

# A VILÁGEGYETEM FEJLŐDÉSE

Németh Judit

az MTA levelező tagja, nyugalmazott egyetemi tanár, ELTE TTK – [judit@drj.elte.hu](mailto:judit@drj.elte.hu)

*„Az Univerzumban az a legérthetlenebb, hogy megérthető.”  
(Einstein)*

Sokan közülünk elgondolkodnak néha az Univerzumban, amiben élünk, és arról, milyen lehet a csillagos ég olyan messze tőlünk, ahol már nem látjuk, mi van. De még izgatóbb kérdés, hogy milyen volt a Világegyetem régen és milyen lesz sok milliárd év múlva. Olyan volt valaha, mint ma, és olyan is marad? A válasz sokszor az, hogy ezt úgyse tudjuk megmondani, nem érdemes ezekről a kérdésekről gondolkodni, vagy esetleg az, hogy hagyjuk ezeket a kérdéseket a megválaszolását a szakértőkre. De a gondolkodó emberek egy részét foglalkoztatják ezek a kérdések, és szeretnének a tudomány mai szintjén választ kapni rájuk. A huszadik században rendkívül sokat fejlődtek kozmológiai ismereteink, és ma már azt hisszük, főbb vonalakban egyszerűen le tudjuk írni a Világegyetem fejlődését.

## *A Világegyetemről alkotott régi elképzelés*

A XX. század elejéig az Univerzumot statikusnak képzelték, ami az időben nem változik. Természetesen a statikus megoldással kapcsolatban merültek fel problémák. A három legfontosabb ezek közül a következő:

1.) A csillagok egymásra vonzóerővel hatnak. Az erő hatására gyorsulás jön létre, tehát a csillagoknak mozogniuk kell, nem állhatnak. Isaac Newton ezt az ellentmondást úgy akarta feloldani, hogy azt mondta, az Univerzum végtelen, minden csillagra minden irányból

egyforma vonzás hat, így azok nem mozdulnak el. Ez azt jelenti, hogy a Világegyetemnek nem lehet közepe és nem lehet széle.

2.) A hőhalál problémája. A termodinamika törvényei szerint a rendszerek változása során csak olyan mozgás jöhet létre, amelyben az entrópia (a rendszerek rendezettségére jellemző adat) vagy állandó, vagy növekszik. Természetesen lokálisan lehetséges, hogy valahol nagyobb rend alakul ki, de annak az az ára, hogy másutt még nagyobb lesz a rendezetlenség. (Például felmelegszik a rendszer. Nagyobb hőmérséklet nagyobb rendezetlenséget, azaz entrópia-növekedést jelent.) Ha a Világegyetem végtelen ideje létezne, az entrópia már régen kiegyenlítődött volna (hőhalál). Ma viszont nem ez a helyzet (például sugárzások vannak). Ez azt jelenti, hogy a Világegyetem kora nem lehet végtelen, mert még nem értük el a termodinamikai mennyiségek teljes kiegyenlítődését.

3.) A legérdekesebb felmerült ellentmondás talán az Olbers-paradoxon volt. Ha végtelen a Világegyetem, végtelen nagy számú csillag sugároz, ezeknek a fényét látnunk kellene. Igaz, hogy ezek messze vannak tőlünk, így kevésbé fényesek, de végtelen sok van belőlük. Ha ennek a sugárzásnak az átlagát kiszámoljuk, az éjszaka (még a sugárzást csökkentő mennyiségeket figyelembe véve is) olyan fényes kellene hogy legyen, mint ha az ég minden pontján egy Nap lenne. Nem lehet tehát a Világegyetem végtelen nagy. De egy további probléma is felmerül: ha ezek a csillagok végtelen idő óta sugároznak, fel kellett hogy melegítsék a csillagközi anyagot

legalább olyan fényesre, mint a csillagok felzíne. Mivel ez nem következett be, a csillagok nem sugározhatnak végtelen ideje.

Jellemző a csillagászat és kozmológia fejlettségére a XIX. században, hogy noha a problémákat ismerték, választ adni rá a múlt század húszas éveig nem tudtak.

