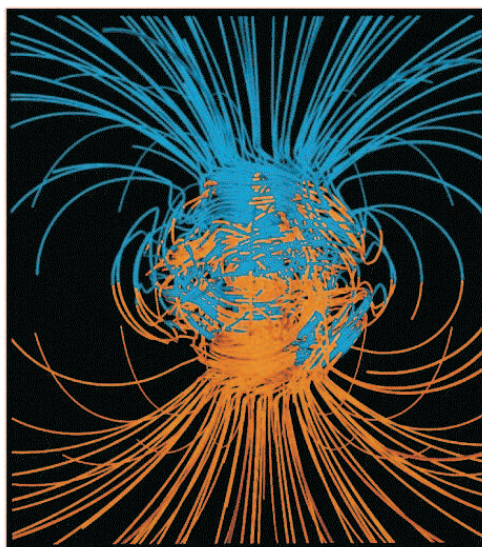


A geomágneses tér pólusváltásairól.

A mágneses tér erővonalai behálózzák az egész Világegyetemet. Az erővonalak sűrűsége, amely a mágneses tér nagyságával arányos, helyről-helyre változik, a napfoltokban pl. milliószor akkora ($\approx 10T$) mint a Föld felszínén ($\approx 20\mu T$), de valószínűleg sehol sem nulla, még az intergalaktikus térben sem. Elektromos mezőt azonban a csillagászok sehol sem látnak — el van bújtatva az atomok belsejében. Ez főleg azért van így, mert az elektromos tér erővonalai a különböző előjelű töltéseket kötik össze egymással és ezért véges hosszúságúak. Mágneses töltések (monopólusok) viszont nincsenek, ezért a mágneses erővonalak mindkét irányban végtelen kiterjedésűek, így elvben akár egyetlen erővonal is képes lehet sűrűn beborítani az egész Világegyetemet.



Az iránytű mutatja, milyen irányú a tű tengelyén áthaladó erővonal. Ha ezt az irányt követve elindulnánk az erővonal mentén, rendkívül komplikált görbét írnánk le, amely össze-vissza tekeregne a Föld belső tartományai-ban, időnként felbukkanna a felszínre, majd egy ilyen felbukkanás után egyszer csak nem találna többé vissza, hanem a Napban folytatódna, amelytől előbb-utóbb szintén elszakadna és hosszas kalandozások után eljuthatna a Világegyetem legtávolabbi zugába is — és még ott sem lenne vége. Egy ilyen

erővonal mentén úgy kalandozhatunk a Kozmoszban, ahogy annak idején Paganel Jakab a karoszékében ülve szelte át keresztül-kasul a kontinenseket. A számítógépes szimuláció (ld. az ábrát), amelyről később lesz részletesebben szó, hozzávetőleges benyomást ad az erővonalak kusza gombolyagáról a Föld magjában.

Ez az erővonalkép állandó mozgásban van. Minden egyes erővonal úgy tekereg, mint valamiféle kozmikus méretű fonálféreg, de az egész erővonalképnek szisztematikus változása is van: lassan forog nyugati irányban. Ezt a mozgást azért lehet könnyen észlelni, mert a mágneses pólusok nem esnek egybe a földrajzi pólusokkal és lassan megkerülik a Föld forgástengelyét.

Vannak azonban ennél meglepőbb változások is, az u.n. *pólusváltások*, amelyek során a mágneses pólusok néhány ezer év alatt helyet cserélnek egymással. Ha most bekövetkezne egy ilyen pólusváltás, az iránytű beszínezett vége, amely eddig az északi földrajzi pólus felé mutatott 180 fokos fordulatot tenne és ezután már a déli földrajzi pólus felé mutatna.

