Franciaországba feldolgozásra az uránércet, miután a Mountana melletti előkészítő üzemben megőrölték.

Az oklói uránérc összetétele

Mint közismert, az uránnak két fő izotópja van, a hasadó ^{235}U és a ^{238}U . Az előbbi gyorsabban bomlik, mint a második, azaz felezési ideje 0,71 milliárd év a 4,51 milliárd évvel szemben. Ennek eredményeként a hasadó nuklidok gyakorisága időben csökken, azaz a távoli múltban az ^{235}U koncentrációja sokkal nagyobb volt, mint jelenleg (7. ábra és 1. táblázat).

Más szavakkal, bár mindkét uránizotóp radioaktív, olyan hosszú a felezési idejük, hogy az a teljes uránmennyiség, ami a földgolyó képződésekor, 4,51 milliárd évvel ezelőtt jelen volt, ma is létezik. Viszont minden 100 000 uránatom mellett jelenleg csak 750 urán-235 atom van.

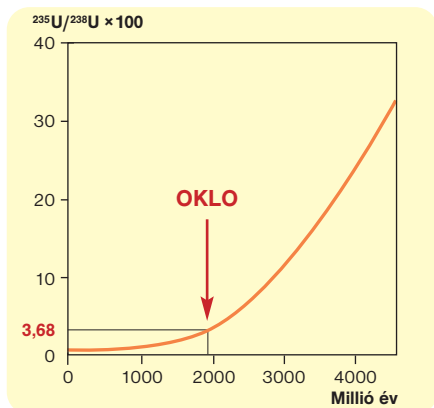
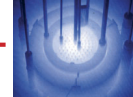
Ezzel szemben az oklói uránércben, illetve mindenütt a Földön (és a Naprendszerben) 2 milliárd évvel ezelőtt az urán-235 relatív koncentrációja 3000 atom volt 100 000 uránatomra vonatkoztatva. Az oklói rendszeres franciaországi uránércszállítások során a pierrelatte-i feldolgozó-, illetve dúsítóüzemben az ércből és a dúsított UF_6 -ból tömegspektrometrián rutin-szerű urán-235 meghatározást végez-

1. táblázat. Az Urán-235 koncentráció időbeli változása

Évvel ezelőtt	$\frac{^{235}\text{U}}{^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}}$
0	0,72%
$0,5 \times 10^9$	1,08%
1×10^9	1,63%
$1,5 \times 10^9$	2,44%
2×10^9	3,65%
$2,5 \times 10^9$	5,42%
3×10^9	7,87%

4. ábra. Paul Kazuo Kuroda nukleáris kémikus (1917–2001)





7. ábra. A földkéreg urán-235/urán-238 arányváltozása az idők folyamán. Az ábrán jelzett időpontban Oklóban az urán-235 koncentrációja körülbelül 3,68% volt [11]

tek. Ezen analitikai mérés várt eredményének minden szállítmány esetében $0,7202 \pm 0,0006\%$ -nak kellett lennie.

Az urán analitikai kémia apoteózisa

Az említett rutin uránércvizsgálat során 1972 júniusában a szolgálatban lévő analitikus a szokatlan $0,7171 \pm 0,0007\%$ urán-235 értéket mérte annak ellenére, hogy az urán-235 koncentrációnak akkor a fentebb említettnek kellett lennie mindenütt a Földön, sőt, a Holdon is. Megjegyzendő, hogy a sztemderd eltérés jelentéktelennek is mondható lett volna, ha az ügyeletes analitikus annak tekintette volna. Amennyiben ő nem lett volna annyira skrupulózus, mint amilyen volt, a világ, mint a továbbiakban kiderül, egy rendkívül fontos felfedezéssel lett volna szegényebb. Sokszor megismételt mérések ugyanis kimutatták, hogy a szokatlan eredmény nem mérési, vagy minta-előkészítési triviális hibából eredt. A francia szakemberek a hatóságok támogatásával több száz mintán ismételték meg a mérést, sőt, az urán-235 izotóp koncentrációját az érc feldolgozása során nyert UF_6 -ban is ellenőrizték. Kiderült, hogy az eltérés semmiképp sem eredhetett mérési hibából, vagy külső szennyeződésből: az eredmények anomális összetételű természetes ásványt jellemeztek. A vizsgálatok kimutatták, hogy a mountainai üzemből 1970 decembere és 1972 májusa közötti érkező ércminták átlagos uránizotóp-aránya a szokásosnál kisebb volt. Kiszámították, hogy az anomália több mint 700 tonna feldolgozott uránt érintett. Az összes szállítmány urán-235 izotóphiánya körülbelül 200 kilogrammot jelentett. Ez nem akármilyen méretű jelenségtől szár-

