

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXII. évfolyam

6. szám

2012. június

## NAPTEVÉKENYSÉG ÉS ŰRIDŐJÁRÁS

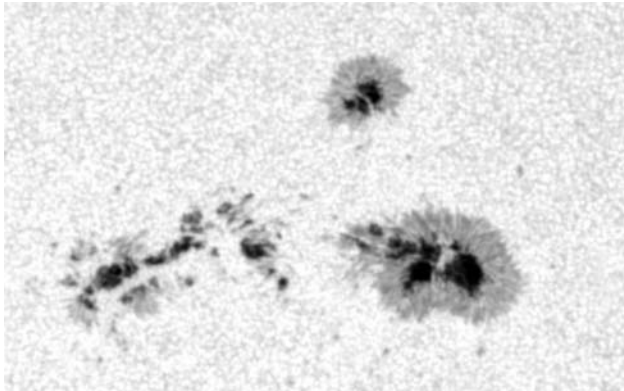
Ludmány András  
MTA CsFK Napfizikai Observatóriuma

### Szoláris mágneses folyamatok

*Naptevékenység* alatt a Nap mágneses terének változási folyamatait és eseményeit értjük. A Nap anyaga, a plazma mozgásai mágneses tereket hoznak létre, ezek folyamatosan változnak. A jelenségkör legrégebben ismert tagjai a *napfoltok* (1. ábra), ezek műszeres megfigyelése *Galilei* észleléseivel kezdődött 1613-ban, ennek jövőre ünnepeljük 400 éves évfordulóját. Az is régóta ismeretes, hogy a napfoltok megjelenésének gyakorisága körülbelül 11 éves ciklikussággal változik (2. ábra), továbbá, hogy a napfolttevékenység közepes szélessége a ciklus folyamán a Nap egyenlítőjéhez közelít.

A napciklus elméleti leírásával a dinamóelmélet foglalkozik. Asztrofizikai dinamó alatt olyan mechanizmust értünk, amelyben mechanikai energia mágneses energiává alakul. Ez a probléma komoly kihívást jelent, azt kellene megérteni, hogyan alakul odavissza a globális mágneses tér két lehetséges geometriájú állapota, a poloidális és toroidális alakzat. A cik-

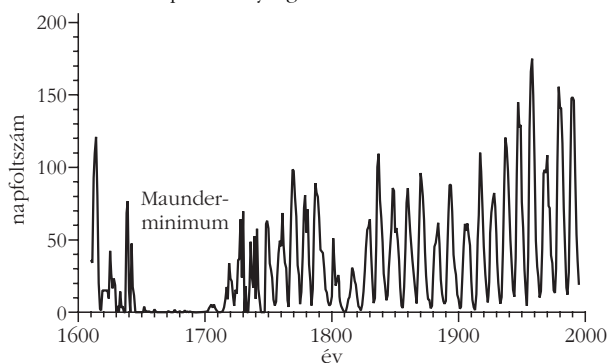
1. ábra. Egy napfoltcsoport képe (Solar Dynamics Observatory).



lus kezdetekor poloidális állapot van, vagyis az erővonalak a Nap északi és déli pólusát kötik össze, majd a plazmafizika befagyási tétele értelmében az erővonalak fokozatosan feltekerednek, mivel a Nap rotációjában az alacsonyabb szélességű sávok szögsebessége nagyobb a magasabb szélességeken fellépőkénel. Ez idővel két hatalmas gyűrűt – tóruszt – alakít a két félgömb belsejében, és az aktív vidékeket (a napfoltcsoportokat) azok a mágneses fluxuskötegek hozzák létre a felszínen, amelyek ezekből a tóruszokból felbukkannak. E két geometria léte és váltakozása észlelési tény, de elméleti magyarázata, elsősorban a következő ciklus kezdetére megjelenő poloidális tér felépülésének leírása egyelőre nem megoldott.

