

VÍZ AZ UNIVERZUMBAN

Szabados László

az MTA doktora, tudományos tanácsadó,
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet
szabados@konkoly.hu

Bevezetés

A Föld bolygóként csupán parányi része a Világegyetemnek. Tulajdonságaira és azok változásaira egyaránt lényeges hatása van a kozmikus környezetnek. Ebbe a kozmikus környezetbe nemcsak a földi élet számára meghatározó Nap tartozik bele, hanem a Naprendszer többi kisebb-nagyobb égitestje, továbbá a Naprendszert is magában foglaló Tejútrendszer egykori és jelenlegi csillagai és azok sugárzási tere is.

A Föld naprendszerbeli bolygótársaival és a Nappal együtt kb. 4,6 milliárd éve alakult ki a csillagközi anyagból. A Naprendszert szülő csillagközi felhő már tartalmazta azokat a kémiai elemeket, amelyekből a bolygók, kisbolygók, üstökösök felépülnek. A Napra ez nem érvényes: a Nap ugyanis csillag. A csillagok legfőbb ismérve pedig az, hogy bennük atommagfúziók során alacsonyabb rendszámú kémiai elemekből a forró és nagy nyomású környezetben magasabb rendszámú elemek épülnek fel. Az Univerzum egészen fiatal korában, 13,5 milliárd évvel ezelőtt csak a hidrogén és a hélium atommagjait tartalmazta (és valamennyi lítiumot). A periódusos rendszer minden nehezebb eleme csillagok belsejében vagy a csillagok végállapothoz vezető kataklizmák során alakult ki. Tehát környezetünk minden anyaga, sőt, sa-

ját testünk atomjai is valamikor csillagok részei voltak. Ugyanígy a vízmolekula egyik alkotóelemétől szolgáló oxigénatom is a csillagok belsejében zajló magfúzió terméke. A víz tehát végső soron kozmikus eredetű.

Az univerzumban a kisebb rendszámú (könnyebb) elemek gyakoribbak, mert azok kialakulásához a csillagok belsejében alacsonyabb hőmérséklet elegendő, mint a nehéz elemek atomjainak felépüléséhez. Ezért a hidrogén és hélium mellett a szén, a nitrogén és az oxigén a leggyakoribb elemek. E három elem hidrogénnel alkotott legegyszerűbb molekulái a víz (H_2O), az ammónia (NH_3) és a metán (CH_4). Csökkenő hőmérséklet esetén először a víz alakul jéggé, az ammónia és a metán megszilárdulásához még hidegebb környezet kell. A víznek emiatt fontos szerepe volt a bolygók kialakulása során.

A Földön kívüli víz kimutatásának nehézségei

A víz annyira közönséges anyag, hogy a csillagászok már évszázadokkal ezelőtt is természetesnek tartották a víz jelenlétét más égitesteken. A távcsöves csillagászat úttörője, Galileo Galilei a holdfelszín sötétebb árnyalatú részét *tengereknek* nevezte el abbéli meggyőződésében, hogy ott tényleg víz található. S bár magát a tenger elnevezést az utókor megtartotta Galilei iránti tisztelete jeléül, a Holdon nem ennyire nyilvánvaló a víz előfordulása.

Mégis, hogyan lehet távolról kimutatni a víz jelenlétét az égitesteken? A csillagászati kutatások során az egyik fő nehézség az, hogy a kiszemelt égitestet vagy jelenséget olykor csak roppant nagy távolságból lehet vizsgálni. E tekintetben csak néhány naprendszerbeli égitest – bolygó, hold, kisbolygó, üstökös – képez kivételt, amelyeket űrszondákkal megközelítettek, esetleg mérőműszereket is juttattak már a felszínükre. A Naprendszer térsége viszont elenyészően kicsiny tartomány a csillagok világában.

Az anyag vizsgálatára a spektroszkópiát alkalmazzák a csillagászatban is. Mint minden anyagnak – legyen az kémiai elem vagy molekula –, *a vízmolekulának is jellegzetes színképi sajátosságai vannak*, amelyek jelenléte a spektrumban víz előfordulására utal.

A helyzetet azonban nehezíti, hogy egy földi távcsőre szerelt spektrográfba érkező fény elkerülhetetlenül áthalad a földi atmoszférán, a légköri vízpára pedig szintén nyomot hagy a színképben. Így tehát a földfelszínről nincs esély kozmikus vízmolekulák kimutatására. Mivel a légkör páratartalma felfelé haladva csökken, magas hegyekre telepített obszervatóriumokban végzett spektroszkópiai észlelések már alkalmasak lehetnek a Földön kívüli víz észlelésére. Az ilyen célú megfigyeléseket azonban legjobb a légkörön kívülről – azaz űreszközökről – végezni. Annál is inkább, mert a vízmolekula kimutatásához az elektromágneses színkép infravörös tartományát kell vizsgálni. Ez pedig újabb nehézség, mert ebben a színképtartományban bocsátják ki hőmérsékleti sugárzásuk túlnyomó részét az alacsony hőmérsékletű testek. Az infravörösben történő megfigyeléshez ezért az észlelőberendezés minden elemét (távcső, spektrográf) az abszolút 0 fok (0 K) közelébe kell hűteni, hogy ne a közvetlen környezet

sugárzását észleljük a kozmikus forrástól származó jel helyett. (Földi infravörös méréseknél még a távcső közelében elrepülő madár hősugárzása is zajforrás.)

Miért éppen a színkép infravörös része lényeges a víz detektálásához? A különféle kémiai elemekre jellemző színképvonalak a spektrum optikai és ibolyántúli tartományába esnek. A vonal hullámhosszát az adott elem atomjában bekövetkező elektronátmenetnek megfelelő energiakülönbség szabja meg. A molekulákat alkotó atomok „lázában” kapcsolódnak egymáshoz, mint az elektronok az atomhoz, ezért a molekuláris eredetű színképvonalak kisebb energiaközlés vagy -felszabadulás hatására alakulnak ki. Mivel a színképvonalnak megfelelő sugárzás E energiája a ν frekvencia és a h hatáskvantum szorzata ($E=h\cdot\nu$), a molekuláátmenetek jellemzően az optikainál kisebb frekvenciájú, azaz hosszabb hullámhosszú infravörös és mikrohullámú színképtartományba esnek. Az energiaváltozáshoz pedig a molekula forgási, rezgési, megnyúlási vagy elcsavarodási állapotában bekövetkezett változás vezet. Rengeteg ilyen állapotváltozás lehet, ezért a molekuláktól származó spektrális jegyek széles molekulásávok. A különféle molekulákra jellemző sávok a molekula felépítésétől és atomi összetételétől függő hullámhosszakon lépnek fel. Földi laboratóriumi vizsgálatok alapján a víz legerősebb molekulásávjainak hullámhossza kb. 2,7 mikrométer (megnyúlási deformáció) és 6,3 mikrométer (elcsavarodási deformáció). A 40 μm körüli hullámhosszú rotációs átmenetek pedig a mikrohullámú tartományba esnek. (Mikrohullámú sütő használatakor éppen az ételben levő vízmolekulákat gerjesztjük magasabb rotációs energiájú állapotba.) A kristályos vízjégnek jellegzetes elnyelési sávja van 1,6 μm -nél. A jég

