

hanem olyan könnyű atomokon is lehet mérni, amelyek fluoreszcens vonala túl alacsony energiájú a normál röntgenholográfia-mérésekhez. Meg kell azonban jegyezni, hogy a fékezési sugárzás használatával elveszítjük az elemselektivitást, a hologram az összes atom környezetének átlagát mutatja.

A másik, a röntgenholográfiával rokon módszer a nukleáris rezonanciaholográfia [7, 15]. Itt a nukleáris rezonanciaabszorpciót, vagyis a Mössbauer-effektust használjuk a hologram létrehozására. A mérés legegyszerűbben az inverz elrendezéssel valósítható meg. A sugárzást adó radioaktív forrást mozgatóval, a Doppler-effektus felhasználásával lehet a rezonanciaabszorpció vonalára hangolni. A sugárzást most nem az atom elektronjai, hanem az atommag nyeli el. Abszorpció előtt a sugárzás szóródhat a környező atomokon. A szórás most nemcsak az elektronokon történhet, hanem – rezonanciaszórással – az atommagokon is. A sugárzást elnyelő atommag a szórt sugárzás és a szórás nélkül érkező (referencia-) nyaláb interferenciáját érzékeli. Az abszorpció után az atom vagy egy fotont, vagy egy (ún. konverziós) elektront bocsát ki. A mérésben a detektor ez utóbbiakat számolja meg a beeső sugárzás irányának a függvényében. Mivel mágneses térben az atommag energiaszintjei felhasadnak, a nukleáris rezonanciaholográfia érzékeny a mágneses térre és az atom mágneses momentumára. *Korecki* és munkatársai a közelmúltban magnetitkristály vasatomjainak környezetét vizsgálták. A magnetitben a vasatomok kétféle mágneses állapotban vannak. A berendezést az egyik vagy a másik állapotnak megfelelő energiára hangolva külön lehetett hologramot kapni a kétfajta atom környezetéről [16].

A fenti példák közül is látható, hogy az atomi felbontású röntgenholográfia belépett az atomi szerkezetet vizsgáló módszerek közé. Az is nyilvánvaló azonban, hogy a módszer széles körű elterjedéséhez még komoly fejlesztésekre van szükség a kísérleti technikákban és elméleti téren is.

Irodalom

1. W.L. BRAGG – Proc. Camb. Phil. Soc. 17(1913) 43
2. D. GABOR – Nature 161 (1948) 777
3. GÁBOR DÉNES a *Nobel-díj átadásakor tartott előadása* – Fiz. Szemle 50 (2000) 181
4. A. SZÖKE: *Generation and Applications* – in Short Wavelength Coherent Radiation (eds. D.T. Attwood, J. Boker, New York, AIP) AIP Conf. Proc. 147 (1986) 361
5. L.S. BARTELL – Trans. Am. Crystallogr. Assoc. 8 (1972) 37; L.S. BARTELL, C.L. RITZ – Science 185 (1974) 1163; L.S. BARTELL, R.D. JOHNSON – Nature 268 (1977) 707
6. D.K. SALDIN, P.L. DE ANDRES – Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 1270; G.R. HARP, D.K. SALDIN, B.P. TONNER – Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1012
7. M. TEGZE, G. FAIGEL – Europhys. Lett. 16 (1991) 41
8. M. TEGZE, G. FAIGEL – Nature 380 (1996) 49; FAIGEL GYULA – Fiz. Szemle 47 (1997) 206
9. T. GOG, P.M. LEN, G. MATERLIK, D. BAHR, C.S. FADLEY, C. SANCHEZHANKE – Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3132
10. M. TEGZE, G. FAIGEL, S. MARCHESINI, M. BELAKHOVSKY, A.I. CHUMAKOV – Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 4847
11. M. TEGZE, G. FAIGEL, S. MARCHESINI, M. BELAKHOVSKY, O. ULRICH – Nature 407 (2000) 38
12. S. MARCHESINI, F. SCHMITHÜSEN, M. TEGZE, G. FAIGEL, Y. CALVAYRAC, M. BELAKHOVSKY, J. CHEVRIER, A. SIMIONOVICI – Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 4723
13. K. HAYASHI, M. MATSUI, Y. AWAKURA, Y. KANEYOSHI, H. TANIDA, M. ISHII – Phys. Rev. B63 (2001) 041201(R)
14. S.G. BOMPADRE, T.W. PETERSEN, L.B. SORENSEN – Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 2741
15. P. KORECKI, J. KORECKI, T. SLEZAK – Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 3518
16. P. KORECKI, M. SZYMONSKI, J. KORECKI, T. SLEZAK – Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 205501