Rövidebb időskálán az *aktív vidékek* eseményei a legfontosabbak. A mélyből (körülbelül a nap sugarának 70-75 százalékáról) felbukkanó fluxuskötegek felszín által alkotott metszeteit észleljük a napfoltként, amelyek 6000 K hőmérsékletű környezetüknél kevésbé forró és ezért sötétebb területek. Egy napfoltcsoportban a kifelé és befelé mutató terek metszeteinél ellentétes polaritású mágneses tér van, a terek felszín

2. ábra. A naptevékenység 11 éves ciklikus váltakozása.



feletti koronába nyúló íves struktúráját a 3. *ábra* mutatja. Ebben a struktúrában alakulhatnak ki olyan instabil konfigurációk, amelyek csak a tér robbanásszerű átrendeződése által mehetnek át stabilabb alakzatba. Ezen átrendeződés révén mágneses energia alakul át mechanikaivá (a dinamófolyamat fordítottja). A felgyorsított részecskék felszín felé repített hányada felfűti a napatmoszféra *kromoszférának* nevezett rétegét, itt észleljük a hidrogén Balmer-sorozata alfa-vonalának hullámhosszán ( $\lambda = 656,2$  nm) az úgynevezett H-alfa flert.

Az átrendeződés során azonban a felszín feletti mágnesestér-struktúrák egy része el is szakadhat a felszínen záródó résztől, és hatalmas mágneses plazmafelhő formájában elhagyja a Napot. A felhő óriási méretűre fúvódik fel, mivel az elszakadás után már semmi nem ellensúlyozza a  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  Lorentz-erő hatását, az elszállított tömeg milliárd tonnányi. E felhők neve angol betűszóval CME (Coronal Mass Ejection, *koronakitörés* – a napkorona a Nap atmoszférájának legkülső, kiterjedt rétege). A naptevékenységnek ez a jelenségcsoportja a legjelentősebb a földi hatások szempontjából (4. *ábra*).

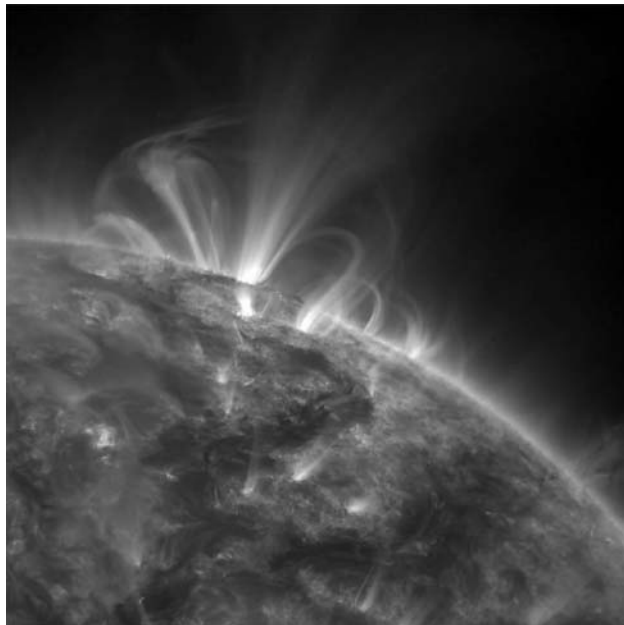
A Napból folyamatosan plazma áramlik kifelé átlagosan 400 km/s sebességgel. Ez a *napszélnek* nevezett áramlás annak következménye, hogy a napatmoszféra külső tartománya, a *korona* hőmérséklete millió foknál magasabb, ezért a koronaanyag egy részének sebessége magasabb lehet a szökési sebességnél. Itt az a probléma vár hosszú ideje tisztázásra, hogy milyen mechanizmus okozza a korona ennyire magas hőmérsékletét. Nyilvánvaló, hogy nem termikus fűtés, hanem a mágneses tér által valamilyen módon a koronába szállított energia lehet a magyarázat, de a részletek még nem világosak.

A Napból kiáramló plazma két fő formája a kvázistacionárius napszél és az eruptív eseményekhez kötődő CME játssza a fő szerepet az *úridőjárás* nevű jelenségkörben, amely egy gyorsan fejlődő, új kutatási terület tárgya.

## Észlelési stratégiák

Az úridőjárás kutatásának egyik súlypontja a naptevékenység jelenségeinek olyan szintű megismerése, ami már bizonyos előrejelzési képességet is lehetővé tesz. A jelenségek rendkívül széles skálája a legkülönbözőbb módszertani és technikai eszközöket igényli.

