

Több mint 70 éve *Fritz Zwicky* megállapította, hogy a galaxishalmazok anyagának legnagyobb része nem világító, azaz sötét anyag. Három évtizeddel ezelőtt határozták meg a sötét tömeg pontos arányát az egyedi galaxisokban, és csak néhány éve, elsősorban a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás fluktuációiból, az egész Univerzumra vonatkozóan.

Időrendben először tehát a galaxishalmazok környezetében levő láthatatlan anyagkomponens létének szükségességét vetődött fel. A Coma-galaxishalmazt alkotó galaxisok mozgási sebességéből és abból a tényből, hogy a galaxishalmaz milliárd éves időskálán gravitációsan kötött rendszer, a viriál-tételt alkalmazva kiszámítható a halmaz össztömege. (A viriál-tétel értelmében egy zárt rendszer kinetikus energiája a gravitációs potenciális energiájának fele.) A látható tömeg, vagyis a halmazbeli galaxisok tömegének összege kisebbnek adódott a galaxishalmaz össztömegénél. *Zwicky* ezzel az 1933-as felfedezésével azonban messze megelőzte a korát, és meglehetősen eredményére nem fordítottak kellő figyelmet. (Amit, részben, az is magyaráz, hogy a zseniális tudóst kellemetlen modora miatt igyekeztek elkerülni a szakmabeliek.)

A sötét anyag létre csak az 1960-as évek végén született újabb bizonyíték, amikor *Vera Rubin* kezdő csillagászként spirális galaxisok forgási sebességét kezdte vizsgálni. A centrum környékétől eltekintve az ilyen galaxisokban a csillagok a vonzócentrumtól távolodva egyre kisebb sebességgel, *Kepler 3.* törvényének megfelelően keringenek a galaxis középpontja körül. Ennek értelmében a csillagok V pálya menti sebessége nagy r sugárnál

$$V^2 = \frac{GM_{vis}}{r},$$

ahol G a gravitációs állandó, $M_{vis}(r)$ a látható anyag tömege. Am kifelé haladva ez a szabályosság egyre kevésbé érvényesül: egy bizonyos értéknél nagyobb sugárnál a keringési sebesség nem csökken tovább kifelé haladva, hanem állandósul. Minthogy a keringési sebességet az adott sugáron belüli össztömeg (és maga a sugár) szabja meg, a galaxisok rotációs görbéje (a csillagok keringési sebességének a galaxis centrumától mért távolságtól való függését ábrázoló függvény) arra utal, hogy az adott sugáron belül jelentős tömeg van, amely láthatatlan marad, sugárzását ugyanis nem észleljük (1. ábra).

A spirálgalaxisok korongja nem ér véget a centrumtól legtávolabb keringő csillagoknál. Még kijebb jelentős mennyiségű hidrogént tartalmazó felhők vannak, amelyek keringési sebessége a rádiótartományba eső 21 cm-es színképvonal Doppler-eltolódásából állapítható meg. Az így kiegészített rotációs görbe kijebb is sebességállandósulást, azaz további nagy mennyiségű sötét anyagot jelez. Ennek a nem világító, csak gravitációs hatásáról felismerhető tömegnek a galaxisok halójában, a látható tömeget magában foglaló lapult rendszert gömbszerűen körülvevő térségben kell lennie.

Az Univerzum nagyléptékű szerkezetéből, a fiatal Világegyetemben kialakult struktúrákból következtetni lehet az átlagos tömegsűrűsége, és ez nagyobbak bizonyul a világító anyag tömegéből származtatható sűrűségénél. A barionikus anyag sűrűsége külön is meghatározható, ugyanis a primordiális ^4He izotóp előfordulási gyakorisága a barionsűrűség és a fotonsűrűség arányától függ.