JÉGKORSZAKOK CIKLUSOS VÁLTAKOZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE A NEOGÉNEN

Schweitzer Ferenc
MTA Földrajztudományi Kutatóintézet

A probléma elméleti előzményei

A jégkorszak, vagy ahogyan korábban gondolták, a legendás bibliai vízözön – amelyet dilúviumnak is hívtak – az északi féltekén, a messze délre lenyúló jégtakarók, kiterjedt gleccserárkok, a gyapjas orrszarvú, a hosszú szőrű mamut, a félelmetes barlangi medve, a barlangi farkas és az ősember kora volt (*1. ábra*).

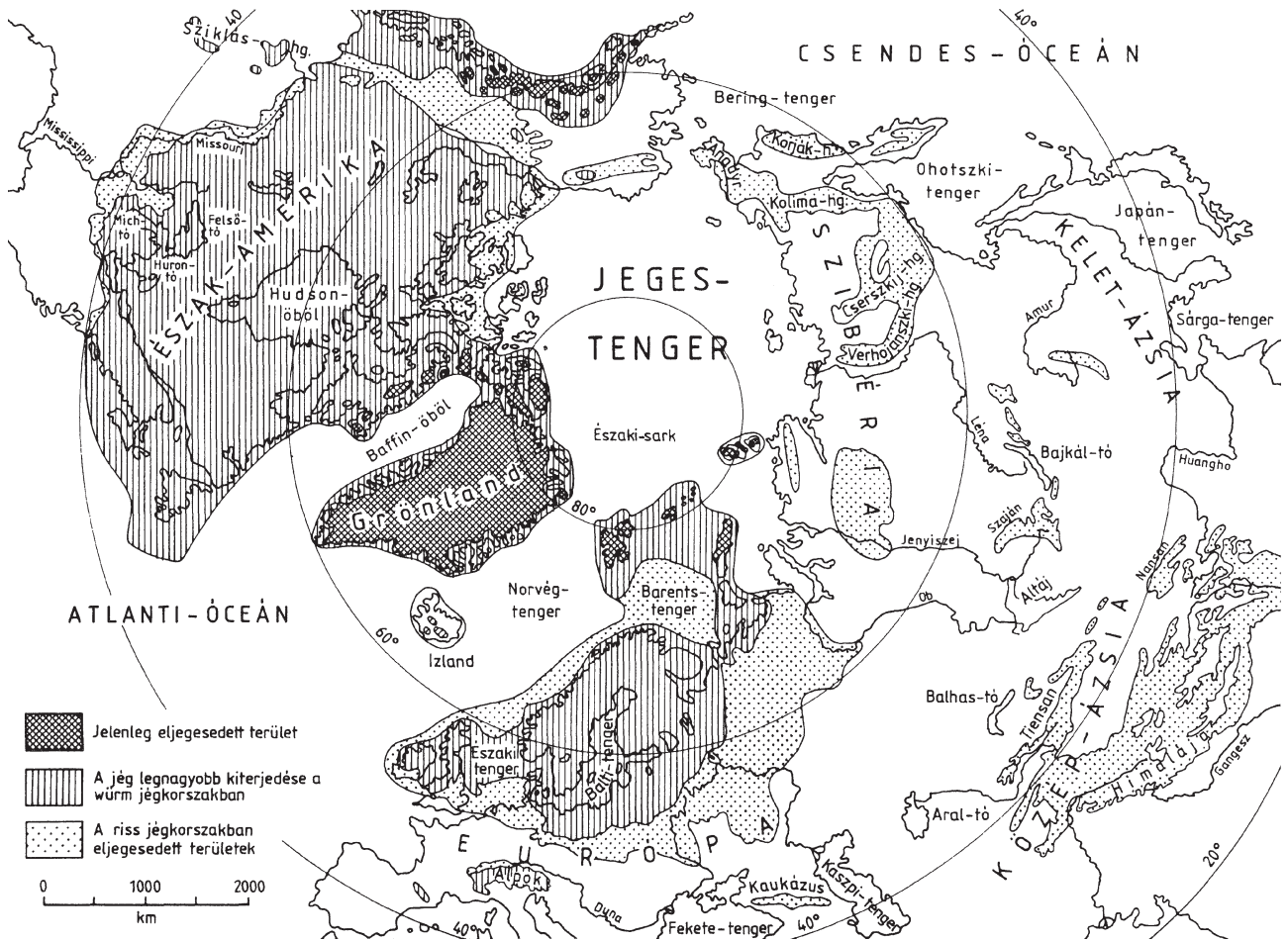
A Földön az egyik legjelentősebb, legátfogóbb környezetváltozást, az éghajlati lehűlést az eljegesedett és jégmentes időszakok kialakulása és ismételt váltakozása okozta. Amikor a Földön állandó jégtakaró halmozódik fel, globális jégkorszakról beszélünk. A jégkorszakok kialakulását sokféleképpen magyarázzák, sokféle elmélet született, amelyeket két csoportba sorolhatunk.