Az Univerzum jelenségeinek lehetséges észlelési stratégiáit az úgynevezett „észlelési fázistér” fogalommal lehet áttekinteni. Képzeljünk el egy ötdimenziós paraméterteret, amelynek „tengelyei” a következő fizikai mennyiségeket képviselik: hullámhossz, térbeli, időbeli és spektrális felbontás, valamint a polarizációra vonatkozó információ. Ebben a paraméterterben bármely asztrofizikai objektum elektromágneses sugárzásának jellemző sajátosságai csak bizonyos értékhatárok között nyilvánulnak meg. Ez azt jelenti, hogy bármely objektum csak olyan eszközzel észlelhető,

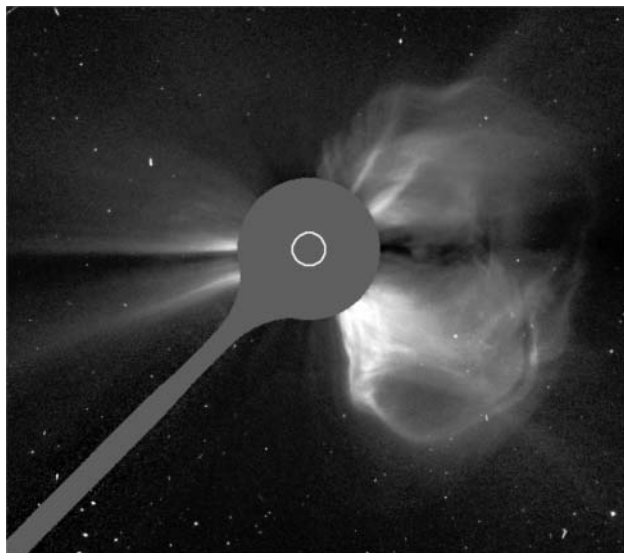


3. *ábra*. Egy napfoltcsoport mágneses terének ívei az SDO/AIA észlelésén (17,1 nm).

amely az adott értéktartományban regisztrálni képes. A teljesen új jelenségeket mindig olyan új eszközzel lehet felfedezni, amely e fázistér addig nem vizsgált értéktartományaiban képes észlelni. A séma tanulságos a napfizikában is a vizsgálati lehetőségek áttekintéséhez.

*Hullámhossz*. Mára az egész hullámhossztartományra és a diagnosztikailag legfontosabb spektrumvonalakra léteznek észlelőműszerek. A legújabb fejlesztések a nagyenergiájú (ultraibolya-, röntgen-, gamma-) tartományban történtek. Látványos felvételek készíthetők azokon a távoli ultraibolya hullámhosszakon, amelyek magas (10–14-szeres) ionizáltságú vasatomok átmeneteihez tartoznak. Ezeket nyilván olyan magas hőmérsékletű tartományok vizsgálhatók, amelyekben az ütközések miatt ennyi elekt-

4. *ábra*. Koronakitörés a SOHO/LASCO észlelésén (a napkorong helyzetét a kis karika jelzi).



ronjukat elveszítik az atomok, ez millió fokok hőmérsékleteket jelent. Így tehetők láthatóvá a koronába nyúló mágneses terek ívei (3. ábra). Az ennél is magasabb hőmérsékletű térrészek a lágyröntgen-tartományban működő műszerekkel figyelhetők meg. A gamma-tartományban csak nagyobb flerek idején fénylenek fel a legmagasabb hőmérsékletű térrészek. Itt már egyáltalán nem működnek a klasszikus képalakítási eljárások, a RHESSI űrszonda műszere egy rendkívül szellemes módszerrel hozza létre a legforróbb plazmák képét.

**Térbeli felbontás.** Itt jelenleg is komoly fejlesztés zajlik. A létező eszközök által felbontható napfelszíni alakzatok mérete néhány száz km, a kitűzött cél az, hogy akár 20 km-es részletek is láthatóvá váljanak a Napon. Ezt a tervezési szakaszban lévő nagy, európai naptávcsőtől reméljük, amelynek 4,2 méter átmérőjű főtükre ezt lehetővé teszi. Ebben a mérettartományban várható olyan alakzatok felbukkanása, amelyek a mély fotoszféra és a kromoszféra-korona átmeneti réteg mágneses kapcsolódásának természetét megvilágítják. Itt lehetnek még felfedezetlen jelenségek. A felbontás növelése földi távcsövek esetén nagy technikai kihívást jelent, a légkör gyorsan változó hatásait gyorsan kell tudni korrigálni.