A Világegyetem anyagi összetétele

Összegezzük az Univerzum energiamérlegét. Az anyagsűrűségeket a ρ_c kritikus tömegsűrűség segítségével fejezzük ki. Ha H_0 a Hubble-paraméter és G a gravitációs állandó:

$$\rho_c = H_0 \frac{3}{8\pi G}.$$

A kritikus tömeg az az anyagmennyiség, amennyi ahhoz szükséges, hogy a Világegyetem sík legyen, ami azt jelenti, hogy a tér nem görbült, azaz a háromszög szögeinek összege 180° (l. *Németh J.* – Fizikai Szemle 2004, 1). A továbbiakban az anyagsűrűségeket a kritikus értékhez viszonyítva adjuk meg. A különböző típusú anyagformákra vonatkozóan

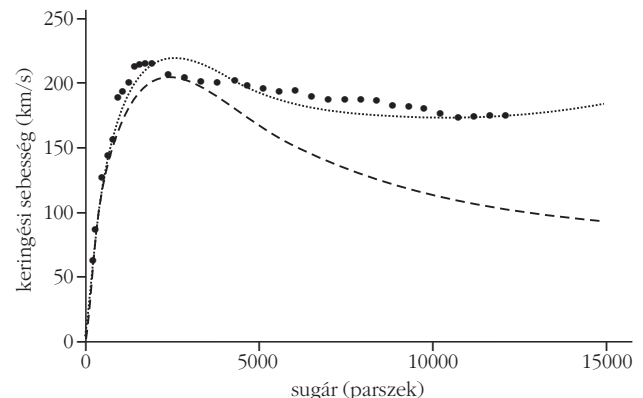
$$\rho_i = \Omega_i \rho_c.$$

A teljes anyagsűrűség pedig

$$\Omega = \sum \Omega_i.$$

Az Univerzum anyagára vonatkozóan a legpontosabb ismereteket a feketetest jellegű kozmikus háttérsugárzás (CMB) fluktuációjából nyerhetjük. A kritikus tömeg értéke, amelyet először 1992-ben határoztak meg (ezt jutalmazták 2006-ban a fizikai Nobel-díjjal), és 2003-ban rendkívül pontosan megmérték, $\Omega \sim 1$. Ezt az értéket adja Ω -ra az inflációs modellek nagy része is.

1. ábra. Egy tipikus spirálgalaxis korongjának rotációs görbéje (a keringési sebesség a galaxis centrumától való távolság függvényében). A szaggatott vonal a Kepler-törvény alapján várt mozgásnak felel meg, a nagyobb pontok a mért sebességek, a pontozott vonal pedig a sötét anyag figyelembevételével végzett modellszámítás eredménye.

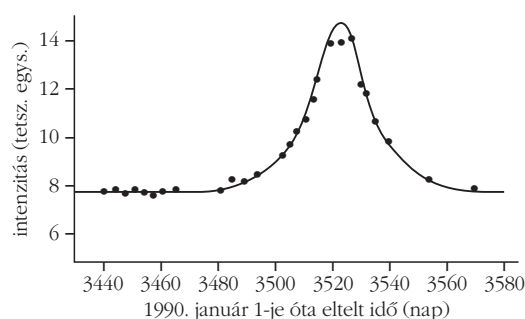
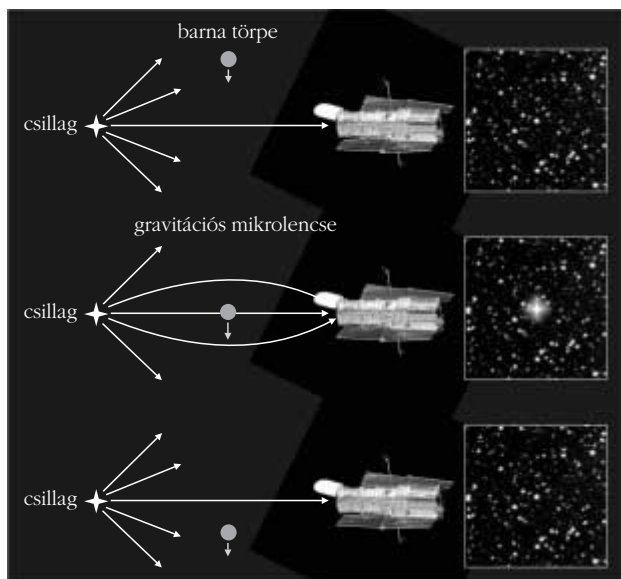