Az első csoportba az úgynevezett extraterresztrikus elméletek tartoznak, amelyek a jégkorszakokat csillagá-

szati okokra vezetik vissza. Egyesek a Nap sugárzási energiájának a csökkenésével, mások az űrben lévő kozmikus por egyenlőtlen eloszlásával magyarázzák a földi klímaváltozások okait [1, 2].

A nagy jégkorszakok ismétlődését (a proteozoikumban, a karbon és a perm, illetve a neogén és a pleisztocén határán) sokan magyarázzák a „kozmosz évvel” (190–200 millió év). Ekkor a Nap pályájának azon a szakaszán halad át, amely legtávolabb van a Galaktika középpontjától, és annak minimális csillagsűrűségű szegélyén helyezkedik el. Ekkor általános lehűlés, „kozmosz tél” következik be. *Scsukin* szerint [3] például ha a világtengert 3 milliárd évesnek tekintjük, azóta a Földön 15–20, nagy eljegesedéssel járó „kozmosz télnek” kellett lennie.

A jégkorszakok létrejöttét magyarázó elméletek másik csoportjába a terresztrikus magyarázatok tartoznak. Ilyen például a *Wegener* által értelmezett kontinens- és pólus-



1. ábra. Az északi félgömb jelenleg és a pleisztocénben eljegesedett területei

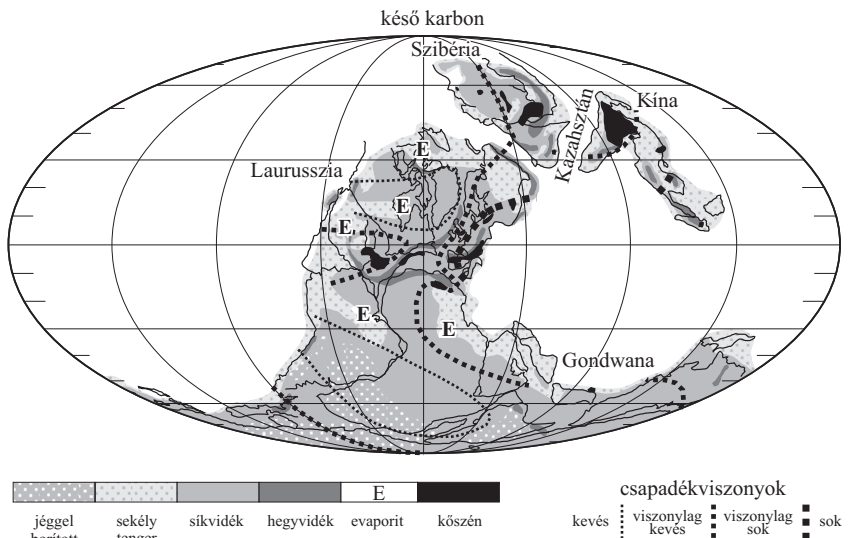
vándorlás [4]. Wegener elsősorban az ókori eljegesedést igyekszik ezzel az elmélettel megmagyarázni. Szerinte a mai Dél-Afrika csúcsánál futottak össze a kontinensek és alakult ki egy antarktikus jégcsapka. Az eljegesedések további okai között szerepel például a Golf-áramlat hipotézise. Eszerint a Golf-áramlat nyugatra, Észak-Amerika partvidéke felé tért ki, így melegítő hatása elmaradt. Mások például a tengerszint változásokban keresik az eljegesedések okát [5, 6].

Az Antarktisznak ebben nagyjából ugyanaz a szerep jutott, mint a Gondwana szárazulat központi részének a perm eljegesedés idején (2. ábra). A Perm időszakban a szárazföldek eljegesedése hasonló lehetett, mint ma az Északi-sarkvidéken. Miután az Antarktisz a lemeztek-

2. ábra. A kontinensek eloszlása a késő karbon idején a sekélytengeri és a síkvidéki szárazulati területekkel, a hegylancok helyzetével, az evaporit- és kőszen-előfordulási területekkel, valamint a csapadékeloszlási képpel [9].