képződésekor uralkodó fizikai és kémiai viszonyoktól függ, hogy a jég melyik fajtája alakul ki: egészen alacsony (például a csillagközi tér anyagára jellemző) hőmérsékleten amorf jég képződik, megfelelően magas hőmérsékleten pedig jégkristályok. A kozmoszban előforduló vízjég színképvonalait (-sávjait) földi spektrográfokkal is észlelni tudják a felhők fölé telepített magashegyi obszervatóriumokból.

A vízmolekula más szempontból is változatos lehet: *orto* és *para* állapotú. Ez a megkülönböztetés a H_2 -molekula két hidrogénatomjában levő proton „forgására” jellemző spin értékén alapul. A paravíznél a két proton spinje egymással ellentétes, míg az ortovíznél azonos előjelű. Az orto- és paravíz molekuláinak rotációs és vibrációs-rotációs átmeneteire jellemző energiakülönbségek kissé eltérőek, ezért a megfelelő színképvonalak hullámhossza is eltérő. Az orto állapot gyakoribb, mint a para állapot, ami a színképvonalak erősségében is megnyilvánul. Az orto és para állapotú vízmolekulák számaránya a molekulák kialakulásakor érvényes hőmérséklettől függ, és a kialakult állapot végleges, a körülmények későbbi változása már nem módosít azon. Az orto/para gyakorisági arány így közvetlenül jelzi a vízmolekula kialakulási hőmérsékletét.

A víz változatainak számbavétele nem lenne teljes a hidrogén és az oxigén különböző izotópjait tartalmazó molekulák említése nélkül. Az oxigénnek a 16-os tömegszámú ^{16}O változata mellett létezik két nehezebb izotópja, a ^{17}O és a ^{18}O , amelyek rendre 2700-szor, illetve 500-szor ritkábbak, mint a „közönséges” ^{16}O . Ezek alapján a természetben előforduló négyféle vízmolekula: $H_2^{16}O$ (ez a leggyakoribb), HDO (nehésvíz, lásd *Sükösd Csaba* tanulmányát e cikkgyűjtemény 1467. oldalán), $H_2^{17}O$ és $H_2^{18}O$.

Vizes helyek a Naprendszerben

Mielőtt a csillagok világában a víz keresésére indulunk, érdemes körülnézni a Föld „szűkebb” környezetében, a Naprendszerben.

Hold • A Hold a Föld anyagából alakult ki, amikor 4,5 milliárd éve egy nagyjából Mars méretű test csapódott a Földnek. Ha tartalmazott is vizet a Földből (főleg annak köpenyéből és kérgéből) kiszakadt anyag, az a kataklizma hatására hirtelen megnövekvő hőmérséklet közepette elillant, legfeljebb a kőzetekben kötött víz maradhatott meg molekuláris formában, illetve a kőzetalkotó hidroxil-molekulák. Ha a Hold anyagából valamilyen módon a felszínre kerül a vízmolekula (vagy kívülről érkezik a Holdra), ott nem tud tartósan megmaradni. A Földnél 81-szer kisebb tömegű Hold gyenge gravitációja nem képes atmoszférát tartani maga körül, a felszíni gázok hamar elillannak. Ráadásul a Nap erős sugárzásának hatására a vízmolekulák atomjaikra bomlanak, megkönnyítve a gázok elszökését.

Űrszondákon elhelyezett műszerekkel végzett vizsgálatok viszont kiderítették, hogy vízjég lehet a felszín alatti kőzetekben, különösen a Hold pólusainak vidékén, ahol a hőmérséklet örökké a víz fagypontja alatt van. A felszín alatti jeget közvetett módon, neutronspektrométer segítségével sikerült kimutatni. A légkör nélküli Hold felszínét szabadon bombázzák a kozmikus sugárzás részecskéi, közte protonok és nehezebb atommagok. Ezek a nagy energiájú részecskék a laza felszíni rétegbe (a regolit nevű holdkőzetbe) csapódva képesek kilökni egy neutront az eltalált atomból vagy molekulából. A kiszabadult neutron energiája ugyancsak nagy, ezért a részecske gyorsan mozog. A gyors neutronok egy része még a felszínre jutás előtt további

ütközések hatására energiát veszít, lelassul. A neutronspektrométerrel meg lehet határozni mind a gyors, mind a lassú neutronok gyakoriságát egy-egy terület fölött elhaladva.

A Hold körüli pályára vezérelt amerikai Lunar Prospector szonda 1998-ban végzett mérései szerint a Hold északi és déli pólusa környékéről egyaránt több lassú neutron kerül ki a világűrbe, mint más holdi tájakról. Az eredetileg gyors neutronok lassítására pedig legalkalmasabb közeg a víz, mert a vízmolekulában található protonok tömege majdnem azonos a neutron tömegével, ezért hatékony az ütközéssel történő energiaátadás. Bár a lassú neutronok többsége a Hold pólusvidékein csupán a protonok bőséges előfordulását jelzi, ez a többlet valójában vízmolekulák jelenlétére utal, mert a holdi környezetben hidrogén nem képes szabadon megmaradni. A Lunar Prospector mérései alapján 100 millió tonna nagyságrendű víz lehet jégkristályok formájában a Hold poláris vidékein a felszín alatt.

A másfél évig a Hold körül keringő Lunar Prospector pályáját végül úgy módosították, hogy a szonda a Holdba csapódjon, mégpedig azért, hogy a 6000 km/óra sebességű ütközés hatására a becsapódás helyén (egy kráter árnyékos oldalán) az ütközés hevétől a vízjégből kialakuló gőzfelhőt spektroszkópiai úton kimutassák – innen a Földről. Vízgőzre utaló nyomokat akkor nem sikerült felfedezni.