**Időbeli felbontás.** Ennek növelése a térbelivel párhuzamosan halad. A szoláris alakzatok időbeli változásának sebessége a hangsebességgel kapcsolatos, a kisméretű alakzatok pedig gyorsabban fejlődnek, mint a nagyobbak. Az időbeli felbontásnak néhány másodpercesnek kell lennie.

**Spektrális felbontás.** Észleléstechnikai korlátok miatt a térbeli, időbeli és spektrális felbontás egyszerre nem lehet nagy, közülük csak kettő, a harmadik rovására. A legtöbb napfizikai észlelésnél azonban a spektrális információ csak arra vonatkozik, hogy milyen keskeny a műszer által észlelt hullámhossztartomány. Ha keskeny, akkor valamely színképvonal profiljának egy részét célozza, ha pedig széles, akkor a folytonos spektrumot. A fázistér különleges tartományába esik a globális oszcillációk észleléstechnikája, amelynél nagy tér- és időbeli felbontással regisztrálják az egész napkorong felületdarabjait egy spektrumvonal két szárnyában. Az ebből származtatható Doppler-eltolódások mérési adataira épül a Nap belsejében terjedő nyomáshullámok vizsgálata, ami néhány évtizede teljesen új fejezetet nyitott a napkutatásban, szinte láthatóvá tette a Nap belsejét (helioszeizmológia).

**Polarizáció.** A Zeeman-effektusnak nevezett jelenség során mágneses térben bizonyos spektrumvonalak felhasadnak, a komponensek pedig polarizáltak. A mágneses tér vektora felszíni eloszlásának pontos meghatározása nagy technikai kihívás, a polarizált fény hányada igen kicsiny lehet, ezért a nagy polarimetriai pontosság is nagy fotongyűjtő-képességet, nagy objektívátmérőt igényel. A mágneses tér vektorának felszíni eloszlásából lehet például megállapítani a tér csavarodottságának, úgynevezett „helicitásának” mértékét, amely szerepet játszik a fler-produktivitásban.

## Egy hazai hozzájárulás

A fentiekből azt gondolhatnánk, hogy a napfizika fejlődése egyértelműen az egyre nagyobb felbontások irányába halad, ezt célozzák a legújabb fejlesztések, a high-tech eszközök, nagy berendezések. Ebből következne, hogy csak nagy nemzetközi összefogással lehet létrehozni korszerű műszeregyütteseket, ahol az észlelési időkre is nagy kutatócsoportoknak kell pályázniuk. Ez azonban csak részben igaz, a teljes kép összetettebb.

Azt, hogy mi számít nagy felbontásnak, nem abszolút skálán lehet mérni, hanem az adott jelenség természete szerint lehet megítélni. Az összetett struktúrák és gyors lefolyású események nyilván a tervezett nagyműszer képességeit igénylik, ha azonban a bevezetésben említett dinamómechanizmust tekintjük, azt nem ilyen műszerekkel lehet vizsgálni, egészen más stratégia szükséges. Mivel a jelenségek lehetséges időbeli léptéke a néhány hetestől a több évszázadosig terjed, ezért itt a naponkénti mintavétel elegendően nagy időbeli felbontást jelent.

A jelenségkör vizsgálatára leginkább napfoltadatok használatosak. A legismertebb adatsor a *nemzetközi napfoltszám* (International Sunspot Number, ISN), korábbi nevén zürichi napfolt-relatívszám, vagy Wolfszám. Ez minden napra a napkorongon aznap észlelt foltok és foltcsoportok számából képzett egyetlen adatot jelent. Brüsszelben állapítják meg több mint hetven obszervatórium beküldött adatai alapján. Ennek térbeli és spektrális felbontása nincs (folytonos fényben észlelik), időbeli felbontását pedig sokszor még havi, sőt több havi átlagolással, simítással le is rontják. Hosszú távú vizsgálatokhoz azonban az ISN nélkülözhetetlen, ez az egyetlen adatsor, amely átöleli a napfoltészlelések négy évszázadát. Hosszú távú trendeket, a 11 éves ciklus változásait, sőt átmeneti megszűnését és újraindulását, a 2. ábrán látható *Maunder-minimum* jelenségét jelenleg leginkább ezzel lehet vizsgálni.