A jégkorszakok létrejöttének főbb okai

Véleményem szerint a jégkorszakok kialakulásának egyik legfőbb oka – Wegener és *Du Toit-Alex* felfogásához hasonlóan [4, 7], és természetesen sok más elmélet mellett – lemeztektonikai eseményekben keresendő. Ha egy nagy kiterjedésű kontinens valamelyik pólus – Déli- vagy az Északi-sark – területére kerül, akkor ott a be- és a kisugárzási negatív egyenleg, az albedó hatására önfokozó lehűlés – az ezzel járó hó-, illetve jégfelhalmozódás – kezdődik meg.



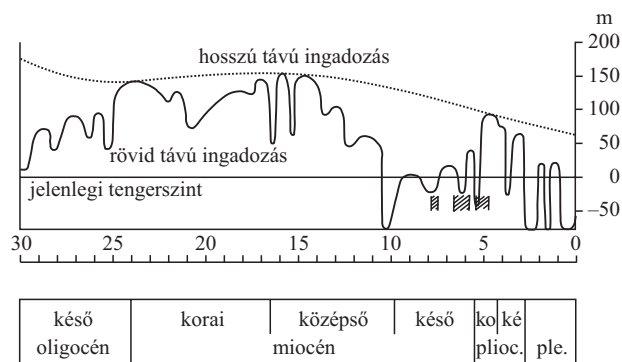
tonikai mozgások következtében az oligocén vége felé a Déli-sark területére került, emiatt ott körülbelül 30–32 millió évvel ezelőtt már jelentős jégfelhalmozódás következhetett be, amelyet a miocénben (25 és 5,3 millió év között) feltehetően több is követhetett. Így például a 7,5 millió évvel ezelőtti jégfelhalmozódás is, amikor a pleisztocén jégtakarónál kétszer nagyobb, egypólusú eljegesedés alakult ki az Antarktiszon, ami a lemeztectonikai mozgások és a világtengerek jelentős vízszintcsökkenése miatt hozzájárult a Gibraltári-szoros elzáródásához, továbbá az úgynevezett messinai sókrízis kialakulásához, amikor a Földközi-tenger kiszáradt medencéjében anhidrit- és vastag sótelepek képződtek [8]. A Kárpát-medencében erre az időszakra esik a Pannóniai-tó feltöltődése és kiszáradása. Ekkor a Kárpát-medence területén és környezetében sivatagi kérgek képződtek és zsiráfok éltek.

A K/Ar-vizsgálatok alapján mintegy 4,4–3,5 millió évvel ezelőtt az Antarktisz nyugati részén a jégtakaró elolvadt, parti vizeinek hőmérséklete pedig 8–10 °C-kal volt magasabb a mainál. Ezzel egy időben a világtengerek szintje mintegy 60 m-rel emelkedett meg a jelenlegihez képest, a transzgresszió nyomán pedig kinyílt a Bering-szoros [10]. A Kárpát-medencében és az Orosz-síkságon ebben az időszakban képződtek a vörösagyagok is.

Figyelemre méltó, hogy a Déli-sark 30–32 millió éves eljegesedésétől kezdve – amely kezdete volt a napjainkban is tartó újkori globális jégkorszaknak – több olyan ritmusosan is visszatérő földtörténeti ciklusokat (pl. a 17–18, a 13–14, a 6–7,5 és az 1,4–0,10 millió év) különböztetünk meg, amelyek *Haq* és munkatársai vizsgálatai [11] alapján a világtengerek vízszintcsökkenéséhez kapcsolódnak. E folyamatnak a jégkorszakokkal kapcsolatos értelmezése – miután jelentős vízszintcsökkenések kapcsolódnak hozzá, feltehetően a hatalmas jégtömegek képződése miatt – újszerű lehet [12] (3. ábra).

A legutolsó globális lehűlés az északi féltekén az Északi-sark környékén megjelenő állandó jégtakaróhoz kapcsolható, amelyet később (kb. 1,2–1,7 millió évvel ezelőtt) követett a mérsékelt öv lehűlése és a kontinentális fokozódása. Ennek hatására kezdődött el a napjainkban is tartó lehűlési időszakok (glaciálisok) és felmelegedési szakaszok (interglaciálisok) ritmusos váltakozása, amely jelenleg is tart. Valószínű, hogy az Északi-Appenninek evaporitciklusai (10 ilyen ciklusról tudunk), amelyek a messinai sókrízis alatt képződtek, ugyanolyan rangú klímaesemények, mint amilyenek létrejöttek az utolsó 1,2–1,7 millió év alatt az Alsó-Biharium végén és a Felső-Bihariumban, amit jégkorszaknak tartunk [13].