A közelmúltban a japán Kaguya és az indiai Csandraján–1 (Chandrayaan-1) űrszonda, valamint az amerikai LCROSS- (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) és LRO- (Lunar Reconnaissance Orbiter) szondapáros keresett vizet a Holdon. Az indiai szonda amerikai gyártmányú M³ (Moon Minerology Mapper) műszere a Hold felszínének nagy részét vizsgálva különösen a pólusok környékén detektált vízre utaló nyomokat: hidrogén, illetve hidroxil jelenlétét mutatta ki. Ez a víz más eredetű, mint a felszín alatt a holdi regolitba fagyott jég. Víz ugyanis folyamatosan képződhet a Hold felszínén a napszéllal (a Napból kirepülő töltött részecskék árama) érkező protonok közreműködésével. A Hold felszínét fékeződés nélkül, nagy sebességgel elérő protonok a kőzetalkotó ásványok oxigénjével vízmolekulává állnak össze. Az ásványokban kötött víz azonban a Hold napsütötte féltékéjén fotodisszociációval elbomolhat, és a hidrátált ásványból hidrogénatom és hidroxil-gyök szabadul ki. Az indiai szonda spektrométere az ezektől származó infravörös sugárzást érzékelte a 3 mikrométeres hullámhossz körül.

Az LCROSS továbbfejlesztett formában leutánozta elődje, a Lunar Prospector végső kísérletét. Mielőtt magát az LCROSS-t a Hold felé térítették 2009 októberében, leválasztották róla a kiégett hordozórakétát, és előbb azt irányították a Hold felé, hogy az olyan helyre (a Cabeus-kráter örökké árnyékban levő belsejébe) csapódjon, ahol a holdkőzet a korábbi gyanú szerint vizet tartalmaz. A 2,3 tonnás lövedék becsapódásának hatására kirobbant törmelékfelhőt az LCROSS fedélzeti kamerái és spektrométere néhány kilométerről tudták vizsgálni. Már az első eredmények megerősítették, hogy a kirobbantott holdkőzet vizet is tartalmaz.

A víz előfordulása a Holdon azért is fontos, mert a Föld kísérőjén majdan létesítendő űrbázisok lakóinak vízellátása nagyon költséges lenne a Földről odaszállított vízzel. Úgy tűnik azonban, hogy a Hold vízkészlete csekély: egyetlen szétterítve egyetlen molekulányi réteget képezne kísérőnk felszínén.

A Naprendszer bolygoi • A Naptól távolabbi óriás gázbolygók sok szempontból hason-

lítanak egymásra, viszont a négy belső bolygó – a kőzetbolygók – mindegyike egymástól eltérő, sajátos világ. Hogy a bolygófejlődés során ez miért így alakult, azt itt nem részletezzük, de megemlítjük, hogy a bolygók tömege és felszíni hőmérséklete (ez utóbbi a Naptól való távolság következménye is) közötti különbségek lényegesek e tekintetben. A víz előfordulását illetően is a Merkúr, a Vénusz és a Mars egyaránt alapvetően különbözik a Földtől – és egymástól is. Ebben szintén az eltérő hőmérséklet és felszíni nyomás játszik közre, mert ezektől függ, hogy a H_2O melyik módosulata van jelen.

A *Merkúr* felszínén szélsőséges a hőmérséklet változása: a nappali oldalon $450\text{ }^\circ\text{C}$ -ra is felmelegszik a felszín – emiatt nem is lehet atmoszférája a Naphoz legközelebbi bolygónak –, az éjszakai oldalon pedig $-180\text{ }^\circ\text{C}$ -ra csökken a hőmérséklet. Légkör híján a Merkúr felszínére fékeződés nélkül csapódnak be a kisebb-nagyobb kozmikus testek, ezért a bolygó felszíne kráterektől sebhelyes, leginkább holdi tájra emlékeztet. Mivel a Merkúr pólusa környékén levő kráterek aljzatát sosem éri napfény, a becsapódott égitestek által odaszállított víz fagyott állapotban tartósan megmaradhat ott. A poláris vízjég létét a Merkúron a Földről végzett radarvisszhang-mérések is alátámasztják.

A *Vénusz* mérete és tömege ugyan alig tér el a Földétől, de a bolygót körülvevő sűrű (főként szén-dioxidból álló) atmoszféra és felhőburok keltette üvegházhatás miatt a Vénusz felszínén a hőmérséklet meghaladja a $400\text{ }^\circ\text{C}$ -ot. Űrszondákkal közelről is részletesen vizsgálták a Vénuszt, sőt a bolygó felszínére is leszálltak automatizált kutatószondák. Jelenleg a 2006 óta a bolygó körül keringő Venus Express szonda végez méréseket Földünk belső szomszédjáról. A Vénusz atmo-

szférájában a Földéhez képest elenyészően kevés vízgőz található. Spektroszkópiai mérésekből viszont az is kiderül, hogy a vízmolekulák között rendkívül gyakori – legalábbis a földi izotópgyakorisági arányhoz viszonyítva – a molekula egyik közönséges hidrogénatomja helyett deutériumot tartalmazó nehézvíz (HDO). Egy korábbi Vénusz-szonda, a Pioneer Venus fedélzetén elhelyezett tömegspektrométer mérései alapján megállapították, hogy a Vénuszon a D/H gyakorisági arány kb. százszor nagyobb, mint a Földön. Az elképzelések szerint régebben sokkal több víz lehetett a Vénusz légkörében, de a könnyűhidrogént tartalmazó közönséges víz a forróság hatására elillan, a nehezebb HDO-módosulat így relatíve feldúsult. A Nap fiatal korában a jelenleginél több nagy energiájú sugárzást bocsátott ki. Az ultraibolya fotonok nagy energiája a vízmolekulát atomjaira bontja, a gázállapotú hidrogén és oxigén pedig elillan.

Ha a Vénusz jelenlegi vízkészlete egyenletesen fedné a bolygót, az mindössze 3 cm-es vízréteget képezne a felszínén. Ezzel szemben a Földön hasonló gondolat kísérlet 3 km mély, összefüggő világtengert eredményezne. Régebben a Vénusz felszínén is sokkal több víz lehetett, akár óceánok is. A magas felszíni hőmérséklet hatására azonban a víz gyorsan párolgott, megnövelve a légkör vízgőztartalmát. A vízgőz viszont elnyeli a felszín felől érkező infravörös (hő-)sugárzást, azaz fokozza az üvegházhatást, tovább növelve a felszín hőmérsékletét és az egykor lehetséges óceánok elpárolgását.