### *A régi elképzelés módosulása – az Univerzum tágulása*

A modern kozmológia kezdete Albert Einstein nevéhez fűződik, aki 1915-ben megalakította az általános relativitáselméletet. Eszerint a bolygók Nap körüli mozgásuk során a legegyszerűbb pályát követik, de a Nap által meggörbített téridőben. Newton törvényei továbbra is jól leírják a gravitációt, de csak akkor, ha a tárgyak nem nagy sebességgel mozognak, és a gravitáció nem ultraerős. Az általános relativitáselmélet szerint a téridő görbülete okozza a gravitációt, azaz a tér hat az anyag mozgására, és ugyanakkor az anyag okozza a görbületet, a tér szerkezetét tehát a tömeg alakítja ki.

Az általános relativitáselmélet egyenletei alkalmasak voltak arra, hogy az Univerzum fejlődését is leírják. Az Einstein-egyenletek következményeit kutató fizikusok (maga Einstein is) meglepetve állapították meg, hogy a megoldások nem statikus teret írnak le: az Univerzum vagy tágul, vagy összehúzódik. Egészen addig senki nem kételkedett a tér állandóságában. Ez annyira mélyen gyökerezett a tudományos világképben, hogy még Einstein is, mikor rájött, hogy egyenleteinek megoldása egy olyan Világegyetem, amely vagy tágul, vagy összehúzódik, bevezetett egy állandó tagot, az ún. kozmológiai állandót, hogy statikus megoldást kapjon. Alekszander Friedmann mutatott rá, hogy ez instabil megoldást jelent: a stabil megoldás az, hogy a tér vagy tágul, vagy összehúzódik.

Az általános relativitáselmélet fenti megállapításának igazolása a csillagászati megfigyeléseknél használt eszközök fejlődése ré-

vén következett be. A húszas években a távcsövek javulásával Edwin Hubble-nak sikerült megfigyelnie a környezetünkben levő galaxisokat, és azt állapította meg, hogy azok nagy része távolodik tőlünk, akármilyen irányban is vannak. Megfigyelései során a galaxisok atomjai által kibocsátott fényt vizsgálta. A galaxisok gerjesztett atomjaiban az elektronok mélyebb energiaállapotokba átmenve adott hullámhosszú fényt bocsátanak ki. Földi viszonylatban tudjuk, melyik atomnál mekkora a kibocsátott fény hullámhossza, illetve a frekvenciája. Ha egy objektum, ami a sugárzást kibocsátja, távolodik tőlünk, a hozzánk érkező fénynek ugyanannyi kibocsátott rezgés esetén nagyobb utat kell megtennie, tehát a hullámhossza megnő. Növekvő hullámhossz esetén vörösebbnek látjuk a sugárzást. Ezt nevezik vöröseltolásnak.<sup>1</sup> Ha a fényforrás közeledik felénk, kékeltoulásról beszélünk. A hullámok a térrel együtt összehúzódnak vagy megnyúlnak.

Hubble azt figyelte meg, hogy a galaxisok majdnem mind vöröseltolódást mutatnak. Minél messzebb volt egy galaxis, annál nagyobb sebességgel távolodott tőlünk. Hubble tehát felfedezte, hogy a Világegyetem tágul. Ez a huszadik századi tudomány egyik legfontosabb felismerése.

Az, hogy minden galaxis távolodik tőlünk, természetesen nem azt jelenti, hogy mi vagyunk a Világegyetem közepe: a térben minden pont távolodik minden ponttól, azaz maga a tér tágul.

Ezt a jelenséget két dimenzióban könnyű megérteni. Gondoljunk el egy kis léggömböt, amelyre kis köröket rajzolunk. Ha a léggömböt felfújjuk, nő a sugara, a felszínén minden kör távolodik mindegyiktől, noha közben nem mozdulnak el, és a körök sugara nem nő: maga a tér tágul. A távolság változása a tér tágulására jellemző értéktől (a

<sup>1</sup> A vöröseltolódásról Christian Doppler és Edwin Hubble emlékezte kapcsán lásd Szabados László cikkét e számunk 1256. oldalán.

léggömb sugarától), a távolodási sebesség a tér időbeli változásától és két kör távolságától fog függeni. Tehát minél messzebb van egymástól két galaxis, annál gyorsabban távolodnak egymástól.