A CMB fluktuációiból a barionos anyagmennyiség értékét is meg tudták határozni, az a kritikus tömeg körülbelül 4%-ának adódott. Ugyanezt az értéket kapták a korai atommagképződés maradványaiból (a ma található primordiális, azaz a kezdetben kialakult deuterium, hélium- és lítiumatommagokból) is. A galaxisokban összecsomósodó, tehát gravitációsan kölcsönható, de ismeretlen részecskékből álló sötét anyag a kritikus tömeg körülbelül 26%-a, a teljesen ismeretlen, nem anyag jellegű, de az Einstein-egyenletekben fontos szerepet játszó sötét energia járuléka pedig ~70%-a a kritikus tömegnek. (A sötét anyag és a sötét energia teljesen más jellegű fogalmak. Például, a sötét anyag esetén a nyomás pozitív, a sötét energia esetén negatív, tehát ez utóbbi nem anyag jellegű mennyiség. A közös csak az bennük, hogy nem láthatóak.)

Korábban az a lehetőség is felvetődött, hogy nincs is sötét anyag, a létezésére utaló „tünetek” valójában „csak” a relativitáselmélettel kapcsolatos problémák. Az elmúlt 70 év alatt azonban a csillagászok annyi információt gyűjtöttek össze a sötét anyagra vonatkozóan, hogy annak létezését a cikk elején felsorolt bizonyítékok hatására mostanra majdnem mindenki elfogadta. A legfontosabb ismert tulajdonsága az, hogy gravitációsan kölcsönhat. Majdnem biztosan eddig ismeretlen elemi részecské(k)ből áll. Az asztrofizikusok és a részecskefizikusok közösen igyekeznek meghatározni, hogy miből. A sötét anyag hatását ismerjük, de az összetételét közvetlenül is szeretnénk megfigyelni. Az erre vonatkozó erőfeszítések a fizika legnehezebb kísérletei közé tartoznak. A remény az, hogy a mai kísérleti pontosság elegendő ahhoz, hogy néhány éven belül mégis megtudjuk, miből áll ez a különös anyagféleség.

A sötét anyag lehetséges alkotórészei

A sötét anyag kétféle lehet: barionos (pl. barna törpék vagy közönséges anyagból álló más égitestek) és nem barionos. A keresett sötét anyag az Univerzum barionsűrűségének ismeretében csak elenyésző mértékben állhat protonokból, neutronokból, atommagokból. Mindenesetre a barionikus sötét anyag közvetlen kimutatásán is fáradoznak a kutatók. A testté összeállt barionikus anyag sötét marad, ha nem tud csillaggá alakulni. Ilyen égitest lehet például barna törpe vagy akár bolygó is. Akkor is sötét tömeggé válik az égitest, ha korábban csillag volt, és a csillagfejlődés végén a kezdeti csillagtömegtől függően fehér törpe, neutroncsillag vagy fekete lyuk lesz belőle. A Tejútrendszer korongjának peremvidékén, illetve a galaktikus halóban levő ilyen égitestek – amelyekre közös néven MACHO-ként (*Massive Compact Halo Object*) hivatkoznak – a sugárzásuk alapján nem mutathatók ki. A MACHO-k össztömegét a gravitációs mikrolencse jelensége alapján lehet becsülni. A sötét testek ugyanis mozgásuk során a látóirány mentén közel kerülhetnek egy-egy háttércsillaghoz. Ilyenkor az általános relativitáselméletnek megfelelően átmenetileg felerősíthetik a háttércsillag fényét (2. ábra). Az ilyen mikrolencse-jelenséget csillagokban gazdag háttér, például a két Magellán-felhő irányában érdemes keresni. Az 1990-es években több nagyszabású fotometriai projektet hajtottak végre mikrolencse okozta



2. ábra. Gravitációs mikrolencse hatására bekövetkező átmeneti felfénylés. A változó fényű csillagokkal ellentétben a mikrolencse mindig időben szimmetrikus intenzitásváltozást eredményez. Mikrolencsénél csillag vagy kisebb méretű égitest váltja ki a lencsehatást.

felfénylések kimutatására. Bár több száz ilyen jelenséget találtak, gyakoriságuk alapján mégis arra következtettek, hogy a MACHO-k össztömege csak töredéke a Tejútrendszerhez tartozó sötét anyag tömegének.