Ennél nagyobb felbontású adatsorokat jelentenek a *napfoltkatalógusok*. Ezek klasszikus példája a Greenwich Photoheliographic Results (GPR) 1874 és 1976 között. Ez is napi rendszerességű, de van térbeli felbontása is, tartalmazza a napfoltcsoportok adatait, az egyes foltokét azonban egy kezdeti időszak után nem, hasonlóan a későbbi adatbázisokhoz (Róma, Catania, Kiszlovodszk, Boulder stb.). Ezt a bővítést a debreceni napfoltkatalógus (Debrecen Photoheliographic Data, DPD) valósítja meg, amely minden napra, minden észlelhető foltcsoportra és foltra megadja a pozíció- és területadatokat.

Az időbeli felbontás további növelése újabb jelenségkörbe enged betekintést. A Napfizikai Obszervatórium kezdeményezésére létrejött SOTERIA (Solar-TERrestrial Investigations and Archives) nevű európai FP7-es projekt 16 uniós kutatóintézet űrfizikai kutatási együttműködése volt 2008–2011 között. Ennek keretében készítettük el az SDD (SOHO/MDI-Debrecen sunspot Data) nevű katalógust az 1996–2011 évekre, amely ebben a műfajban a legrészletesebb. A SOHO űrlaboratórium

MDI műszerének térbeli felbontása valamivel kisebb, mint a földi távcsövéké, azonban a folyamatos észlelés lehetővé teszi az 1–1,5 órás mintavételt. Mivel az MDI polarizációs információt is feldolgozott, a foltok mágneses adatai is bekerülhettek az adattáblákba, amelyek így minden releváns adatot tartalmaznak.

Hogy e hatalmas vállalkozás hozadékát érzékeltesük, érdemes összehasonlítani a jelenleg létező nem-debreceni napfoltkatalógusokkal egy 2003 októberi bonyolult foltcsoport példáján, amely a nevezetes Halloween-flereket produkálta. Ez utóbbiak azokban a napokban arra a foltcsoportra 3–4 független adatot adtak meg, miközben az SDD közel tízezret! Ez a részletesség először teszi lehetővé, hogy az aktív vidékek dinamikáját, belső történéseit, fejlődését részletesen és nagy statisztikai anyagon vizsgáljuk.

## Úridőjárás – egy új szemlélet

A SOTERIA projekt rendkívül sikeres volt. A partnerek tevékenységének tematikája felölelte a Nap–Föld-fizika legfontosabb területeit, a napfelszíni és koronabeli mágneses alakzatokat, a Nap össz sugárzásának változását, flerek keletkezésének és lefolyásának mechanizmusait, koronakitörés keletkezését, struktúráját és terjedését, plazmaáramokat, geomágneses választ, atmoszféra-választ, új típusú adatbázisokat. Az úridőjárás kutatása több új eszközzel gazdagodott.

A kérdéskör iránt magánszemélyek is érdeklődnek, többnyire egészségügyi aggodalmakkal. Ezek teljesen alaptalanok, a földfelszíni élő szervezetek semmilyen mértékben nem érzékelik az űrfizikai folyamatokat, csak a troposzféra jelenségeire reagálnak. Ami mégis egyre fontosabbá teszi a területet, az az egyes technikai eszközök sérülékenysége, valamint az űrhajósok és a repülőgépek személyzetének sugárterhelése. Az érintett technikai berendezések lehetnek űreszközök, amelyek egy nagy napkitörés által keltett nagyenergiájú sugárzástól károsodhatnak. Kutatási eszközök károsodása nem kelt nagy visszhangot, de a szolgáltatóké (telefonja, GPS) már tömegeket érinthet. A másik sérülékeny eszköztípus a földfelszíni távvezetékeké. Ezek antennaként viselkednek a geomágneses zavarokkal szemben, a földmágneses tér változásai esetenként nagy áramokat indukálnak bennük, amiktől áramellátó berendezések sérülhetnek. Ilyesmi többször előfordult az elmúlt évtizedekben.