Felmerül a kérdés, mi lesz az általunk ismert Világegyetem jövője. Jelenleg a galaxisok távolodnak egymástól, akárcsak egy Földről kilőtt rakéta a Földtől. Rakéta esetén a távolodás sebessége lassulni fog, mert a Föld gravitációs ereje vonzza a rakétát. Ha elég nagy a kezdeti sebesség, a rakéta végleg eltávolodhat a Földtől, míg kisebb kezdeti sebesség esetén visszaesik rá. A rakéta sorsa függ a kezdeti kilövési sebességtől, továbbá a Föld tömegétől, hiszen a Föld gravitációs vonzása a tömegétől függ. Van egy kritikus Föld-tömeg, ami meghatározza, adott kezdeti sebességgel kilőtt rakéta elmegy-e a végtelenbe, vagy visszajön. Ezt az értéket nevezzük kritikus tömegnek. A Világegyetem jövője az összes, az Univerzumban található anyag-mennyiségtől függ. Ha ez a tömeg nagyobb a kritikus tömegnél, a Világegyetem elliptikusan tágul, azaz egy maximális érték után zsugorodni kezd. Kisebb tömeg esetén a távolodás végtelen. Mai ismereteink szerint a tömeg nem éri el a kritikus értéket, így az Univerzum anyaga örökké tágul.

A Világegyetemben található anyag mennyisége nemcsak a tágulás mértékére, hanem a tér szerkezetére vonatkozóan is nyújt információt (hiszen a relativitáselmélet értelmében az anyag alakítja ki a teret). Ha a tömeg éppen a kritikus értékkel azonos, a tér sík. Ha nagyobb a kritikus értéknél, elliptikusan zárt, ha kisebb, hiperbolikus, azaz nyeregyszerűen nyitott.

Az Univerzum tágulási sebessége nagyon közel van a kritikus értékhez: vagy éppen annyi, vagy kicsit kisebb annál. Érdeemes hangsúlyozni, hogy csak ilyen kezdeti sebességgel táguló Világegyetemben lehet életet elképzelni. Ha a kezdeti tágulási sebesség jóval nagyobb lett volna a kritikus értéknél,

a gravitáció hatása nem lett volna elég erős ahhoz, hogy galaxisok alakuljanak ki, ha sokkal kisebb, akkor a tágulás leállt és az Univerzum összehúzódott volna, még mielőtt a csillagok kialakulhattak.

Menjünk visszafelé az időben. Ha most tágul a Világegyetem, időben visszafelé menve egyre kisebb sugarúnak kellett lennie, míg közel egy pontra össze nem zsugorodott. A tágulás innen indult el. Ezt a kezdeti időpontot nevezik Nagy Bummnak. Ebben az időpontban az Univerzum nagyon kicsi és nagyon forró volt. Ettől az időponttól számoljuk ma az Univerzum korát, holott ez természetesen csak az időszámítás kezdetét jelenti. A számítások szerint az Univerzum kora kb. 13,5-15 milliárd év.

A tágulásnak van még egy fontos következménye, ami segít megismerni a Világegyetem fejlődését. Ha ma egy messze levő objektumot nézünk, annak a fénye nagyon régen bocsátódott ki, hiszen a fénynek el kellett hozzánk érkeznie. A galaxisok távolodási sebességét ismerjük a Világegyetem tágulásából. A kibocsátott fény vöröseltolódását mérve meg tudjuk határozni, hogy az adott sugárzást a kibocsátó objektum mennyi idővel ezelőtt bocsátotta ki. Minél messzebb van az objektum, annál régebben indult el a sugárzás. Ilyen módon a múltból kaphatunk információt. Megfigyelhetjük például azt, hogy milyenek voltak a galaxisok, mekkora volt a galaxissűrűség az Univerzum mai korának felénél, harmadánál. Ahogy nő a megfigyelési eszközeink élessége, egyre többet tudunk meg az Univerzum múltjáról.

#### *A kozmikus háttérsugárzás*

Az 1940-es évek végén George Gamow és munkatársai elkezdték komolyan elemezni az ősi Világegyetem kezdeti állapotát. Ha kezdetben az Univerzum nagyon kicsi volt, és abból tágult ki a mai méretére, akkor ott nagyon sűrű és forró anyagnak kellett lennie.