A pliocénben az úgynevezett csarnóitai (4,2–3 millió év közötti) időszak meleg–nedves vörösagyagképző klímája és erdei flórája-faunája – nagy emlős faunájában tapírokkal, pandákkal – hirtelen klímaváltozás hatására átalakul, és száraz, kezdetben száraz–meleg klímával, tevés, struccos (ezt Kislángon találták meg) faunával a Villányium (3–1,8 millió év közötti időszak) következik, amely fokozatosan száraz–hideg (Alsó-Biharium; mamut, gyapjas orrszarvú, barlangi medve, hód stb.) éghajlati viszonyokat hoz. Ezek élesen elkülönülnek a pliocéntól, de a Villányium egészétől is [13].



3. ábra. Eusztatikus tengerszint-ingadozások a földtörténet utolsó 30 millió éve során a tengerszintváltozások hozzávetőleges nagyságával [11].

A pliocén–pleisztocén – vagy a sok esetben használatos neogén–antropogén – határt az 1960-as évek előtt *Milanković* számításai alapján 600 000 évben adták meg, amely megegyezik az Alpok első jelentősebb (Günz) eljegesedésének kezdetével. Miután a Günz eljegesedésnek több korábbi stadiálisát, illetve a 600 000 évnél idősebb glaciálisok – Donau (Eburon), Biber (Pretegele) – nyomait is kimutatták, ezek a pleisztocén időtartamát jelentősen megnövelték, bár az Eburonban például nem tudnak egyértelmű eljegesedésről. Így sokan a Günz előtti eljegesedéseket 2,5 millió évre vezetik vissza, de vannak olyan adatok is (pl. Alaszkából), ahol a határt 3 millió évre datálják (4. ábra).

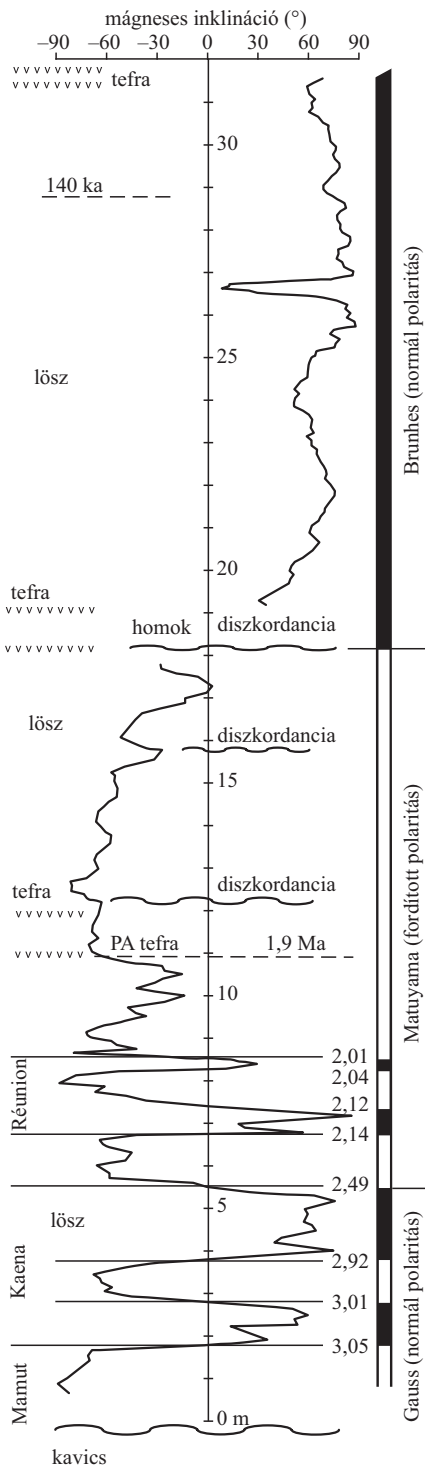
A pleisztocén időszak meghosszabbítását elősegítette az a körülmény is, hogy az ember megjelenésének korát mindig a negyedidőszakkal igyekeztek azonosítani. (Az olduvai lelőhelyek 1,7–1,8 millió évesek.) A Nemzetközi Rétegtani Bizottság a pliocén–pleisztocén határt az 1,8 millió éves calabiai Vrica-szelvényben rögzítette, amely az olduvai paleomágneses eseményekhez kötődik.

