

hősugárzásának elméletét. Azt találta, hogy a fekete lyuk hőmérséklete annál magasabb, minél kisebb a lyuk tömege. A forgás szögsebességétől is függ a hőmérséklet: minél gyorsabb a tengelyforgás, annál alacsonyabb a hőmérséklet. Így nyert hőtani megalapozást az a körülmény, hogy a forgássebesség nem léphet túl egy kritikus értéket. Ez az a forgássebesség, amelyen a lyuk hőmérséklete az abszolút zérus fok. A termodinamika törvényei ismert módon kimondják, hogy az abszolút zérus fokot megközelíteni lehet ugyan, de el nem lehet azt érni.

A fekete lyukak megfigyelése érthető módon igen nehéz feladat. A környezetükben az anyag mozgása alig különbözik a csillagok környezetében tapasztalttól. A különbség inkább abban rejlik, ahogyan a befelé hulló anyag viselkedik. A csillag felszínébe csapódó anyagot más jelenségek kísérik, mint a fekete lyuk határán – az eseményhorizonton – áthaladó anyagot. A csillagászok évtizedek óta küzdenek az egyértelmű megfigyelési anyag összegyűjtésén. Ebben egyre kitűnőbb eszközöket képesek felhasználni. A látható fény tartományában a Hubble űrtávcső több értékes felvételt szolgáltatott a galaktikák közepén feltételezett fekete lyukak környezetéről. A hevesen kavargó anyag gamma-sugárzást is kibocsát. Ezt számos műholdas berendezés figyeli meg. Közöttük kiemelkedő érzékenységgel a NASA Chandra műholdja és az európai űrhivatal XMM műholdja. A megfigyelések olyan finom részletekre is kiterjednek már, mint a relativisztikus forgási hatások a színekp vonalak alakjára.

Az elmúlt évben az a javaslat is napvilágot látott, hogy a nagy részecskegyorsítóknak az ütközések során fekete lyukakat lehetne találni. Ez a javaslat elnyerte az Egyesült Államokban a Gravity Research Foundation nevű alapítvány első díját.

**Perjés Zoltán**

Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest

## Kozmológia

IX. rész

### Az átlagsűrűség

Már a huszadik század elején – a galaxisok távolodásának, a Világegyetem tágulásának felfedezésekor – felmerült a kérdés, vajon a tágulás módja változik-e az idő múlásával. A klasszikus fizika fogalmait használva az egymástól távolodó galaxisoknak nő a helyzeti energiájuk egymás gravitációs terében. Az összenergia megmaradását feltételezve eközben a mozgási energiájuknak – vagyis a tágulás sebességének – viszont csökkennie kell. Hasonlóan ahhoz, ahogyan a feldobott kő helyzeti és mozgási energiája változik felfelé haladás közben. Hogyan lassul a tágulás és megáll-e valamikor? Ez az Univerzumban lévő vonzó anyag mennyiségétől, átlagsűrűségétől függ. Kiszámítható, hogy mekkora az a  $\rho_k$  kritikus sűrűség, ami mellett éppen végtelen idő alatt áll le a tágulás (azaz a tágulási sebesség határértéke nulla, amikor az idő tart a végtelen felé). Ennél kisebb sűrűség esetén a galaxisok sebessége végtelen idő alatt sem válna nullává (pozitív marad); ennél nagyobb sűrűség pedig kozmológiai tartamú, de véges idő alatt megállítaná és összehúzódnásba fordítaná a tágulást. A kritikus sűrűség értéke kapcsolatban van a Hubble-állandóval:  $\rho_k = 3H^2 / (8\pi G) = 1,88h^2 \cdot 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ , ahol  $G$  a gravitációs állandó. (A  $H$  és  $h$  állandók jelentéséről például sorozatunk VIII. részében olvashattunk.)

Itt meg kell jegyeznünk, hogy a kritikus sűrűségnek a fentiekben leírt, kitüntetett szerepe csak a legegyszerűbb kozmológiai modellekben áll fenn. Más modellekben, amelyekben a kozmológiai állandó nem nulla, nem ilyen egyszerű a helyzet, de a Hubble-állandó mért értékéből és az univerzális fizikai állandókból kiszámítható kritikus sűrűség ekkor is segít a modell és a megfigyelések összehasonlításában.