Ez az anyag mára nagymértékben lehűlt és kitágult. A hűlés során a forró anyagnak valamilyen sugárzást kellett kibocsátania. Ez a sugárzás azóta nagymértékben lehűlt; kiszámították, hogy a mai hőmérséklete 5 K körül kell hogy legyen (a K az abszolút hőmérsékleti skála zérus pontja -273 °C). Ezt a sugárzást észlelni kell. Azt is megállapították, hogy a hűlés kezdetén elég forró volt a rendszer ahhoz, hogy a legelemibb magreakciók végbemenjenek.

Noha a legtöbb asztrofizikus számára Hubble megfigyelése döntő bizonyíték volt a Nagy Bumm létrehozására vonatkozóan, voltak, akik nem fogadták el a táguló Univerzum feltételezését. Döntő fontosságú változást hozott 1965-ben a kozmikus háttérsugárzás felfedezése. Azt figyelték meg, hogy az Univerzumban egy egyenletes, 2,7 K hőmérsékletű sugárzás észlelhető. A sugárzás hőmérséklete, ha a Föld mozgását leszámítjuk, minden irányból öt nagyságrenddel belül izotróp volt. Ezzel megtalálták a Gamowék által megjósolt, a Nagy Bumm felléptére utaló sugárzást.

### *A Nagy Bumm elmélet*

A részecske- és magfizika eredményeinek felhasználásával a relativitáselmélet és a tapasztalati megfigyelések alapján alakult ki a kozmológia Nagy Bumm (vagy standard) elmélete. A huszadik század nagy részében ez volt az elképzelés az Univerzum fejlődéséről. Ennek lényege a következő: A Világegyetem egy adott pillanatban, amit a kezdetének nevezünk, egy forró, pontszerű helyre koncentráldott anyagból állt. A pontszerűt úgy kell érteni, hogy maga az egész tér volt pontszerű. Ahogy a forró, táguló anyag lehűlt, egyre összetettebb részecskék, anyagformák alakultak ki, ugyanis a rendezetlen mozgású részecskéknek már nem volt elég energiájuk ahhoz, hogy az összetettebb rendszereket ütközések révén alkotórészeikre bontsák szét.

### *Az Univerzum fejlődésének időskálája*

Részecskefizikai, magfizikai és termodinamikai ismereteink segítségével meg tudjuk mondani, hogy a tágulás és a hűlés során milyen részecskékből állt a Világegyetem anyaga.

Kezdetben ma még meg nem figyelt és a részecskefizika által vizsgált különböző részecskék voltak jelen.

1.) Ahogy hűlt a rendszer, a kvarkok (a protonok és neutronok alkotórészei), az elektronok és a neutrínók lettek a legfontosabb anyagformák.

2.) További hűlésnél a kvarkokból a köztük ható vonzóerő révén protonok és neutronok alakultak ki.

3.) Ahogy még jobban hűlt a rendszer, a protonok és neutronok atommagokká egyesültek. A domináló erők ekkor a magerők voltak. Ekkor alakultak ki a legkönnyebb atommagok: a deuteron (a deutérium atom atommagja), a hélium és a lítium. Mivel a neutronok bomlékonyak, csak egy részük tudott a protonokkal atommagokká, elsősorban héliummá alakulni. Nehezebb atommagok a gyors tágulás miatt nem tudtak kialakulni. A számítások szerint a héliumanyag 23%-a a protonanyag. Ez az érték kiválóan megegyezik a tapasztalattal. Az atommagok három perccel a Nagy Bumm után alakultak ki.

4.) További hűlés során a pozitív töltésű protonok, illetve atommagok az elektronokkal elektromágneses kölcsönhatás révén semleges atomokká alakultak át. A semleges atomok az ősrobbanás után 300 ezer évvel keletkeztek.

5.) A gravitációs vonzás révén az atomok lassan galaxisokba tömörültek.

### *Az ősrobbanás-elméletet igazoló megfigyelések*

Összefoglalva, a Nagy Bumm elméletét a következő megfigyelések igazolják:

- 1.) az Univerzum tágulása;
- 2.) a kozmikus háttérsugárzás fellépte;
- 3.) a könnyű elemek aránya (a galaxisokban talált könnyű elemek mennyisége megegyezik az elméletileg számolt értékkel);
- 4.) a galaxisok és a nagy-skálájú szerkezetek kialakulása megegyezik a várttal.