mazhat. Párhuzamos mérések azt is kimutatták, hogy a bánya egy évekkel ezelőtti furatából származó mintákban a hihetetlenül alacsony, 0,440%-os izotóparányt is jelezték. 1972 augusztusában különböző hipotézisekkel igyekeztek magyarázni a jelentős izotóparány-eltéréseket, de az egyetlen elfogadható magyarázatnak az látszott, hogy az uránércben ősi nukleáris láncreakció játszódott le.

Erre utaltak például az ércben kimutatott urán hasadási termékek is, miután a radioaktív felezési sorok végén jelentkező izotóp-összetételek általában nagyon különböztek a természetes elemekétől. A feltételezett urán-235 hasadások százezer nagyságrendűeknek bizonyultak a 2×10^9 éves időtartam során. Ilyen mértékű hasadási gyakoriságot csak hosszú ideig fenntartott láncreakciók okozhattak. Ezen túlmenően az uránlerakatok geológiai jellemzői azt is mutatták, hogy egy urán-235 izotópbeli „kritikus tömeg” konfiguráció kialakulása is lehetséges volt, amit az akkor jelen lévő 3%-os uránizotóp-arány (a mai 0,7%-kal szemben) nagyon valószínűvé tett. A francia hatóságok 1972 és 1975 közötti kutatásai arra a következtetésre jutottak, hogy az oklói uránlelőhelyekben körülbelül kétmilliárd évvel ezelőtt az említett urán-235 koncentráció és a természeti jelenségek kedvező közreműködése során természetes fosszilis nukleáris ősreaktorok alakultak ki és működtek. [12–15] Ezek létezésének a bizonyítása világszen-

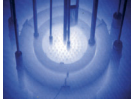
záció volt, és jelentős tudományos ismeretgyarapodásnak tekinthető. A jelenség részletes és alapos vizsgálata a világon számos helyen megkezdődött, a francia kutatások nyomán a téma részletezése több száz publikáció tárgyát képezte és a kutatás a mai napokban is folyik. [16] A részletekre itt nem kívánunk kitérni, de egy érdekes összefoglalót azért megemlítenénk. [17] Természetesen érdekességként a témáról magyar nyelven is megjelentek tudósítások. [18–19]

Ezután érdemes röviden visszakanyarodni ahhoz az analitikus kémikushoz, akinek alapossága nélkül az oklói fosszilis nukleáris ősreaktorok felfedezésére nem került volna sor, vagy talán jóval később történt volna meg. A téma hálátlan szakirodalma e személyt teljesen említés nélkül hagyta, korszakalkotó alaposságát még a franciák sem hangsúlyozták eléggé. Utólagos elismerésként álljon itt ennek a kémikusnak a neve: *H. Bouzige*s (a keresztnevét lehetetlen volt kinyomozni). Neve egyetlen publikációban szerepel, abban sem első helyen. [12]

Végül meg kell említeni, hogy a geológiai földtörténet körülbelül négyezer millió éve során a föld különböző pontjain számos helyen alakultak ki uránlerakódások, illetve uránérc-dúsulások és ezeken jelenleg is jelentős mértékű uránbányászat, illetve -kitermelés folyik. Eddig azonban a gaboni oklón kívül sehol nem fedezték fel annak nyomait, hogy összejöttek

6. ábra. Az oklói nyíltzíni uránércbánya





volna azok a természeti körülmények, amelyek lehetővé tették volna egy urán-235 láncreakció által működtetett nukleáris reaktor létrejöttét.