A Világegyetem  $\rho$  átlagsűrűségét akkor tudjuk kiszámolni, ha ismerjük az extragalaktikus objektumok térfogat-egységenkénti darabszámát (hány galaxis van mondjuk egy köbmegaparszekben), és van adatunk ezeknek az objektumoknak az átlagos tömegére is. A „darabszámsűrűségről” sorozatunk egy előző részében, a homogenitás fogalmának tárgyalásakor már volt szó. A galaxisok és galaxishalmazok tömegének meghatározására pedig különböző elveken alapuló, jól kidolgozott becslési módszerek állnak rendelkezésre. Ha például egy galaxis színképéből megmérhető tengelyforgásának sebességgörbéje, ebből meghatározható a tömege. Másfelől viszont összefüggés van a galaxisok abszolút összfényessége és tömege között is, és ez statisztikai mennyiségű objektum esetén elfogadható pontosságú átlagtömeg-meghatározást tesz lehetővé. Harmadik eljárás a kettős és többszörös galaxisok és galaxishalmazok esetében alkalmazható, a rendszer egyes tagjainak az egymáshoz viszonyított sebességét mérve, a sebességek ismeretében dinamikai megfontolások alapján megbecsülhető a teljes rendszer tömege.

A kozmológiában a sűrűség helyett egy dimenzió nélküli mennyiséget, az ómegát szokás használni, ami azt adja meg, hogy a tényleges sűrűség hogyan arányul a kritikus sűrűséghez:  $\Omega = \rho / \rho_k$ . Az átlagsűrűség ómegával kifejezve:  $\rho = 1,88 \cdot 10^{-29} h^2 \Omega \text{ g/cm}^3$ .

Az Univerzum átlagsűrűségére számos módszerrel rengeteg becslést végeztek már. Ezeket összefoglalva elmondhatjuk, hogy az elektromágneses spektrum teljes tartományában sugárzó („világító”) anyag átlagsűrűsége nagyjából  $\approx 2 \cdot 10^{-31} \text{ g/cm}^3$ , vagyis  $\Omega_v \approx 0,02$ . A  $v$  index arra utal, hogy itt kizárólag a világító anyagról van szó.

Számos megfigyelés utal azonban arra, hogy a világító anyag mellett jelentős mennyiségű sötét (tehát semmiféle elektromágneses hullámot ki nem bocsátó) anyag is van a galaxisok belsejében, illetve a galaxishalmazok galaxisai közötti térben.

Ez a sötét anyag csakis a gravitációs hatásai alapján vehető észre (pl. a galaxisok forgásából, galaxishalmazok tagjainak mozgásából számolt tömeg sokkal nagyobb, mint a fénykibocsátásuk alapján megállapítható tömeg). A legújabb vizsgálatok azt mutatják, hogy ennek a sötét anyagnak a tömege akár hússzor nagyobb lehet, mint a világító anyagé. A sötét anyag mibenlétére egyelőre inkább feltevések vannak, mint megfigyelések. Lehetséges alkotórészeiként szóba kerülhetnek a barna törpecsillagok, neutroncsillagok, fekete lyukak és a neutrínók, de léteznek egészen különleges elképzelések is. A legfrissebb megfigyelési eredmények szerint (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2003) az Univerzumot alkotó anyagformák részaránya:

- $4,4 \pm 0,4\%$  közönséges barionos anyag (azaz atomokból álló anyag);
- $23 \pm 0,4\%$  nembarionos sötét anyag (valószínűleg többnyire a fizikusok számára még ismeretlen részecskék). Ez lenne a hideg sötét anyag.
- $73 \pm 0,4\%$  „sötét energia” (amelynek mibenlétéről még senkinek sincs még elképzelése sem).

Összefoglalásként megállapítható, hogy az Univerzum anyagának mintegy 95%-a sötét, és csak a többi világít. Ennek alapján  $\Omega_0 \approx 0,3$ . Az  $\Omega$  index azt jelzi, hogy itt az összes anyagot figyelembe vesszük.