Érdeemes megjegyezni, hogy ezek a megfigyelések mind az első másodperc utáni eseményekre vonatkoznak, és semmit nem mondanak az első másodperc előtt történtekről.

#### *Az ősröbbanás-elmélettel kapcsolatban felmerülő legfontosabb problémák*

Az elmélet rendkívüli sikere ellenére kezdettől fogva felmerült néhány probléma. Ezek közül a legfontosabbak a következők:

1.) A síkság problémája. Tapasztalatunk szerint a Világegyetem közel sík. Ez csak akkor lehetséges, ha a kezdeti időben a tömeg 10-15 számjegyig megegyezett a kritikus értékkel. Miért volt a tömeg éppen a kritikus érték?

2.) A háttérsugárzás izotrop, azaz minden irányból egyforma a sugárzás. Ez csak úgy magyarázható, hogy minden tartomány, ahonnan a sugárzás jön, kapcsolatban volt a többivel, különben érthetetlen lenne, miért azonos sugárzást bocsátanak ki. Az Univerzumnak azonban csak azok a tartományai lehetnek kapcsolatban egymással, amelyeket a fény a kezdet óta össze tudott kapcsolni, azaz amelyek  $d=ct$  távolságra vannak egymástól, ahol  $c$  a fény terjedési sebessége és  $t$  a Világegyetem kora. A megfigyelések szerint azonban a Világegyetem mérete, ahonnan a fény hozzánk jön, nagyobb, mint  $d$ . Hogy lehetséges akkor az izotrópia?

Ahhoz hogy az anyag galaxisokká tömörüljön a gravitációs erők hatására, kezdeti anyagcsomósodások kellett hogy létezzenek. Honnan származnak ezek a kezdeti anyagfluktuációk?

3.) Említettük a korábbiakban, hogy kezdetben egy forró anyag volt a kis térre korlátozódott Világegyetemben. Hogy alakult ki ez a forró anyag?

#### *A felfűvódó Világegyetem*

A standard kozmológia problémáinak a megoldására vezették be a nyolcvanas években a felfűvódó Világegyetem fogalmát, az inflációt.

Az infláció elmélete szerint a Nagy Bumm utáni első pillanatokban a kvantumgravitáció törvényei uralkodtak. Ennek során parányi kvantumos fluktuációk alakultak ki. Bonyolult térelméleti okok miatt az Univerzum ekkor hihetetlenül kitágult,  $10^{33}$  s alatt ötven nagyságrendet nőtt a sugara, miközben óriási felmelegedés következett be. Ezt a tágulást és felmelegedést nevezik inflációnak. Ez a felfűvódó periódus csak nagyon rövid ideig tartott, utána már a fentiekben leírt, Nagy Bumm utáni fejlődés következett be. A tér tágulása lecsökkent a korábbi értékre, és az anyag lassan hűlni kezdett.

Az infláció fellépte megmagyarázza a Nagy Bummal kapcsolatos problémákat.

1.) A hihetetlen nagy tágulás azt okozza, hogy bármi volt korábban a tér görbülete, az infláció során az kisimult. Az infláció előrejelzése tehát az, hogy a tér sík.

2.) Mivel a Világegyetem első pillanataiban, a felfűvódás előtt a Világegyetem minden része kapcsolatban volt a többivel, a sugárzás izotrópiája nem meglepő.

3.) A kvantumos fluktuációk a felfűvódás során megnöttek, és a gravitáció hatására ezekből alakultak ki évmilliárdok során a csillagok, galaxisok, galaxishalmazok.

4.) Az anyag felmelegedése a felfűvódás során következett be.

Az infláció fellépte ma általánosan elfogadott, létrejöttének az okát és pontos kialakulását azonban a kozmológusok és a részecskefizikusok még vizsgálják.

*Az Univerzum anyagsűrűsége  
– a barionos anyagmennyiség*

A csillagászatban, akár csak a természettudományok többi ágában, egy objektumot kétféle módon lehet észlelni: vagy közvetlenül figyeljük meg, vagy a többi objektumra való hatása révén.