Erről a jelenségről a *paleomágneses mérések* tudósítanak. A folyékony láva bazaltja gyengén mágneses tulajdonságú és megszilárdulásakor a mágneses szemcsék mint természetes mikroszkópikus iránytűk a mágneses tér pillanatnyi irányába állva rögzülnek. 1906-ban azonban *Bernard Brunhes* francia fizikus a jelenlegi mágneses mezővel ellentétesen orientált mágneses kőzetekre bukkant és ez indította arra a merész feltevésre, hogy a földi mágneses tér iránya valamikor régebben talán a maival ellentétes lehetett. Ezt a feltevést fél évszázadon keresztül vitatták, de azóta a Föld egész területére kiterjedt rétegvizsgálatokban pólusváltások sokaságát azonosították a földtörténet utolsó 170 millió éves korszakában, a Jurától napjainkig, amelyeknek a realitásában ma már senkisé sem kételkedik. A legutóbbi váltás 780 ezer éve volt, és már nagyon esedékes, mert az utóbbi 15 millió évben átlagosan 200 ezer évenként történt egy átfordulás. A váltások azonban nem voltak mindig ilyen gyakoriak: A Krétában pl. úgy 100 millió évvel ezelőtt csaknem 40 millió éven keresztül egyáltalán nem történt pólusváltás (az ilyen mágnesesen feltűnően nyugodt korszakokat hívják *superkronnak*).

Az utóbbi ötven évben ezek az ismeretek szilárdan beépültek a geofizika alaptényeinek a sorába anélkül azonban, hogy a geofizika képes lett volna bármilyen magyarázattal szolgálni rájuk. Úgy látszott, hogy minden többé-kevésbé hagyományos magyarázatot eleve kudarcra ítél *a pólusváltások rendkívüli hirtelensége* (a váltás 1000-6000 év alatt végbemegy), ami geofizikai időskálán gyakorlatilag pillanatszerűnek tekinthető. (A lemeztektonika időskálája pl. sokkal hosszabb: Afrika és Dél-Amerika kb. 200 millió évvel

ezelőtt vált szét egymástól.)

Az utóbbi 8-10 év azonban szerintem gyökeres fordulatot hozott és ma már alighanem jogosan mondhatjuk, hogy értjük a jelenség lényegét.

A pólusváltások realitását ma már senkise vitatja, de hallgatólagos közmegegyezéssel *anomáliának* tekintik őket, amelyet a kurrens elmélet nem tud megmagyarázni. Ez a tankönyvekből állapítható meg a legegyértelműbben. Tipikus példaként *Cserepes László* és *Petrovay Kristóf Kozmikus fizika* című ELTÉs jegyzetéből idézek, amelynek második javított kiadása 2002-ben jelent meg:

A Busse-modell¹ ma a legjobb dinamómodell. Alapvető szerepe van benne a gyors forgásnak, a Coriolis-erőnek. Eredményeit az imént vázoltuk, ám meg kell említenünk hiányosságait is. Egyrészt túlságosan szabályos, tengelyirányú és időben állandó teret magyaráz. Nem ad tehát számot a földi térátfordulásokról.

A "legjobb dinamómodell" minősítés arra utal, hogy a kozmikus mágneses terek az ún. *dinamóhatás* révén jönnek létre, amely azon alapul, hogy az elektromos áram mágneses teret, a változó mágneses tér pedig elektromos áramot hoz létre. Az áramfejlesztő dinamók ezen az elven működnek, mert a mérnöki lelemény képes volt megfelelő *pozitív visszacsatolás* kialakításával ezt az oda-vissza hatást öngerjesztővé tenni. A kozmikus mágneses dinamó alapproblémája az, hogy "intelligens tervezés" *nélkül* kell értelmeznie a mágneses tér létrejöttét és fennmaradását. A kérdéskörrel a *mágneses hidrodinamikának* nevezett fizikai diszciplína speciális ága, a *dinamóelmélet* foglalkozik, amely egy meglehetősen összetett lezáratlan elmélet.