A Föld külső bolygósomszédja, a *Mars*, a víz szempontjából a legalaposabban vizsgált égitest, de még így is sok a bizonytalanság. A Mars a 19. század végén vált izgalmas égitestté, amikor a felszínén csatornákat véltek látni.

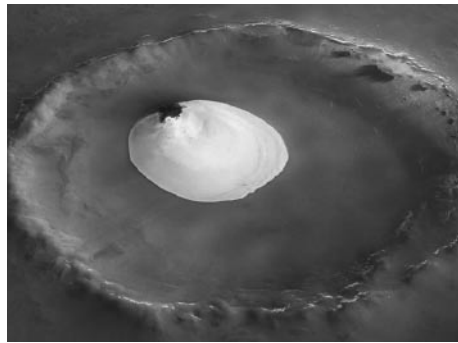
Ahol csatorna van, ott víz is van, ahol pedig víz van, ott élet is van – a túlságosan leegyszerűsített gondolatmenet szerint. A Marsot elsőként az 1960-as években megközelítő Mariner-szondákról készített fotókon viszont nem látszottak a Földről látni vélt csatornák. Ám az 1972-ben a Mars körül keringési pályára állt Mariner-9 már olyan képeket közvetített, amelyeken kiszáradt, kanyargós folyómedrek is láthatók. A Viking-szondák keringőegységein elhelyezett műszerekkel 1976-ban kimutatták, hogy a Mars pólusainál levő jég nemcsak megszilárdult szén-dioxidból (szárjazégből) áll, hanem vízjeget is tartalmaz. Az egyik legsikeresebb Mars-kutató szonda, a Mars Global Surveyor (MGS) kamerái által készített nagyfelbontású felvételeken 2000-ben egészen friss folyásnyomokra bukkantak, jelezve, hogy a közelmúltban is volt folyékony víz a Marson. Sőt, az MGS kamerája a huzamos működés során olyan folyásnyomot is megörökített, amelyik még nem volt ott a néhány évvel korábban ugyanarról a területről készített felvételen.

Hogy a Mars felszínén tartósan nincs víz, az nem meglepő. A bolygó kis tömege, a ritka atmoszféra és a napsugárzás hatására felmelegedő felszín nem teszi lehetővé cseppfolyós halmazállapotú víz tartós jelenlétét. De a folyómedrekre emlékeztető képződmények (amelyek persze nem azonosak a Földről egykor látni vélt csatornákkal) arra utalnak, hogy korábban folyhatott víz a Marson. A Mars felszínén az északi és déli jégsapkában levő vízjég feltűnő, de a víz mennyiségét tekintve nem számottevő. Az 1200 km átmérőjű és 1 km vastag északi jégsapkába fagyott víz mennyisége legfeljebb Grönland jegével egyenértékű, földi analógiával élve. Ha egykor óceánok is voltak a Marson, azok szinte nyomtalanul eltűntek. Márpedig különféle

mérési eredmények szerint valaha sok víz volt a Marson. A marsi domborzat és a víz előfordulásának érdekes kapcsolatát is tárgyalja Kereszturi Ákos (2006) tanulmánya.

A Mars felszínén működő kutatószondák is keresték/keresik a marsi víz nyomait. Az *Opportunity* marsjáró olyan ásványt talált, amelyik csak vizes környezetben alakulhat ki. A Phoenix-leszállóegység pedig mintát is vett az északi pólussapka jégéből, amelynek elemzése során perklorátot találtak a jégben. Ez a vegyület fagyáspontcsökkentő hatása, jelenlétében ezért a víz cseppfolyós halmazállapotban is előfordulhat. 2008 novemberében az Európai Űrügynökség (ESA) Mars Express szondája speciális műszereivel a Mars egyenlítője közelében a felszín alatt eltemetett gleccsért mutatott ki, 2009-ben pedig a Mars Reconnaissance Orbiter egy 3,5 milliárd éves tó maradványait fedezte fel, amelyben még akkor is víz lehetett, amikor a feltételezések szerint már kiszáradt a Mars.

A Mars tehát „vizes” bolygó, de a víz jelenleg zömmel a felszín alatt található, halmazállapota pedig egyaránt lehet szilárd és cseppfolyós (*1. ábra*). A marsi élet lehetősége így továbbra is izgalmas és fontos kutatási téma marad.



1. ábra • Vízjég egy marsi kráter belsejében (az ESA Mars Express szondájának felvétele)

A négy külső gázbolygó a rajtuk előforduló víz szempontjából együtt tárgyalható, bár a *Jupiter*, a *Szaturmusz*, az *Uránusz* és a *Neptunusz* eltérő tömege és (részben a Naptól való távolsága következtében) különböző átlaghőmérséklete miatt az együttes említés kissé leegyszerűsíti a tényleges helyzetet. A gázbolygók átlagsűrűsége a Föld típusú bolygóktól eltérően egészen alacsony: 0,7–1,7 g/cm³. Legkülső rétegeiket atmoszférának tekintik, amelynek szilárd felszín híján nincs éles alsó határa. Az atmoszférát főként hidrogén és hélium alkotja, de kisebb mennyiségben metán, ammónia és vízgőz is jelen van benne. Ezek a nagyobb molekulatípusú gázok az atmoszféra mélyebb rétegeiben felhőket is képeznek. A vízpárából képződő felhők az ammóniafelhők alatt találhatók, ahol a hőmérséklet a bolygó belső hője miatt magasabb, mint az ammóniafelhők szintjén.

Az óriásbolygók gyorsan forognak a tengelyük körül, emiatt az atmoszféra egyes rétegeiben örvénylő mozgás figyelhető meg. Mivel a vízmolekula poláris, képes elektromos töltést hordozni, az óriásbolygók atmoszferikus viharai során bekövetkező kisülések pedig villámokat keltenek. A Jupiteren és a Szaturmuszon meg is figyeltek villámlást.

Holdak és gyűrűk az óriásbolygók körül • A Naprendszer valamennyi óriásbolygóját gyűrűrendszer veszi körül. Legismertebb a Szaturmusz körüli rendszer, de kevésbé feltűnő gyűrűket találtak a Jupiter, az Uránusz és a Neptunusz körül is. Ezek a gyűrűk egykori holdakból keletkeztek, amikor azok olyan közel (a Roche-határon belülre) kerültek az anyabolygóhoz, hogy annak gravitációs terében az árapályerők darabjaikra szakították azokat. Az egykori hold pályája mentén szétoszló kisebb-nagyobb darabok pedig egymással ütközve tovább aprózódtak. A gyűrűket

alkotó részecskék kémiai összetétele mindenestre utal az egykori hold összetételére.