Nagysebességű, illetve gyorsan forgó rendszereket csak nagy erők tudnak összetartani, a csillagászati rendszerekben pedig egyedül a gravitációs erő hatása lényeges. A galaxisok vizsgálatánál a csillagok sebességéből a galaxisokban és a galaxisok mozgásából a galaxishalmazokban tudjuk, hogy legalább 6–8-szor annyi anyag van bennük, mint amennyi látható. Ellenkező esetben a gravitációs erő nem lenne elég ahhoz, hogy a gyors mozgású csillagokat a galaxisokban tartsa.

Eleinte azt gondolták, hogy úgynevezett barna törpék vannak a galaxisokban. A barna törpe olyan anyag, ami barionokból áll (barionok a protonok, a neutronok és az atommagok együttesen), de nem elég meleg, és így nem világít (tehát nem bocsát ki fotonokat a látható tartományban).

Hamarosan kiderült, hogy ez a magyarázat nem kielégítő: lényegesen kevesebb barionos anyag van a galaxisokban, mint várnánk. A Világegyetem barionsűrűségét a különböző galaxisokban levő, ma található deuteronok gyakoriságából lehet a legjobban meghatározni (akár atommag, akár deutérium atomok formájában vannak jelen). Ennek az oka a következő: Egy proton és egy neutron deuteronná tud egyesülni. A deuteron gyengén kötött rendszer, nagy energiájú fotonokkal bombázva alkotórészeire szakad szét. Két deuteron egy alfa részé tud átalakulni, az alfa rész feltűnően erősen kötött részecske. Természetes ezért, hogy ha két deuteron annyira közel kerül egymáshoz, hogy a rövid hatótávolságú magerők már hatnak közöttük, alfa részé alakulnak át. Ahogy az ősrobbanás után a

Világegyetem hűlt, és a részecskék mozgási energiája egy kritikus érték alá csökkent, deuteronok jöttek létre. Ha az anyagsűrűség ennél a kritikus hőmérsékletnél nagy volt, a deuteronok nagy valószínűséggel ütköztek és alfa részé egyesültek. Ha a sűrűség kicsi volt, lényegesen több deuteron maradt meg. Ha meghatározzuk az intersztelláris anyagban a deutérium sűrűségét, a fentieket figyelembe véve meg tudjuk határozni a Világegyetem teljes barionos anyagsűrűségét a deuteronok kialakulásakor, és ebből a teljes anyagsűrűsége tudunk következtetni. A barionsűrűség nagyon jó közelítésben a kritikus anyagsűrűség 4 %-a.

A fenti megfontolásokból arra lehet következtetni, hogy galaxisokban kell olyan anyagnak lennie, amelyik gravitációsan kölcsönhat, és nem barionos anyag. Újabb rejtély előtt álltak az asztrofizikusok: ha a sötét anyag nem barionos, akkor miből áll?

*A sötét anyag*

Mi lehet a sötét anyag? Ma még nem tudjuk pontosan, ennek mibenlétére is a kozmológia már említett új ága, a részecske-asztrofizika keresi a választ. Két dolgot tudunk csak: a sötét anyag gravitációsan kölcsönhat, és nem barionos anyag.

Egy évtizeddel ezelőtt a kozmológusoknak megnyugtató elképzelésük volt a világról: az infláció. Az inflációelméletnek megfelelően az Univerzum közel sík. Ez azt jelenti, hogy a barionos anyag mellett rendkívül nagy mennyiségű sötét anyag van jelen, annyi, hogy a barionos és a sötét anyag együttesen kiadja a kritikus értéket. A sötét anyagról nem tudták, miből áll, de ezt a problémát majd megoldják a részecskefizikusok. A tér sík és örökké tágul, állandóan lassuló mértékben.