A pár mondatos idézet hűen tükrözi az uralkodó felfogást, amely szerint a mágneses tér univerzális jelenlétének a magyarázatánál *eltekinthetünk* a pólusváltásoktól, amelyeket esetenként speciális okokra kell visszavezetnünk. Egy ilyen nézőpont eredete egészen nyilvánvaló: A "természetes" (nem célszerűen megtervezett) mágneses dinamó működéséről sokaknak volt plauzibilis elképzelése, de arról dunsztja sem volt senkinek, hogy vajon mitől vált előjelet időnként a geomágneses tér pottom néhány ezer év alatt.

Közben azonban a 90-es évek közepére egy amerikai kutatócsoport — *P. H. Roberts* és *G. A. Glatzmaier* nevét kell elsősorban említeni — a dinamóelmélet komplett egyenletrendszerének a kezelésében fokozatosan eljutott arra

¹F. H. Busse a hetvenes évek elején dolgozta ki a földmágnesség részletes modelljét.

a szintre, amelyen már lehetségessé vált a geodinamó realiztikus számítógépes szimulációja. Kezeln tudták a Föld valódi szerkezetét, azt, hogy a geodinamó a folyékony vasból álló *külső földmagban* fejti ki a hatását, amely egy kb. 2200 km vastag *gömbhéj* az 1300 km sugarú szilárd belső mag és a kb. 3500 km mélységig lenyúló szilárd földköpeny között. A külső magban a viszonyok egészen extrémek: a 6000 fokos hőmérsékleten 1 millió bar nyomáson a vas feltehetően úgy folyik, mint a víz, és a közepén ott lebeg a közel Hold méretű szilárd belső mag.

A kutatócsoport abból a hipotézisből indult ki, hogy a dinamót a belső földmag felszínéről kiinduló és a külső magban felfelé mozgó a környezetük-nél forróbb folyadék-csomagok mozgási energiája, vagyis a *termikus konvekció* működteti. Ennek a teljesen realiztikus feltételezésnek az alapján 15 napos lépésekben összesen mintegy 300 000 éves időtartamra numerikusan megoldották a dinamóelmélet jól ismert, de nagyon bonyolult egyenletrendszerét (egy-egy futás tipikusan 2000 óra gépi időt vett igénybe a Cray C90 szuperszámítógépen). Azt akarták megtudni, hogy fenn tudja-e tartani egy ilyen áramlás a geomágneses teret. A legnagyobb meglepetésükre az egyik futtatásnál azt vették észre, hogy a mágneses tér polaritása kb. 3000 év alatt az ellentétébe váltott át úgy, hogy a pólusváltás előtt is, után is kisebb ingadozásoktól eltekintve állandó maradt. További futtatásaiknál ezt a jelenséget többször is megfigyelték és 1999-ben a *Nature*-ben számoltak be róla².

Már utaltam rá, hogy megítélésem szerint Glatzmaiernek és Robertsnek ez a munkája teljesen új megvilágításba helyezi a pólusváltások és a kozmikus mágneses terek elméletének a kölcsönös viszonyát. Többé már nem gondolhatjuk azt, hogy a pólusátfordulások anomáliák, amelyek vagy társulnak a mágneses dinamó működéséhez vagy sem, mert ugyanaz a dinamó hatás idézi elő őket is, mint amelyik a mágneses teret generálja és fenntartja.

Hogy lehet, hogy erre korábban senki sem gondolt komolyan (vagy ha gondolt is rá, óvakodott lepublikálni)? Erre csak az lehet a magyarázat, hogy hiába foglaltak el a nemlineáris jelenségek egyre nagyobb teret a 20. század második felének a fizikájában, a nemlinearitás lehetséges következményei még mindig nem épültek be szervesen a fizikusok szemléletébe. Még mindig hihetetlennek érezzük, hogy egy nyúlfarknyi, egyszerű szerkezetű, de nemlineáris tag képes teljesen a feje tetejére állítani az egyenleteinket.

A numerikus szimuláción alapuló magyarázat persze nem ugyanolyan minőségű, mint mondjuk a Kepler-törvények magyarázata az általános tö-

²*Nature* **407**, 885 (1999).

megvonás alapján. Ez utóbbi esetben szigorúan logikus matematikai dedukcióról van szó (annak ellenére egyébként, hogy az egyenletek ebben az esetben sem lineárisak). A pólusváltások magyarázatánál legalábbis részben a számítógép gondolkozik helyettünk. Ez azonban egyrészt elkerülhetetlenek, másrészt viszont elégségesnek látszik.