Korábban azt is feltételezték, hogy tömeggel bíró neutrínók alkotják a sötét anyagot, de ez az elképzelés két okból is rossz: egyrészt a neutrínók össztömege nem elég nagy ehhez, másrészt a galaktikák kialakításában nem játszhatnak elég fontos szerepet. A forró (közel fénysebességgel mozgó) részecskék szabadon mozognak egymás mellett, és nem csomósodnak a megfigyelt módon galaxisokba. A sötét anyagnak tehát legalább 80%-ban hideg, nem barionos részekből (cold dark matter, CDM) kell állnia.

A sötét anyag jelöltjeinek ki kell elégíteniük néhány feltételt: stabilnak kell lenniük kozmológiai időskálán (másképpen mostanáig elbomlottak volna), gravitációs kölcsönhatásban részt vesznek, elektromágneses sugárzással csak gyengén hatnak kölcsön (különben nem lenne sötét az anyag), és a sűrűségüknek a kívánt mértékűnek kell lenniük. Szerencsére a részecskefizika standard modellje módosításokat sugall, például arra irányuló törekvések vannak, hogy igen nagy energián az erős, elektromágneses és gyenge kölcsönhatás leírása egyesíthető legyen. A kiterjesztés során számos olyan új elmélet válik lehetségessé, amelyik magyarázni tudja a sötét anyagot. A legesélyesebb

jelöltek a sötét anyag alkotóelemeire a „gyengén kölcsönható” (csak gravitációs és gyenge kölcsönhatásban résztvevő), nagy tömegű részecskék (WIMP-ek) és az axionok.

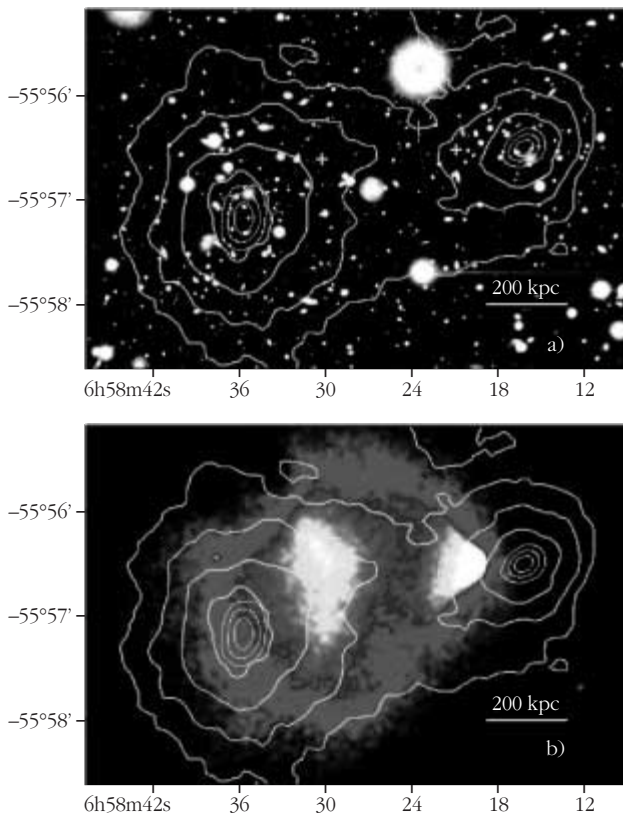
Az axionok könnyű részek, $10^{-5} \text{ eV} < m < 10^{-2} \text{ eV}$ közötti tömeggel. Olyan gyengén csatolódnak az anyaghoz, hogy konvencionális detektorokban a megfigyelésük nem lehetséges. A részecskefizikában jóval a kvantumszindinamikai (QCD) átmenet feletti hőmérsékleten az axionok tömeg nélküliek. $T < 1 \text{ GeV}$ alatti hőmérsékleten részecskefizikai effektusok miatt körülbelül 0,1 MeV tömeget nyernek.

A sötét anyag magyarázatára talán a szuperszimmetria-elmélet a legelfogadottabb. E szerint minden részecskének van egy „szuperpartnere”, ezek valószínűleg mind jóval nehezebbek, mint az ismert részecskék (tömegük 10 GeV és néhány TeV között lehet). A WIMP-ek a „szuperpartnerek” között keresendők. Ha infláció után ezek a részecskék termikus és kémiai egyensúlyban lettek volna a Standard Modell (SM) részecskéivel, meg lehetne határozni a jelenlegi sűrűségüket.