Ezt a harmonikus képet zavarta meg az a felismerés, hogy a gravitáló, azaz a sötét és a barionos anyag összege együttesen nem lehet több, mint a kritikus tömeg értékének egyharmada. Ha ennél nagyobb lenne, a

galaxisok kialakulása a nagyobb gravitáció miatt sokkal gyorsabban következett volna be, tehát ma már nem nőne jelentősen a galaxisszám, mert azok már a múltban kialakultak volna. Márpedig a messze levő galaxissűrűséget (ezek időben jóval korábban alakultak ki, hiszen a fénynek el kellett érkeznie hozzánk) összehasonlítva a közelivel (az újabban keletkezettekkel) azt kapjuk, hogy a galaxiskeletkezés gyakorisága időben nő. Ez a felismerés megdönthette volna az inflációban és annak előrejelzésében (az össztömeg ~ a kritikus tömeg) való hitet, ha a kilencvenes évek során két nagyon fontos új kísérleti eredmény nem erősítette volna meg azt. Az egyik a háttérsugárzás fluktuációjának pontos megmérése, a másik a szupernóvarobbanások egy típusának megfigyelése volt.

#### *Az új kozmológia – a háttérsugárzás fluktuációja*

Amint már említettük, a háttérsugárzás öt nagyságrendig egyenletes, ami azt jelenti, hogy bármilyen irányból jövő sugárzást vizsgálunk, öt nagyságrendig azonos lesz a hőmérséklete, eltérés csak az ötödik tizedesben található. Amíg az anyag atommagokból és elektronokból állt (a hőmérséklet olyan nagy volt, hogy semleges atomok nem tudtak kialakulni, mert a beléjük ütköző részecskék hatására elbomlottak), a fotonok kölcsönhatottak a töltött elektronokkal, az elektronok a protonokkal, a protonok a neutronokkal. Amilyen mértékben fluktuált az anyag (azaz bizonyos helyeken több atommag és elektron volt, bizonyos helyeken pedig kevesebb), ugyanolyan mértékben fluktuáltak a töltött részecskékkel kölcsönható fotonok is. Amióta azonban az atommagok és az elektronok semleges atomokká egyesültek, a helyzet megváltozott. Mivel a fotonok csak töltött részecskékkel tudnak kölcsönhatni, semlegesekkel nem, így azóta a sugárzás változatlanul terjed. Az a fluktuáció, amit a háttérsugárzásban ma megfigyelünk, a Nagy

Bumm után ~300 ezer évvel keletkezett, amikor a semleges atomok kialakultak.

A fluktuáció csökkenő amplitúdójú szinusz típusú hullámokkal írható le. Az inflációelmélet részletes és pontos előrejelzést ad az amplitúdók nagyságára, illetve a maximumok egymástól való távolságára. A megfigyelések egyik legfontosabb eredménye az volt, hogy a tér sík, ahogy azt az infláció alapján vártuk. A másik elég pontos adat a barionmennyiség mértékére vonatkozott. Az a megnyugtató eredmény adódott, hogy ez az érték a hibahatáron belül megegyezik a galaxisokban levő deutériumatomok meghatározásából kapott értékkel. A teljesen különböző elveken meghatározott értékek azonossága az elméleti és tapasztalati kozmológia nagy sikere volt.

Hogyan lehetséges az, hogy az össztömeg megegyezik a kritikus tömeggel, azaz a Világegyetem sík, és még sincs elég anyag? Nem teljesen igaz Einstein általános relativitás-elmélete? Ez nem nagyon képzelhető el (noha az elmúlt évben ilyen jellegű gondolatok is születtek). Nem elég jók az Einstein-egyenletek megoldásánál alkalmazott közelítések? (Ilyen jellegű elképzelések éppen magyar szerzőktől születtek az elmúlt hónapokban – ez rendkívül vonzó lehetőség.) Ehelyett azon kezdtek a kilencvenes évek végén gondolkodni a kozmológusok, hogy a sötét energia nem kell hogy a szokásos értelemben vett anyag legyen. Egyetlen lényeges tulajdonsága van: a gravitációs kölcsönhatáshoz a galaktikákban nem ad lényeges járulékot.

#### *A szupernóvarobbanások*

Említettük a legelején, hogy ha egy rakétát fellövünk, az lassulva távolodik a Földtől, mivel a Föld vonzóereje visszahúzza. Hogyan magyarázható azonban az, ha a rakéta egyre nagyobb sebességgel kezd el távolodni tőlünk (és természetesen a Föld gravitációs erején kívül semmi más erő nem hat

rá)? Csak egy magyarázat marad: a Föld taszítja a rakétát. Ilyen taszító erőket ismertünk eddig is, például azonos elektromos töltésű testek között, de a gravitációs erők négy évvel ezelőttig mindig vonzóan adódtak. 1998-ban megfigyelték, hogy nagyon távol tőlünk bizonyos csillagok (Ia típusú szupernóvák) gyorsulva távolodnak tőlünk. Részletes számítások azt bizonyítják, hogy ez a jelenség is csak sötét energia fellépésével magyarázható.