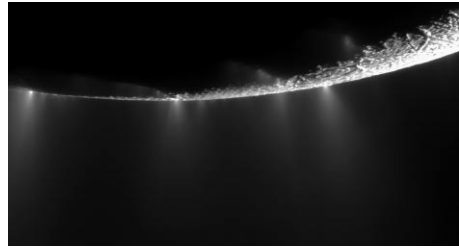
A Szaturmusz gyűrűi és holdjai a bolygó egyenlítői síkjában találhatóak. A gyűrűrendszer roppant nagy kiterjedésű ebben a síkban: a bolygótól 7000 km-re kezdődik, és még 100 000 km távolságban is tart. Erre merőlegesen viszont meglepően kis kiterjedésű: legfeljebb néhány száz méter. Vékonyágánál csak az összetétele meghökkenőbb – a gyűrű anyagának 93%-a vízjég, a többi főleg amorf karbon. Eszerint azok a holdak, amelyek szétaprózódásából a gyűrűk keletkeztek, *jégholdak* voltak. Ilyenek szép számmal akadnak az óriásbolygók holdjai, főleg a kisebb méretűek között. Éppen a jég nagy fényvisszaverő képessége miatt olyan feltűnőek a Szaturmusz gyűrűi. A másik három gázbolygó körüli gyűrűk anyaga közettörmelék, ami sokkal sötétebb.

A Szaturmusz gyűrűinek további furcsasága, hogy még atmoszférájuk is van. Ezt úgy kell érteni, hogy a gyűrűrendszer síkjának mindkét oldalát hidrogén- és oxigénatomokból álló, ritka réteg borítja. A Napból származó ultraibolya fotonok energiája ugyanis elég nagy ahhoz, hogy alkotóelemeire bontsa a gyűrűket képező jégzemcsék felületén levő vízmolekulákat. A molekula kötélekéből fotodisszociációval kiszabaduló gázatomok pedig elillannak, és a gyűrűkből távozó gáz átmeneti atmoszféraként figyelhető meg. A szilárd halmazállapotból közvetlenül gázművé válás, a szublimáció egyre csökkenti a gyűrűket alkotó vízjég mennyiségét, ám ezt ellentételezi a gyűrűk anyagát gyarapító friss víz. Hogy honnan érkezik oda friss víz? A Szaturmusz *Enceladus* nevű holdjáról.

Az 500 km átmérőjű Enceladus anyagnak kb. fele vízjég. Ez a jéghold a legkülső gyűrűk tartományában kering a Szaturmusz

körül, ahol tekintélyes árapályerő hat rá az anyabolygó gravitációja következtében, de a kritikus távolságon kívül keringő Enceladus nem esik darabokra. A Szaturnusz egy másik holdja, a Dione viszont olyan pályán kering, hogy e két hold keringési idejének aránya 2:1. Ez a rezonancia erős árapály-deformációkat okoz az Enceladus belsejében, amelyektől a hold anyaga felmelegszik, és a folytonos alakváltozással együtt járó kéregrepedések mentén a felhevült anyag ki is spriccelhet (2. ábra). A Szaturnuszt és környezetét vizsgáló Cassini-űrszonda műszereivel elemezték az Enceladus gejzírjeinek kémiai összetételét: a percenként 9 tonna kilövellt anyag 90–94%-a vízgőz és még meg nem olvadt vízcseppek. E kriovulkanizmus következményeként kap tehát vízjégutánpótlást a Szaturnusz gyűrű-rendszere. De abból, hogy szinte csak víz és vízjég spriccel ki az Enceladus folyton változó felszíni repedésein, az is következik, hogy az Enceladus szilárd kérge alatt nagy kiterjedésű óceán található. Ilyenre földi analógiát is ismerünk: az Antarktisz jégkérgé alatt cseppfolyós vízzel telt tavak vannak. A több mint száz szubglaciális tó legnagyobbika, a Vostok-tó a jeges felszín alatt 4 km-rel kezdődik, és a vízréteg vastagsága 350 m. Az Enceladus felszín alatti óceánjainak kiterjedése azonban jóval nagyobb ennél.

Az Enceladus igazi „párja” az *Europa*, a Jupiter egyik legnagyobb holdja. A mi Holdunknál kisebb, 3120 km átmérőjű Europa vastartalmú magját szilikátköpeny burkolja, amely felett majdnem 100 km vastag vízréteg található, azt pedig a ráeső fény kétharmadát visszaverő, 10–20 km vastag jégkéreg fedi. A jégtakaró alatt azért cseppfolyós a H_2O , mert a hold közel kering a Jupiterhez (3,5 nap alatt végez egy keringést a Jupiter körül), és a bolygó, valamint a szomszédos holdak tömeg-



2. ábra • Az Enceladus felszíne alól víz lövell ki. (NASA Cassini-szonda felvétele)

vonzása által keltett árapályerők a vizet a fagyponthoz közel melegítik. A vízen úszó fagyott jégkéreg helyenként megreped. Ezek a rianások jól kivehetők űrszondákról készített felvételeken. A jeges felszín alatti „óceánban” mozgó oldott ionok változó mágneses teret generálnak. Mivel a Jupiter két másik nagy holdja, a Callisto és a Ganymedes esetében is kimutatható a mágneses tér, azt gyanítják, hogy e két hold felszíne alatt is jelentős mennyiségű folyékony víz van, amelyben képesek mozogni az oldott ionok. Közetholdakban a belső mozgás hiánya miatt nem alakul ki mágneses tér.

Az óriásbolygók többi holdja közül is soknál gyanítják, hogy anyaguk tekintélyes része (15–50%-a) vízjég.