Paul Kazuo Kuroda és a visszamenőleges előrelátás

A francia kutatók által 1972-ben felfedezett és 1975-ben mérésekkel és vizsgálatokkal igazolt Oklói fosszilis ősraktor léteének nyilvánossá tétele, mint említettük, tudományos világszenzációvá vált és a tudományos közvélemény figyelmébe repítette Paul Kazuo Kuroda 1956-ban publikált és azóta teljesen elfelejtett közleményét. [8] Minden cikk, amely azóta mindmáig újabb és újabb részleteredményeket és igazolásokat közölt az Oklo-jelenség még jobb megismeréséhez és megértéséhez, csaknem kivétel nélkül idézi Kuroda 1956-os cikkét. Ezért is érdemes itt röviden visszatérni azokhoz a természeti körülményekhez, amelyeket Kuroda szükségesnek vélt ahhoz, hogy valahol sok ezer-millió évvel ezelőtt lehetővé válhasson egy urán-235 láncreakció alapján működő nukleáris reaktor működése.

Kuroda első előfeltétele szerint az uránérc-lelőhely mérete meg kellett haladja azt a távolságot, amit a maghasadást indukáló neutronok megtehetnek. Ez a távolság körülbelül háromnegyed méternyi. Ez a feltétel ugyanis biztosítja, hogy egy hasadó urán-235 magból kibocsátott neutron elnyelhet egy másik, a közelében lévő uránmag, mielőtt az kikerül az uránércből.

Kuroda második előfeltétele az urán-235 megfelelő koncentrációja volt. Manapság a legmasszívabb és legnagyobb koncentrációjú uránbánya vagy -lerakat sem válthat nukleáris reaktorrá, mert az urán-235 koncentrációja a jelenlegi 0,72% okán ehhez egyszerűen nem elegendő. Mint említettük, kétezermillió évvel ezelőtt az urán-235 koncentrációja körülbelül 3% volt.

A harmadik előfeltétel neutron-„moderátor” jelenléte volt, azaz egy olyan anyag, amely lassíthatja azokat a gyors neutronokat, amelyeket a hasadó urán-235 kibocsát, hogy ezáltal alkalmasabbá váljanak más uránmagok eltalálására, illetve hasítására. Ilyen moderátor lehet például a víz.

Végül az uránlelőhely közelében nem lehet jelen jelentős mennyiségű bór, lítium, vanádium, vagy más olyan „mérreg”, ami befogja a hasadás által termelt neutronokat és ezáltal elfojthatja a hasadási láncreakciót.

Később bizonyították, hogy ezek a feltételek Oklón és környékén nem is csak egy, hanem 17 helyen teljesülhettek kétezermillió évvel ezelőtt, így ott különböző ideig 17 természetes reaktor működött. Az itt idézett összefoglaló tanulmány [17] részletezi azokat a geológiai, ásványtani, izotópkémiai, neutronfizikai vizsgálatokat, amelyek hozzájárultak az Oklo-jelenség pontos magyarázatához, illetve Kuroda eredeti, vázlatos előrejelzéséhez.

A jelen szerző által létesített és szerkesztett nemzetközi folyóirat, a *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 1990-ben felkérte Kurodát, hogy a legilletékebbként ismertesse előrelátásának a körülményeit, illetve az Oklo-jelenséget. Ezt Kuroda meg is tette egy „The Pre-Fermi Natural Reactor” című cikkben. [20] Ekortól Kuroda rendszeres és hűséges szerzőjévé vált a folyóiratnak, és különböző nukleáris kémiai témákban 30 eredeti cikket publikált 1991 és 2000 között. Ezeket egy 2001-ben publikált cikkben foglalta össze. [21]

Amikor a folyóirat az ezredforduló kapcsán és Glenn T. Seaborg Nobel-díjas nukleáris kémikus emlékére ünnepi számot publikált 2000-ben, Kuroda felkérésre akkori érdeklődésének és kutatásainak megfelelően „Application of Nuclear Chemistry in the Study of the Universe” címmel [22] küldött be cikket.

Talán érdemes arról is említést tenni, hogy a tudományos közvélemény és a kolégák eleinte milyen kegyetlenül hálátlan módon bántak a forradalmian látnoki gondolatokat és eredményeket nyilvánító és publikáló Kurodával. Egy Oak Ridge-i konferencián jelen szerzőnek említette Kuroda, hogy többször hallotta a róla elhangzott mondatot: „if this idiot is an indication of the program at the University of Arkansas, there must be nothing there at all”. Kurodának ezt a kijelentését mások is hallották tőle és le is írták egyik nekrológiájában. [23]

Az Oklo-jelenség felfedezése után Kurodát az egész világon elismerték és nagyra tartották. Egyedül, illetve társszerzőkkel élete során több mint 400 közleményt publikált.