Az előrejelzésnek a következő területeken lehet esélye. A flerek a bevezetőben említett instabil mágneses konfigurációkból származnak, ezek olyan tértartományokat jelentenek, ahol erős, ellentétes irányú mágneses terek kerülnek viszonylag kis távolságon belülre. Ezeknél gyors lefolyású átkötődés (rekonnekció) mehet végbe, amelynek során a térrész részecskéi nagy energiára tesznek szert, és a mágnesestérstruktúra bizonyos része elszakadhat (CME). E gyors átalakulásnak jelenleg csak az esélyét lehet megbecsülni, hogy az esemény mikor következik be, azt nem lehet. A fler-esélyes konfigurációk elemzésére a

Napfizikai Observatóriumnak is új lehetőséget nyit a most elkészült SDD adatbázis, amelynek adataival az aktív vidékek (foltcsoportok) belső viszonyai és fejlődési dinamikája vizsgálható.

Ha a fler megtörtént, a felfénylés észlelését követően egy órán belül megérkezhetnek a leggyorsabb részecskék, amelyek űreszközök elektronikáját veszélyeztethetik. Ez elvileg jelezhető, gyakorlatilag magas szintű készultságra van szükség, amely leginkább az űrhajósok védelmét szolgálhatja. A flerrel kapcsolatban általában fellépő koronakitörések során a Föld irányába kibombolt anyag átlagosan körülbelül egy nap alatt ér földközelségbe. Erre már komolyabban fel lehet készülni. A magnetoszférával való kölcsönhatás azonban nemcsak attól függ, hogy mekkora sebességű és tömegű anyag érkezik, hanem attól is, hogy az általa szállított mágneses tér milyen struktúrájú, konkrétan, hogy a Föld keringési síkjára (ekliptika) merőleges komponense milyen irányú. Ha az déli irányú, akkor mágneses átkötődés révén sokkal komplexebb kölcsönhatás zajlik, a szoláris plazma bejut a pólus környéki térségbe és aurórajelenséget kelt. További fler-hatás az ionoszféra elektronsűrűségének megnövekedése a fler ultraibolya-sugárzásának ionizáló hatása következtében, illetve a galaktikus kozmikus sugárzás csökkenése a Naprendszerben kiáramló plazma árnyékoló hatása révén (Forbush-csökkenés). Az egész jelenségcsoport előrejelzésének kulcsa tehát a flerek előrejelzése.

Újabbban ezen a téren is megjelenik a hosszú távú szemlélet. A flerek a napciklus maximumánál és leszálló ágában a legintenzívebbek. A jelen (24. számú) napciklus azonban legalább kétéves késésben van attól, amit a szokásos ritmus alapján vártunk, ráadásul az aktivitás jóval lassabban növekszik. Egyéb jelei is vannak a naptevékenység gyengülésének, amerikai kutatók szerint a foltokban mért mágneses tér is gyengülést mutat egy körülbelül évtizedes időskálán, függetlenül a tevékenység szintjétől. A debreceni adatok pedig azt mutatják, hogy a jelenlegi ciklusban a foltcsoportok átlagosan kevesebb foltot tartalmaznak, mint az előző kettőben. Egy ideje felvetődik a kérdés: lehetséges-e a nem túl távoli jövőben egy Maunder-minimum típusú, hosszabb aktivitási szünet.

A választ jelenleg senki nem tudja, de a lehetséges következményeket sokan latolgatják. A mágneses aktivitás eltűnése, vagy igen alacsony szintje a kifelé irányuló plazmaáramot is alacsony szintre csökkentené, a kozmikus sugárzás szintje megnőhetne, ez megnövelné a légköri cseppképződést és felhősödést, ez kifelé megnövelné az atmoszféra albedóját, tehát a napsugárzás visszavert hányadát, továbbá megnövelné a csapadékot. Ez volt a helyzet a Maunder-minimum idején, amikor a kis jégkorszakon belül is különösen hideg korszak kezdődött 1650 táján.

A Napfizikai Observatórium egyik távlati célja, hogy az egyáltalán fellelhető észlelések kiértékelésével minél hosszabb időszakon vizsgálhatók legyenek a naptevékenység részletei és talán e hosszú minimumok természete is. A földi és úridőjárás kapcsolata ez utóbbit egyre fontosabbá teszi.