Üstökösök és kisbolygók • A Naprendszer apró, de lényeges alkotóelemei a kisbolygók, a Kuiper-övbeli objektumok és az üstökösök. A kisbolygók (aszteroidák) többsége (több százszázalékos) a Mars és a Jupiter pályája között húzódó fő kisbolygóövben kering. Ettől eltérő helyeken is mozognak kisebb létszámú kisbolygócsaládok, amelyek némelyike a Földre is veszélyt jelenthet. Jelenleg nagyon kicsi egy néhány kilométeres méretű kisbolygó Földbe csapódásának valószínűsége, de röviddel a Föld kialakulása után, az ún. késői nagy bombázás (Late Heavy Bombardment)

során rengeteg kisbolygó találta el a Földet, saját anyagával növelve bolygónk tömegét – és vízkészletét, mivel az aszteroidák egyik fontos alkotóeleme a víz. A kisbolygók víztartalma ugyanakkor csekély a Kuiper-övbeli kis égitestekéhez képest.

A Kuiper-öv a Neptunusz távolságában, a Naptól 30 csillagászati egységre kezdődik, és nagyjából még egyszer ekkora távolságig húzódik kifelé a bolygók pályasíkjában, az ekliptika mentén. Becslések szerint 70 000, legalább 100 km-es méretű objektum mozog e térségben, össztömegük pedig kb. százszor nagyobb, mint a főövbeli kisbolygóké. Ahogy a Naptól való távolsággal változik a bolygók jellege (belső kőzetbolygók, kívül pedig gázbolygók keringenek), a kis égitestek összetétele is függ a központi csillagtól való távolságtól: a Mars és a Jupiter közötti aszteroidaövből álló kőzetbolygók találhatók, a Neptunuszon kívüli térségben keringő testeket pedig főként vízjég és fagyott gázok (például: ammónia, metán) alkotják. A Kuiper-övhöz tartozó első objektumot 1992-ben fedezték fel, és azóta ezernél is többet találtak. A legnagyobbak infravörös színképében sikerült kimutatni a kristályos és amorf vízjégre utaló spektrális jegyeket.

A Naprendszer kifelé a Kuiper-övvől még nem ér véget. A legkülső (kb. 50 000 csillagászati egység sugarú) tartományban, az Oort-felhőben található a hosszú keringési periódusú üstökösök. A belső Naprendszer égitestjeitől eltérően az üstökösfelhő gömbszerűen veszi körbe a Napot, és kb. öt földtömegnyi anyagában milliónyi lehet az 1 km-t meghaladó méretű üstökösök száma. Ilyen távolságból a Naptól a közeli csillagok gravitációs hatása is megzavarhatja egy-egy üstökösök mozgását, és ha a kis test befelé térül el, akkor rövid periódusú üstökössé válik.

Ezek az égitestek a Nap közelébe érve látványosak, és alaposan vizsgálhatók. Sőt, úrszondákkal már közelről is tanulmányozták néhány üstökös tulajdonságait, összetételét, viselkedését.

Amíg elegendően távol vannak a Naptól, az üstökösök magokat legfeljebb a pályájuk alapján lehet megkülönböztetni a „közönséges” kisbolygóktól. Az üstökösök pályája ugyanis jóval elnyúltabb ellipszis, mint a kisbolygóké, és nem is koncentrálódik az ekliptika síkjába. Az üstökösök magjai kövek, jégek és fagyott gázok konglomerátuma, amelyet többnyire poros burok vesz körül. Találhatóan piszkos hógolyókhoz hasonlítják az üstökösöket. A hógolyóval ellentétben azonban az üstökösök alakja szabálytalan, jellemző mérete néhány kilométer.

A Naprendszer belsejébe tartó üstökösököt egyre jobban melegíti a Nap sugárzása. A Jupiter pályáján belülré kerülve a Nap felőli oldala annyira felmelegszik, hogy a porózus felszínen a különféle jégek gáz halmazállapotúvá szublimálva távoznak az üstökösből. Az elillanó gáz sok port is magával sodor. Előbb a kóma alakul ki az üstökösök körül, majd a Nap sugárnyomásának hatására a gáz és a por a Nap irányával ellentétesen húzódó, kiterjedt csóvát alkot.

Mivel az üstökösök anyaga megőrizte a Naprendszer kialakulásának idejére jellemző kémiai összetételt, a csillagászok nagy figyelmet fordítanak az időnként feltűnő égi jövevényekre. A 76 éves periódusú Halley-üstökösöt legutóbbi, 1986-os napközelsége idején több úrszondával közelről is megvizsgálták. A Halley-üstökös színképében a vizgőzre utaló 2,7 mikrométeres hullámhosszú vibrációs sávokat mégis először a Földről sikerült kimutatni, mégpedig egy repülőgép fedélzetén működő infravörös-observatóriumból (Kui-

per Airborne Observatory – KAO). Abban a magasságban, 14 km-rel a földfelszín fölött, ahol a KAO az észleléseket végezte, a légkör páratartalma már egészen alacsony, de a vízgőz még ott is zavaró színeképvonalakat kelt a spektrumban. Az üstökösbeli vízgőztől származó színeképvonalakat úgy sikerült egyértelműen megkülönböztetni a földi légköri vízpára keltette vonalaktól, hogy az üstökös színeképet olyankor vették fel, amikor nagyon gyorsan mozgott a Földhöz képest. Ilyenkor a sebesség látóirányú komponense a közismert Doppler-effektus miatt más hullámhosszhoz „tolja” a színeképvonalakat, emiatt jól szétválnak a földi eredetű és az üstököستől származó vízgőzvonalak. A 20. század végének látványos üstökösét, az 1997-ben napközbe került Hale–Bopp-üstököst már az időközben pályára állított Infrared Space Observatory (ISO) műszereivel vizsgálták. Az ISO spektrográfjaival készített színeképek megerősítették az üstökösök vízbőségét: tömegük 80%-át ez a molekula alkotja.

A Halley-üstökös óta más üstökösöket is felkerestek űrszondákkal. A Deep Impact-



3. ábra • Por és gőz szabadul ki a Hartley-2-üstökösből (NASA EPOXI szonda felvétele)

szonda kristályos vízjeget észlelt a Tempel-1-üstökösben. Legutóbb 2010 novemberében a Hartley-2-üstökös magjáról készített látványos felvételeket a NASA EPOXI szondája. A 3. ábrán látszik a heves anyagkiáramlás az üstökös magjából, és meglepetésre, nem csak a Nap felőli oldalon.

Űrszondák tömegspektrométereivel, illetve földi spektroszkópiával meghatározták a deutérium és hidrogén arányát üstökösökben. A D:H arányra 0,0003 értéket kaptak, ami kétszer nagyobb a földi óceánok vizére jellemző értéknél. Ez arra utal, hogy a Földre nem kizárólag üstökösök becsapódásával került víz.