A részecskefizikusok az atommagokat alkotó protont és neutront – sok más egzotikus elemi részecskével együtt – barionnak\* nevezik. A túlnyomórészt protonokból és neutronokból álló anyagra a továbbiakban barionos vagy nemrelativisztikus anyag elnevezést fogjuk használni. Az utóbbi elnevezés arra utal, hogy a Világegyetem történetének általunk vizsgált korszakában a barionok hőmozgásból adódó sebessége jelentősen kisebb a fénysebességnél, ezért mozgásuk leírására a nemrelativisztikus fizikát lehet alkalmazni. Az Univerzum legkorábbi, rendkívül magas hőmérsékletű korszakaiban persze a barionok is a fénysebességgel összemérhető relativisztikus sebességgel mozogtak, és akkor a barionos anyag is relativisztikus volt. A későbbi korokban – és jelenleg is – a relativisztikus anyag egyetlen ismert képviselője a fotonokból álló kozmikus háttérsugárzás, hiszen a fotonok mindig fénysebességgel mozognak.

A proton és a neutron tömegének első három számjegye megegyezik:  $1,67 \cdot 10^{-24}$  g, az elektron tömege pedig ilyen pontosság mellett elhanyagolható. Ennek alapján az átlagsűrűségből kiszámolható, hogy a világító anyagot egyenletesen szétosztva a térben nagyjából tíz köbméterben lenne egy barion. Ha a sötét anyag is nagyrészt hidrogén volna, akkor a részecskesűrűség egy nagyságrenddel nagyobb lenne. Az átlagos barionsűrűség  $\Omega_B$  és  $h$  segítségével is felírható:  $n_B = 1,1 \cdot 10^{-5} \Omega_B h^2 \text{ cm}^{-3}$ . A B index a barionokra utal.

Az ómegára kapott érték azonban két okból is bizonytalan. Egyrészt azért, mert nagy a mérési hibája azoknak a megfigyelési módszereknek, amelyeket az átlagsűrűség meghatározására használnak. Másrészt azért, mert az ómega (a  $h$ -n keresztül) a Hubble-állandótól is függ, amit szintén elég nagy hibával ismerünk. Az ebből eredő bizonytalanság  $h^2 \in (0,25; 0,60)$  miatt egy kettes szorzó is lehet, ezért  $\Omega_B h^2 \in (0,1; 0,2)$ . A megfigyelések szerint az  $\Omega_B = 1$  érték még nem zárható ki teljesen, de nagyon valószínűtlen.

A mérések szerint elmondható tehát, hogy az Univerzum átlagsűrűsége kisebb a kritikusnál, számértéke  $\approx 3 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ , de ebből csak kevesebb, mint 5% a világító anyag.

### A kozmológiai állandó

Amikor Einstein – általános relativitáselméletét kidolgozva – megvizsgálta a gravitációs alapegyenletek lehetséges megoldásait, arra a megállapításra jutott, hogy ezek között nincs ott a korábban elfogadott csillagászati világképnek megfelelő, statikus, időben és térben állandó sűrűségű Világegyetem. Abban az időben még nem gondolták, hogy a Világegyetem egészében változik (ez a gondolat csak a vöröseltolódás felfedezése után vált ismertté), ezért Einstein a statikus megoldás elérésére beírt a gravitációs hatást megadó egyenletbe egy olyan állandót, ami általános taszítóerőt eredményez. Ez a kozmológiai állandó, a  $\Lambda$ , amit szokásos betűjele alapján a lambda néven is emlegetnek (nem tévesztendő össze a Hubble-állandóval). A kozmológiai állandóval megadott taszítóerőnek éppen ki kellett volna egyenlítenie a galaxisok között ható vonzóerőt, hogy azok egy helyben maradjanak. Az új állandóhoz persze semmiféle fizikai képet, létező forrást, okot nem lehetett kapcsolni. Az igazi gondot azonban nem ez okozta, hanem az, hogy az így kapott megoldások instabilak vol-