A jégkorszak „helye” a pleisztocénben

A globális lehűlés – de nem az eljegesedés – első fontos bizonyítékát az Északi-tengerre jellemző állatfajoknak a Földközi-tengerben való megjelenése jelzi, ami arra utal, hogy a Földközi-tenger vize körülbelül 2,2–2,3 millió évvel ezelőtt kezdett lehűlni és megindult a vízcsera az Atlanti-óceán és a Földközi-tenger között.

Az idő tájt a Földközi-tenger mellékén még tartott a szubtropikus klíma, de már megjelentek a *Globarotolia inflanták*, illetve a norvég hideg áramlás hatására a *Hyalinea balticák*, főként Olaszország partjain. Ez *Funder* és munkatársai szerint [14] 1,8–1,4 millió év között következett be, ami a Kárpát-medencében az Alsó-Bihariumnak felel meg.

Ám az északi „vendégek” nem lehetnek bizonyítékok a plio–pleisztocén, illetve a jégkorszaki határ megvonásához, de azok a napjainkban boreális elterjedésű lemmingek vagy a *Canis arvensis*ek sem, amelyeket *Kordos* határozott meg [15] Esztramosról. *Easterbrook* és *Boellstraft*, valamint *Funder* és munkatársai szerint [16, 14] az északi féltekén ebben az időben – ez lényegében az Alsó-Biharium – a Golf-áramlat mélyen behatolt az arktikus óceánba. Az északi-sarki medence emiatt jégmentes



4. ábra. A Gold Hill Loess mágneses sztratigráfiai szelvénye a 6. feltárásban. Az irányított mintákat 10 cm-enként vették, szintenként kontrollmintával; az inklinációs görbét három pontra vonatkozó átlagértékekre illetve simították. A természetes mágnesezettség után a minták 200 Oe-ig normál, 300 Oe felett pedig fordított mágnesezettséget mutatnak. Az Old Crow tefrát ezen a helyen nem sikerült kimutatni, de ugyanebben a sztratigráfiai szintben azonosították az aranybányászat során, amikor a löszfal délebbre húzódott. A tefrát petrográfiai és geo-kémiai ismérvek alapján azonosították.

volt, amelyet a grönlandi és a Koppenhága-foki szelvények bizonyítanak. Ugyancsak erre bizonyíték a *Portlandica arctica*, amelyet a Csukcs- és a Seward-part mentén talált Funder [14].

Ákár a 2,4 millió évet, akár az 1,7 millió évet fogadjuk el a pliocén–pleisztocén határaként, a világtengerek szintje a korai glaciálisok során még nem csökkent a sarkok és a tengeri jégképződés hatására. A vörösgyagyképző csarnótai meleg–nedves időszakot követően 4,5–3,0 millió év után Európa kontinentális területein – így a Kárpát-medencében és környezetében – erdőtlen pusztai, füves vegetáció alakult ki, amelyet még mindig a száraz–meleg sztyepfauna elemek megjelenése jellemzett. Ide tartoznak a kislángi kavicsok a struccfossziliával, az ercsi kavicsok a déli elefántleletekkel, a Gerecse peremén a nagy vastagságú travertino-összletek éppen úgy, mint a legidősebb, az Obrucsev-féle úgynevezett meleg időszaki löszök kialakulása (pl. Dunaalmáson, Szekszárdon, Dunaföldváron, Titelen vagy Szlankamenen). Ide tartozik továbbá a kínai lishi lösz, a tiraszipoli és a nyikolajevi löszök alsó része is Moldáviában. Ehhez az időszakhoz tartoznak a villányi-hegységi, a süttöi és a beremendi vörös agyaggal kitöltött hasadékrendszerek, amelyek a középhegységeink jelentős részét feldaraboló törésvonalakhoz kapcsolódnak. Hasonlókat figyelhetünk meg a Kárpát-medencén kívül is (pl. a Dalmát-tengerparton, Susak szigetén).

A pleisztocénen belül az első egyértelmű glaciális hatás, a jégkorszak megjelenése körülbelül 1,2–1 millió évvel ezelőtt kezdődött – ez a Kretzoi-féle Alsó- és Felső-Biharium határ –, majd folytatódott a ciklikusan ismétlődő, napjainkig tartó glaciális és interglaciális környezeti változásokkal.