Utószó

A világ, helyesen, úgy tudja és messzemenően elismeri, hogy tudományos elveken alapuló műszaki fejlesztésként a nukleáris reaktort Enrico Fermi és Szilárd Leó találta fel 1942-ben. Jelen írás szerzőjének tudomása szerint sem Fermi, sem Szilárd talál-

mányukért anyagi juttatást, illetve javadalmazást soha nem kértek és nem is kaptak.

Mint 1972-ben kiderült, a nukleáris reaktort a természet (angolul jobban hangzik: mother nature) már körülbelül kétmilliárd évvel ezelőtt megalkotta. Úgy tűnik, hogy az emberiség tudományos és műszaki fejlődése során ez az egyetlen ismert példa arra, hogy a természet ön maga képes volt előállítani kedvező természeti körülmények összjátéka révén egy olyan műszaki berendezést, amit az ember gondolkodásának eredményeként, nem a természetet utánozva, hanem attól függetlenül alkotott meg. Ennek fordítottjára, azaz arra, amikor az ember a természetet utánozva műszaki alkotásokat hoz létre, számos példa ismert.

IRODALOM

- [1] Juhász József, Szőke István, O. Nagy Gábor, Kovács Miklós, Nagy értelmező szótár, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972.
- [2] http://brainyquote.com/quotes/authors/n/niels_bohr.html, lekérve: 2012. 10. 09.
- [3] <http://wikipedia.org/wiki/Maghasad%C3%A1s>, lekérve: 2012. 09. 05.
- [4] <http://wikipedia.org/wiki/Nukle%C3%9C%C3%A1lncrac%C3%B3>, lekérve: 2012. 09. 05.
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1
- [6] <http://oklo.curtin.edu.au/who.cfm>, lekérve: 2012. 08. 23.
- [7] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Atomreaktor>
- [8] P. K. Kuroda, J. Chem. Phys. (1956) 25, 781.
- [9] <http://nuclearweaponarchive.org/France/FranceOrigin.html>, lekérve: 2012.10.08.
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Force_de_Frappe, lekérve: 2012, 10.08.
- [11] F. Gauthier-Lafaye, F. Weber, Precamb. Res. (2003) 120, 81
- [12] R. Bodu, H. Bouziges, N. Morin, J. P. Piffelman, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. D (1972) 275, 1731.
- [13] N. Neuilly, J. Bussac, C. Freyjacques, G. Nief, G. Vendryes, J. Yvon, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. D (1972) 275, 1847.
- [14] G. Badin, C. Blain, r. Hagemann, M. Kremer, M. Lucas, L. Merlivat, R. Molina, G. Nief, F. Prost-Marechal, F. Regnaud, E. Roth, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. D (1972) 275, 2291.
- [15] R. Naudet, La Recherche (1975) 6, 508.
- [16] M. E. Wieser, S. Barry, J. R. De Laeter, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2012) 293, 949.
- [17] A. P. Meshnik, Scientific American (2005) november, 57.
- [18] http://www.erdekessegek.hu/index_13_12.htm
- [19] https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:amum-AqpdAAJ:atomeromu.hu/download/177/Hasad%C3%A1s%2520reaktorok%2520a%2520F%25C3%25B6ld%2520felsz%25C3%25A9n%25C3%25A9n.pdf+Hasad%C3%A1s+reaktorok+a+F%25C3%B6ld+felsz%C3%A9n%25C3%A9n&hl=en&gl=hu&pid=bl&srcid=ADGEESiHoqZtklpXRH7oNVsAaw_pf7xJnMU9FQ-skrA3M-4qWGVw4qjoaifOgAGSYg3U-dHDxKAA95FK-8GvXhFXL-vVjfq1Aaig7ykB2YQZ156MZE4Bd3-Wtn1GLrIrwX2lBJSjTrq&sig=AHIEtbS_g4N7IkmzUC0pBIWik_PLUYf18A
- [20] P. K. Kuroda, J. Radioanal. Nucl. Chem. (1990) 142, 101.
- [21] P. K. Kuroda, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2001) 247, 249.
- [22] P. K. Kuroda, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2000) 243, 141.
- [23] A. M. Robertson, Paul Kazuo Kuroda (1917–2001), <http://www.encyclopediaofarkansas.net/encyclopedia/entry-detail.aspx?ID=6619>, lekérve: 2012. 09.19.