\* A barionok az elemi részecskék egyik családját alkotják, három kvarkból vagy három antikvarkból állnak. Legismertebb és (közönséges körülmények között) legstabilabb képviselőik a proton és neutron. Az elemi részecskéket a részecskefizika kezdetén tömegük szerint csoportosították: *foton, leptonok, mezonok, barionok*. Az elnevezések a görög *fény, könnyű, közepes* és *nehéz* szavakból származnak. Az atommagokat is összetartó erős kölcsönhatásban ezek közül csak a mezonok és a barionok vesznek részt, ezeket együtt *hadronoknak* nevezik. A leptonok közé tartozik a neutrínó, a müon, az elektron és a pozitron.

tak. Ha a gravitáció és kozmológiai állandó kényes egyensúlyát valami helyi zavar felborítja, az egész modell-világegyetem összeomlik vagy szétrepül. Az Univerzum tágulásának felfedezése után Einstein a lambda bevezetését élete legnagyobb tévedésének nevezte.

Voltak azonban, akik továbbra is kutatták a kozmológiai állandót tartalmazó megoldásokat és modelleket. A kérdés tehát már vagy nyolc évtized óta kísért, és a tudomány éppen a legutóbbi években jutott el oda, hogy a lambda értékét már csillagászati megfigyelésekből is meg lehet becsülni.

Bármekkorának feltételezzük a kozmológiai állandó értékét, megadhatunk hozzá egy olyan elméleti tömegsűrűséget, amely pontosan ellensúlyozná a lambda taszító hatását. (Negatív lambda esetén persze a taszító gravitációs hatású képzeletbeli anyagot kell számításba venni.) Ehhez a képzeletbeli sűrűséghez pedig ugyanúgy kiszámítható az  $\Omega_\Lambda = \Lambda c^2 / (3H^2)$  relatív sűrűségérték, mint a Világegyetemben található „valódi” anyag sűrűségéhez.

Ha a kozmológiai állandó nem nulla, akkor csak igen nagy távolságokon játszhat kimutatható szerepet. Az eddigi megfigyeléseket összefoglalva elmondható, hogy ez a távolság nem lehet lényegesen kisebb az 1 000 Mpc nagyságrendnél. Másként mondva kizárható, hogy  $|\Omega_\Lambda| \gg 1$ . A lambda meghatározásához azt kell megvizsgálni, hogy a nagyon távoli galaxisok távolodása ugyanazt a szabályt követi-e, mint a közelebbieké. Erre viszont olyan távolságmérési módszer kell, amelynek a pontosságát nem rontják fejlődési hatások. A csillagfejlődési modellből arra a következtetésre lehet jutni, hogy az Ia típusú szupernóva-robbanás során felszabaduló energia – és így a szupernóva abszolút fényessége – jól meghatározható érték. Ez a fényesség az évmilliárdokkal ezelőtti galaxisokban is ugyanannyi volt, mint ma, tehát az erre alapozott távolságmérés nagy távolságokig megbízható. Eddig mintegy negyven Ia típusú szupernóvára végezték el a mérést, és az eredmények  $\Omega_\Lambda \approx 0,7$  értéket valószínűsítenek, de a becslés hibahatára elég nagy.

Az utóbbi években egyre több űrkutatási program részfeladataként szerepelt a kozmológiai állandó értékének minél pontosabb meghatározása.

A lambda ma már nem csak a kozmológusok számára érdekes állandó. Az elméleti fizikusok napjainkban a kozmológiai állandót a vákuum energiasűrűségének jellemzésére is használják és vele kapcsolatban igen érdekes kutatásokat végeznek.

Szenkovits Ferenc

## tudománytörténet

### Kémia-történeti évfordulók

2003. június – augusztus

**320 éve**, 1683. július 11-én a mai Lengyelország területén született a német Caspar NEUMANN. Németországban, Hollandiában és Angliában tanult. A porosz király udvari gyógyszerésze volt, majd a Berliini Orvosi Collegium tanára. A bizmutról kimutatta, hogy az kémiai elem, leírta a cink tulajdonságait, tanulmányozta a kalomelt, kámfort, ópiumot, alkoholt. 1737-ben halt meg.

**290 éve**, 1713. augusztus 11-én Németországban született Christlieb Ehregott GELLERT. Németországi egyetemeken tanult, majd Szentpéterváron tanított egyidőben a