Az Alsó- és Felső-Biharium határán a skandináv hegységekben hatalmas gleccserek alakultak ki, amelyek együttesen óriási jégtömegekké folytak össze. Ez a hatalmas jégtömeg azután Grönland jégtakarójával került összefüggésbe, és Európa, illetve Észak-Amerika egész északi részét 2–3 km vastagságban elborította. Az Alsó- és a Felső-Biharium határához kapcsolhatók például a Don-medence középső részén a kristályos vándorkövek az úgynevezett alsó-gori rétegekben, amelyekre az odesszai–tamáni típusú emlős fauna jellemző. Korukat sokan az olduvai eseményekkel hozzák kapcsolatba, de még többen (pl. [10]) 1,0–1,1 millió évre datálja. A kárpát-medencebeli paleontológiai leletek is ezt igazolják. A Felső-Bihariumban ugyanis domináns állatfaj volt a medence területén a gyapjas orrszarvú, a rénszarvas, a jávorszarvas, a pézsmatulok, az ősbölgény vagy a mamut. Ekkor alakultak ki a fakó sárga, főként csernozjom-talajokkal tagolt, úgynevezett hideg időszaki löszök és az I–V. számú folyóvízi teraszok is. Ekkor történt a periglaciális domborzatformálódás a krioplanációs, szoliflukciós folyamatok dominanciájával, amelyek végül kialakították a Kárpát-medence mai domborzatát.

Irodalom

1. A.L. BERGER: *Pleistocene climatic variability at astronomical frequencies* – Quaternary International 2 (1989) 1–14
2. R.W. FAIRBRIDGE: *Climatology of glacial cycle* – Quaternary Research 2 (1972) 283–302
3. I.Sz. SCSUKIN: *Obscsaja geomorfologija* Tom 1. – Moszkva, Izd. Moszkovszkogo Univ., (1960) 614 old.
4. A. WEGENER: *Die Entstehung des Kontinents und Oceans* – Vie weg (1915)
5. F. ENQUIST: *Der Einfluss des Windes auf die Verteilung der Gletscher* – Bul. Geol. Inst. Uppsala 14 (1916)

6. C. EMILIANI: *The Pleistocene record of the Atlantic and Pacific oceanic sediments* – Progress in Oceanogr. 4 (1967) 219–224
7. L. DU TOIT-ALEX: *Our Wandering Continents* – Antarctic Journal of the U.S. 5 (1970) 83–85
8. K.J. HSU, W.B.F. RYAN, M.B. CITO: *Laté Miocéné Dessication of the Mediterranean* – Nature (1973) 240–244
9. Y. TARDY, C. ROQUIN: *Dérive des continents* – Paléoclimats et altérations tropicales. Orleans, Ed. BRGM, (1998) 473 old.
10. V.A. ZUBAKOV, I.I. BORZENKOVA: *Global Paleoclimate of the late Cenozoic* – Elsevier (1990) 456 old.
11. B.U. HAQ, J. HARDENBOL, P.R. VAIL: *Chronology of Fluctuating Sea-levels since the Triassic* – Science 235 (1987) 1156–1167
12. F. SCHWEITZER: *Jégkorszakok képződésének lehetősége a Neogénben* – Előadás, MTA X. Földtudományok osztálya (2003)
13. M. KRETZOI: *A negyedkor tagolása a gerinces fauna alapján* – Acta Geol. 2/1–2 (1953) 67–76
14. S. FUNDER, N. ABRAHAMSEN, D. BENNIKE, R.W. FEYLING-HANSEN: *Forrested Arctica: Evidence from North Greenland* – Geology 13 (1985) 542–546
15. L. KORDOS: *Neogene Vertebrate Biostratigraphy in Hungary* – Földt. Int. Évi Jel. 1984-ről (1987) 523–553
16. D.J. EASTERBROOK, J. BOELLSTRAFT: *Paleomagnetic chronology of „Nebraskan–Kansas” tills in Midwestern U.S.* – in: Quaternary Glaciation of the North Hemisphere 6 (1981) 72–82

SZABÁLYOZOTT MAGFÚZIÓ MÁGNESES ÖSSZETARTÁSSAL I. – AZ ALAPOK

Zoetnik Sándor

KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet,
Magyar EURATOM Fúziós Szövetség