Az elkerülhetetlenség annak következménye, hogy azoknak a nemlineáris parciális differenciálegyenleteknek, amelyekkel a dinamóelméletben dolgozunk, reális peremfeltételek mellett egyszerűen nem léteznek olyan elvben tabellázható "szabályos" megoldásai, amilyenekhez például a bolygóelméletben szoktunk hozzá. Az elégségeség pedig abból következik, hogy a dinamóelmélet egyenleteit — az áramlástan Navier-Stokes egyenletét, az elektrodinamika Maxwell-egyenleteit, valamint a hővezetés Fourier-egyenletét — már legalább 150 éve jól ismerjük és semmi okunk sincs kételkedni abban, hogy a szóbanforgó jelenségek körében valóban érvényesek. Nem új törvényt kell tehát *felfedezni*, hanem már ismert törvényszerűségeket kell *alkalmazni*, és noha a felfedezés kontextusában a sajátosan emberi gondolkodást jellemző kreatív elem nélkülözhetetlen, az alkalmazásban a gépesített logika teljesítőképessége messze túlszárnyalhatja az emberét.

Végül létezik még egy körülmény, amely megerősíthet abban, hogy Glatzmaier és Roberts szimulációs eredményeit a magyarázat rangjával ruházzuk fel: az, ha a pólusváltást sikerül mintegy "horizontálisan" hasonló típusú jelenségek sorába beilleszteni. Ebből a szempontból különösen fontosnak látszik egy idén márciusban publikált laboratóriumi kísérlet. Ennek az ismertetésével fejezem be a mondandómat.

Egy 50 cm magas 50 cm átmérőjű tiszta vízzel csurig töltött lezárt henger alakú edény alaplajját és fedőlapját állandó hőmérsékleten tartjuk úgy, hogy az alaplaj hőmérséklete kb. 20 °C-kal magasabb, mint fedőlapé. A helyzet ugyanaz, mint amikor egy edényben vizet forralunk, csak itt a hőmérséklet nem elég magas ahhoz, hogy a víz forrni kezdjen. Áramlás azonban létrejön, de a buborékok hiánya miatt szabad szemmel semmit sem lehet észlelni belőle az átlátszó plexi oldalfalon keresztül. Lézernyaláb igénybevételével azonban az áramlási kép figyelemmel kísérhető annak következtében, hogy a melegebb tartományok másképp törik a fényt, mint a hidegebbek. A várakozás az, hogy az áramlási kép kaotikusan turbulens lesz, ami nagyjából igazolódik is egy fontos kiegészítéssel.

Fektesünk át gondolatban különböző helyzetű síkokat a henger tengelyén. Az edény belső fala mindegyikből egy-egy négyzetet metsz ki. A megfigyelés azt mutatja, hogy *az egyik* ilyen síkmetszet peremén a falak mentén

a víz folyamatosan áramlik körbe-körbe: az egyik oldalon a felfelé haladó áramlás meleg vizet szállít, a szemközti oldalon a lefelé haladó pedig hideget. Az áramlás síkja állandó helyzetű azon kívül, hogy nagyon lassan forog valamelyik irányba az edény tengelye körül. Kb. egy nap alatt tesz meg egy teljes fordulatot.

Időnként azonban váratlan dolog történik. Az áramlás hirtelen, kb. egy perc alatt teljesen leáll, és a következő percben újra indul ugyanabban a síkban, de ellenkező irányban: a felszálló meleg és a leszálló hideg áramlás diametrálisan ellentétes pozíciót vesz fel. A jelenség számítógépes szimulációval is reprodukálható ugyanakkor az áramlástan Navier-Stokes egyenletnek és hővezetési egyenletnek az alapján, amellyel a dinamóelmélet is dolgozik.