Ma még nem tudjuk, mi ez a sötét energia. De a hatását látjuk. Az Einstein-egyenletekben fellépő kritikus energiasűrűség kétharmada sötét energia. Nagyon simán oszlik el, mert ha csomósodna, meg tudnánk figyelni. Egy dolog látszik: a sötét energia a tudomány egyik legizgalmasabb és legfontosabb rejtvénye.

#### *Véletlen, hogy kialakulhatott az élet?*

A kozmológiai ismereteinkben a megfigyelések és kísérletek hatására bekövetkezett forradalmi változások nemcsak az anyagról kialakított nézeteinket módosították, hanem a jövőről való elképzeléseinket is. A sötét energia véget vehet annak a korszaknak, amelyben csillagok és galaxisok keletkeztek. A tér egyre gyorsabban fog tágulni, a galaxisok egymástól távolodnak, és egy űres Világegyetem marad vissza. Ezeknek a kérdéseknek az eldöntése a jövő tudósaira vár.

Érdeemes elgondolkozni azonban azon, mennyire hajszálon múltott az, hogy a Földön élet keletkezésére alkalmas feltételek alakultak ki. Már az eddigiekből is látható volt, hogy bizonyos szám adatok, kezdeti feltételek finomhangolása nélkül az élet soha nem jöhetett volna létre. Azt, hogy kezdetben az összenergiának a kritikus energiával sok tízesig meg kellett egyeznie, már említettük. Egy másik ilyen fontos szám az elektromos és a gravitációs kölcsönhatás viszonya. Ha ez csak egy százalékkal kisebb lenne, a gravitáció olyan erős lenne, hogy bogárnál

nagyobb teremtmények nem alakulhattak volna ki. Egy csillag felépítéséhez milliárd-szor kevesebb atomra lenne szükség, életkora csak kb. 100 ezer év lenne, a Nap ötmilliárd éves eddigi életkora helyett. Ilyen csillag körül nem alakulhatott volna ki élet.

Egy másik jellemző fontos szám a nukleáris erők erősségének és egy proton nyugalmi energiájának viszonya. Jelenleg a csillagokban az energiefelszabadulás négy proton héliummaggá való átalakulása révén következik be. Két proton közt a kölcsönhatás nem elég erős ahhoz, hogy kötött állapotot alkothassanak, a héliummá alakulás csak lassú, úgynevezett gyenge kölcsönhatások révén alakulhat ki. Másrészt két proton elektromosan taszítja egymást, a köztük levő vonzó kölcsönhatás csak akkor érvényesülhet, ha hőmozgás révén elég közel kerülnek egymáshoz.

Ha a fenti viszony csak 2 %-kal erősebb lenne, a protonok már az Univerzum fejlődésének kezdeti időpillanatában egyesülhetnének volna, nem lehetnének a csillagokban energiatermelő magreakciók. Ha viszont 2 %-kal gyengébb lenne, a proton nem kötődne a neutronhoz, a deuteron nem lenne stabil, összetett magok nem keletkezhetnének.

A hasonló viszonyokat még tovább sorolhatnánk. Az Univerzumban az élet lehetőségének kialakulását néhány szám értéke határozza meg. Tudatos ez, vagy véletlen? Mert a véletlenre is alapos magyarázat van. A Világegyetemről való mai tudásunk szerint sok, a mienkhez hasonló más világegyetem alakulhatott ki, a természeti állandók véletlenszerű eloszlásával. Ezek közül bizonyos kombinációk esetén kialakulhatott élet az Univerzumban, bizonyos kombinációk esetén nem. Isteni gondviselés a mi Világegyetemünk, vagy véletlen? – mindenki hite szerint döntse el.

---

Kulcsszavak: *Világegyetem, kozmológia, asztro-részecskefizika, ösrobbanás, sötét anyag, sötét energia*