A huszadik század gyors ipari fejlődése hatalmasra növelte a modern társadalmak energiaigényét, amelyet eddig leginkább fosszilis energiahordozók (szén, szénhidrogének) elégetésével fedeztünk. Általánosan elfogadott vélemény, hogy évszázados távlatban ez nem folytatható sem a források kimerülése, sem a nagy mennyiségű szén-dioxid-kibocsátás miatt. A nukleáris energetikával foglalkozó kutatók régi álma, hogy a Nap energiaforrását, azaz a könnyű atommagok egyesítéséből (fúziójából) nyerhető energiát az emberiség szolgálatába állítsák. A mai atommaghasadáson alapuló erőművekhez hasonlóan ez sem termelne szén-dioxidot, és kiinduló anyagai egyenletesen elosztva korlátlanul rendelkezésre állnak.

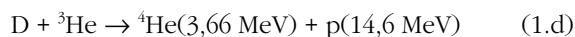
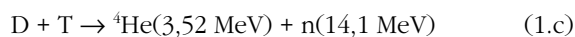
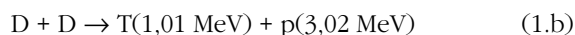
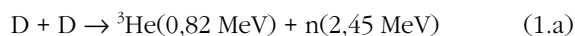
A szabályozott magfúziós kutatások az 1950-es évek elején kezdődtek. Miután a szabályozatlan fúziós energiaszabadítást *Teller Ede* kezdeményezésére a hidrogénbomba formájában egy évtized alatt megvalósították, úgy becsülték, hogy a békés célú alkalmazás sem igényelhet 30–40 évnél több időt. Sajnos ez a bizakodás a tudatlanság optimizmusának bizonyult, mivel a kísérletek előrehaladásával egyre több probléma került felszínre. Ma, 50 évvel a munka megindítása után ismét úgy látjuk, hogy 30–40 év múlva avathatjuk fel az első demonstrációs erőművet. Ez érthető okokból azt a véleményt váltja ki a külső szemlélőből, hogy 50 év alatt nem történt semmi. Ebben a két részből álló cikkben azt szeretnénk megmutatni, hogy ma egy 50 éves szisztematikus kutatási és fejlesztési folyamat alapján megalapozottan reméljük, hogy a fúziós energia-termelés belátható idő alatt megoldható. A cikk összefoglalja az alapokat, a téma történetét, a kutatások mai állását és a következő évek várható fejleményeit.

Az alapok

Mint közismert, az atommagokban az egy nukleonra jutó kötési energia az 50-es tömegszám körül maximális, így mind a nagyobb atommagok hasításával, mind kisebbek

egyesítésével energia nyerhető. A mai nukleáris erőművek az atommagok hasítását valósítják meg. Neutronok segítségével egyes atommagok különösebb befektetett energia nélkül széthasíthatók, ezzel szemben a kisebb magok egyesítésénél a fúziós reakció létrejöttéhez mindenképpen két atommagot közel kell egymáshoz juttatnunk, ami a töltött magok Coulomb-taszítása miatt jelentős energiabefektetést igényel.

A Coulomb-gát legyőzéséhez szükséges, nagyságrendileg 10 keV energiájú magokat gyorsítóval könnyen elő lehet állítani, így a magreakciók jól ismertek. Alább felsoroljuk a szóba jövő legfontosabb reakciókat (zárójelben a keletkező magok energiája):



A fentiekén kívül további, magasabb rendszámú magokból kiinduló reakciók is ismertek (pl. ${}^3\text{He}$ – ${}^3\text{He}$, p – Be), azonban ezekben a magok magasabb rendszáma miatt a Coulomb-gát is magasabb, így technikailag biztosan nehezebben valósíthatók meg. Meg kell jegyezni, hogy a Nap belsejében több fúziós reakcióból összeálló körfolyamat termeli az energiát, azonban ezek közül némelyik csak igen kis valószínűséggel következik be, így földi körülmények között nem alkalmas energiatermelésre.

Energetikai szempontból a fenti reakciók közül az (1.c) D–T reakció a legalkalmasabb, mivel küszöbenergiája a legalacsonyabb és mégis nagy mennyiségű energiát szabadít fel. Sajnos ennek a reakciónak hátránya, hogy a trícium radioaktív elem (béta-bomló) és így a természetben jelentős mennyiségben nem fordul elő, valamint hogy sok és nagyenergiás neutron keletkezik. A két D–D reakció alkalmasabb lenne, mivel deutérium körülbelül 1:6000 koncentrációban fordul elő földi hidrogén-