Az üstökösök spektroszkópiai méréseiből meghatározták az orto- és paravíz gyakoriságát is, abból pedig a vízmolekulák keletkezésekor uralkodó hőmérsékletet. Az eredményül kapott 25–35 K azt jelzi, hogy az üstökösök a csillagközi térben vagy az ősi Naprendszer legkülső régióiban alakultak ki.

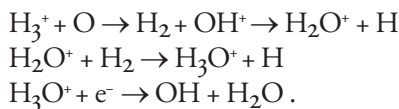
Túl a Naprendszeren

Exobolygók • Jelenleg a csillagászat egyik legeredményesebb területe a Naprendszeren kívüli bolygók, bolygórendszerek kutatása. Naphoz hasonló csillag körül keringő bolygót (exobolygót) először 1995-ben találtak, napjainkban pedig már félezernél többet ismernek. Eleinte főleg a bolygónak a gazdacsillagra gyakorolt gravitációs hatására fellépő Doppler-effektust vizsgálva keresték az exobolygókat a gazdacsillag színeképeiben fellépő vonalak hullámhosszát mérve. A szuperpon-tos fényességmérést lehetővé tevő fotometriai űrtávcsövek (elsősorban a Kepler-űrszonda 1,4 m átmérőjű távcsöve) segítségével ma már az olyan parányi fényességsökkenést is észlelni lehet, amelyet egy exobolygónak a gazdacsillag korongja előtti átvonulása okoz.

A csillaguk előtt rendszeresen (a keringési periódusuk szerinti időközönként) áthaladó bolygók alkalmasak az exobolygók légkörének tanulmányozására is. A gazdacsillag színeképét össze kell hasonlítani egy olyankor készített spektrummal, amikor a csillag fénye áthaladt az előtte átvonuló bolygó légkörén is, és a két színekép különbségéből meg lehet állapítani az exobolygó légkörének kémiai összetételét. Az infravörös tartományban felvett spektrumokból vízgőzt sikerült kimutatni a HD 189733 és a HD 209458 csillagoknak a Jupiterénél nagyobb tömegű (és a gazdacsillaghoz egészen közel keringő, azaz nagyon forró) bolygóinak atmoszférájában. A víz jelenléte tehát az idegen naprendszerekben is természetes.

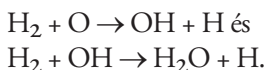
Víz a csillagokban és a csillagok között

A csillagközi anyagban az alacsony hőmérséklet miatt főként olyan kémiai reakciók mennek végbe, amelyekhez nem kell energiát betáplálni. A bőségesen jelen levő hidrogén egyes atomjait a nagy energiájú kozmikus sugárzás ionizálja, az elektronját vesztett hidrogénatom (proton) pedig egy hidrogénmolekulával egyesülve H_3^+ iont képez. Ez a nagyon reakcióképes ion kölcsönhat az atomos oxigénnel, és a következő reakciósor zajlik le:



A csillagközi anyag sűrű molekulafelhőiben egészen alacsony a hőmérséklet. Az ott levő szén- és szilíciumtartalmú porszemcsék felületén megtapadó hidrogénatomok kémiai reakcióba léphetnek a porszem külsején levő oxigéntartalmú molekulákkal, ennek hatására pedig H_2O keletkezik, ami a mindössze néhány kelvin hőmérsékleten rögtön

jégbevonatot képez a porszemcsén. Ahol a hőmérséklet meghaladja a 300 K-t, egyszerűbb kémiai reakciók során is képződhet vízmolekula:



Hogy ezek a lehetséges reakciók valóban végbemennek, azt az Európai Űrügynökség ISO (Infrared Space Observatory) nevű űrszondája igazolta. Az 1995–1998 között működött szondán 60 cm átmérőjű távcsővel és az arra szerelt négy különféle érzékelővel (kamera, fotométer és spektrográfok) vizsgálták a kozmikus eredetű infravörös sugárzást. S hogy miért csupán ilyen viszonylag rövid ideig, amikor például a Hubble-űrtávcső már több mint két évtizede van üzemben? Az infravörös tartományt vizsgáló űrszondák működési idejének tartamát az szabja meg, hogy mennyi időre elegendő a hűtésre használandó cseppfolyósított gáz (például hélium), amelynek párolgása tartja alacsonyan az észlelőberendezés hőmérsékletét. Hűtés nélkül a távcső és a detektor saját hőmérsékleti sugárzása jóval erősebb, mint a keresendő kozmikus jel.

Az ISO leglényegesebb felfedezése, hogy amerre csak vizsgálódott, mindenütt talált vizet – a Naprendszeren belül és jóval azon kívül is: csillagok légkörében, a csillagközi térben és távoli extragalaxisokban is. Az ISO által észlelt széles (2–200 μm) spektráltartományba a gőz vagy jég állapotú víznek olyan sok színekvonalra esik, hogy a víz egyértelmű kimutatása nem ütközött nehézségbe.

Sőt a színeképi jegyek alapján még azt is meg lehetett állapítani, hogy a jég a vizsgált helyen amorf vagy kristályos állapotú-e. A hideg csillagközi porszemcséken általában amorf vízjég képződik. Meglepő, de bizonyos

csillagok légkörében is találtak vízjeget. Ezek vagy egészen idős, vagy rendkívül fiatal csillagok, amelyek mindegyike alacsony felszíni hőmérsékletű, ennek megfelelően vörös színű. Az ilyen csillagok körül vízgőzt is kimutattak, ahol a jég már szublimál a környezet hőmérséklete miatt. Másfajta megfigyelésekből tudni lehet, hogy a csillagfejlődés végénél tartó vörös csillagokat néhány száz K hőmérsékletű burok veszi körül, amelynek anyagát molekulák és porszemek képezik.

Az egészen fiatal csillagok és a még csillaggá sem vált protocsillagok környezetében levő vízgőz azt is jelzi, hogy a csillagképződés környezetében is gyakori a vízmolekula. Az Orion-ködre meghatározták a benne levő víz összetömegtét is: a Föld teljes vízkészletének egymilliószorosát tartalmazza ez a csillagképző csillagközi felhő molekuláris formában.

Ezek után már az sem meglepő, hogy a mi Napunk légkörében is kimutattak vizet. Illetve mégis meglepő! A Nap felszínének tekinthető réteg, a fotoszféra hőmérséklete 5600 K. Ilyen forróságban a vízmolekulák atomjaira esnek. A fotoszféra alacsonyabb hőmérsékletű helyei a napfoltok, ahol „csak” 3200 K körüli a hőmérséklet, és éppen a napfoltokat vizsgálva észlelték a vízmolekulák jellegzetes rotációs vonalait a mikrohullámú tartományban. A Nap kutatásával foglalkozó SOHO-űrszonda (1995 óta működik) megfigyeléseit elemezve még találgatni se kellett, hogy honnan kerül a víz a Nap felszínére: a Napba zuhanó üstökösök szállítják oda – hente átlagosan két ilyen kozmikus szikladarab (vagy inkább hógolyó) találja telibe a Napot.

Az idős csillagoknál kimutatott vízgőz egy része is eredhet üstökösbecsapódások alkalmával felszabadult vízmolekuláktól. De az idős óriáscsillagok környezetének fizikai vi-

szonyait elemezve egy másik magyarázat is elképzelhető. A vörös óriáscsillagok körüli porburok inhomogén, ezért a környező csillagok nagy energiájú sugárzása át tud hatolni a burok ritkább részein, és az ibolyántúli sugárzás fotonjai szétbontják a porszemcsék szilícium- és széntartalmú molekuláit, az ezekből kikerülő oxigénatomok pedig a csillagkörüli anyag hidrogénatomjaival vízmolekulát képeznek. Ezt már a 2009-ben felbocsátott Herschel-űrszonda mérései alapján vélik a szakemberek.

Túl a Tejútrendszeren • Érzékeny műszerekkel már jóval a Tejútrendszeren túl, nagyon távoli galaxisokban előforduló vizet is ki lehet mutatni. Ezt elősegíti, hogy az Univerzum tágulása miatt fellépő vöröseltolódás (a jól ismert Doppler-effektus) következtében a vízmolekula rotációs eredetű színképvonalainak hullámhossza a Földről nem tanulmányozható színképtartományból a milliméteres hullámhossztartományba kerül, ha a vizsgálandó galaxis nagyon távol van, ezek a vonalak pedig rádiótváncsövel a földfelszínről is észlelhetők.

Sőt, a vízgőz bizonyos körülmények között kialakuló mézerhatásra gerjesztett sugárzását is detektálták extragalaxisokat vizsgálva. A mézerjelenség a mikrohullámú színképtartományba eső stimulált emisszió, a látható fényt kibocsátó lézer hosszabb hullámú rokona.

A legtávolabbi hely, ahol eddig vízgőz jelenlétét sikerült kimutatni, egy 11 milliárd fényévre levő galaxis ún. *kvazártevékenységet* folytató magja. Ennek detektálásához a véletlen szerencse is hozzájárult: pontosan a távoli kvazár látóirányában, az előtérben (tőlünk 8 milliárd fényévre) egy másik galaxis van, amelynek tömege gravitációs lencseként felerősíti a háttérben levő objektum sugárzását. Így a legnagyobb földi rádióteleszkóppal,

a 100 m átmérőjű effelsbergi (Németország) antennával mindössze 14 órán át kellett gyűjteni a kvazárról érkező sugárzást a mézer eredetű vízgőzvonala detektálásához. Ha nem lépett volna fel ilyen lencsehatás, legalább másfél éven át gyűjtött adatok vezethettek volna hasonló eredményre.

A víz tehát nemcsak az ember számára fontos molekula. Bőséges előfordulása az univerzum mindennapjai szempontjából is meghatározó.

Kulcsszavak: *víz, bolygó, hold, Hold, Europa, Mars, csillag, csillagközi anyag*

IRODALOM:

Encrenaz, Thérèse (2007): *Searching for Water in the Universe*. Springer-Praxis

Hanslmeier, Arnold (2011): *Water in the Universe*. Springer

Kereszturi Ákos (2006): Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből. *Magyar Tudomány*. 166, 8, 946–954. • <http://www.matud.iif.hu/06aug/05.html>



Tanulmány

A FILOZÓFIA ÉS A TUDOMÁNYOK VITAINDÍTÓ

Nánay Bence

PhD, University of Antwerp, Cambridge University
bn2o6@cam.ac.uk

A filozófia és a tudományok¹ kapcsolata soha nem volt problémamentes, de az utóbbi időben egyenesen viharosnak nevezhető. Sok természettudós azt gondolja, hogy a filozófia nem vehető komolyan, mert semmibe veszi a tudományok által felfedezett empirikus tényeket; sok filozófus pedig úgy véli, hogy ezeknek az empirikus tényeknek semmi közük a filozófiához, melynek nem kell tudomást vennie a tudományokról.

Tanulmányom arról szól, hogy miért elfogadhatatlan mind a két álláspont, mind a filozófusok, mind a tudósok számára. Ehelyett azt javaslom, hogy a filozófiát tekintsük elméleti természettudománynak. Tudatában vagyok, hogy ez radikális elgondolás – mint ahogy ez egy vitaindító esetében el is várható –, de nem látok alternatívát. Ráadásul ez nem pusztán normatív javaslat arról, hogy milyen jó lenne, ha ilyen lenne a filozófia: a kortárs analitikus filozófia épp ebbe az irányba tart (bár kissé bizonytalanul).

Több kollégám és ismerősöm is felhívta a figyelmemet arra, hogy ez a cikk – és az

¹ *Tudomány* alatt, itt és a következőkben *természettudományt* értek.

álláspont, amelyet itt kifejtek – a mai magyar politikai körülmények között könnyen félreértelmezhető, elsősorban a pár hónapja „filozófus-per”-ként elhíresült ügy miatt. Fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy ez a cikk semmilyen formában nem erről az ügyről szól. Ez az írás nem aktuálpolitikai állásfoglalás, és nincs semmilyen aktuálpolitikai vetülete vagy következménye. A filozófia és a tudományok zavaros kapcsolatát szeretném tisztázni – és vitaindító szándékkal egy radikálisnak tűnő javaslatot tenni arról, hogyan érdemes megközelíteni ezt a kapcsolatot.

A filozófia halott!

A tavaly nagy port kavart *The Grand Design* című könyvben Stephen Hawking és társ szerzője a következőkkel kezdi rögtön a bevezetőt: „A filozófia halott. Nem tartott lépést a tudományok (különösen a fizika) legújabb fejleményeivel. A tudósok lettek mára a felfedezés fátylájának hordozói a világ megismerésében” (Hawking – Mlodinow, 2010, 5).

Nehéz lenne tagadni, hogy manapság a tudomány, és nem a filozófia tekinthető a világ megismerése fátylahordozójának. De