Az Ősrobbanás-elmélet szerint kezdetben a részecskék forró plazmája létezett. Az ütközések során részecskék keletkeztek és megsemmisültek. Amíg a hőmérséklet nagy, a WIMP-ek átmehetnek SM részecskékké, és fordítva. Legelőször azok a részek váltak ki ebből a keverékből, amelyek legkevésbé hatottak kölcsön a többivel. Kifagyás után lényegileg változatlan maradt külön-külön mindegyik típusú részecske száma. A becslések a két részecsketípus (WIMP és SM) kölcsönhatásának erősségére azt adják, hogy az körülbelül a gyenge kölcsönhatáséval egyezik meg.

A sötét anyagot alkotó legvalószínűbb jelölt a (legkönnyebb) neutralínó, egyszersmind valószínűleg a legkönnyebb szuperrészecske. Ez stabilis, mert nem tud mire bomlani, ezenkívül semleges, így nem hat rá az elektromágneses erő. Meghatározható az Ősrobbanás során keletkezett és később is megmaradt neutralínók száma. Fontos körülmény, hogy az elképzelések szerint a Világegyetemben található neutralínók együttes tömege körülbelül megegyezik a sötét anyag tömegével, döntő bizonyítékot azonban csak a neutralínók közvetlen megfigyelése szolgáltathat. A szuperszimmetria-elmélet szerint a neutralínóknak van gyenge kölcsönhatásuk, így előfordulhat, hogy egy-egy neutralínó kölcsönhatásba lép azzal az anyaggal, amelyen áthalad. Manapság vannak olyan kísérleti elrendezések, amelyek ezt a kölcsönhatást próbálják különböző módon észlelni. Néhány év múlva megtudjuk, hogy ez az elképzelés helyes-e vagy sem.

A sötét anyag léte csak vagy laboratóriumi körülmények közötti mérésekkel, vagy speciális csillagászati körülmények között igazolható. Ez az utóbbi azt jelenti, hogy olyan rendszereket kell vizsgálni, ahol a barionos anyag és a sötét anyag szétválik. Összeolvadó galaxishalmazokban ez teljesül, és nemrég sikerült is ilyen galaxishalmazt megfigyelni. A Lövedék-galaxishalmaz hárommilliárd fényévre van tőlünk, és valójában egymáson áthatoló két galaxishalmaz. A rendszer teljes tömegét a gravitációs-lencse-hatás alapján állapították meg (ez azt jelenti, hogy a halmaz gravitációs tere eltorzítja a háttérgalaxisokból jövő fényt, és ezt a torzulást méri), a világitó anyag tömegét az



3. ábra. A Lövedék-galaxishalmaz optikai képe (fent) és röntgenképe (lent). Az optikai képen jól különülnek az egymáson áthaladt két galaxishalmaz, a röntgenkép pedig arra utal, hogy az intergalaktikus plazma az ütközés során veszítve eredeti sebességéből lemaradt a galaxisokhoz képest. A szintvonalak a sötét anyagnak a gravitációs-lencse-hatás alapján meghatározott mennyiségére utalnak. A sötét anyag tehát a galaxisokkal együtt mozog, nem a röntgensugárzó intergalaktikus plazmával.

intergalaktikus röntgensugárzás és a galaxisok megfigyelésével. A két halmaz találkozásakor a barionos anyagból álló galaxisok tömegpontokként viselkedve ütközés nélkül áthaladnak egymáson, míg az intergalaktikus anyag folyadékszerűen viselkedő részecskéi egymással ütközve lelassulnak. Az intergalaktikus barionos anyag tehát lecsatolódik a galaxisokról. A két halmaz sötét anyaga viszont a látható galaxisokhoz hasonlóan mozog tovább, mivel részecskéi nem hatnak kölcsön egymással (3. ábra). A gravitációs-lencse-hatás alapján nemcsak a sötét anyag tömege, hanem az elhelyezkedése is számítható. A gravitációs potenciál eloszlása a galaxisok eloszlását követi, nem a röntgensugárzó forró plazmáét. A sötét anyag és a barionos anyag tömegének arányára ebből a mérésekből is a már ismert körülbelül hatos faktort kapták.

A sötét anyag létét sikerült tehát közvetlenül kimutatni, de változatlanul nem tudjuk, milyen részecskékből áll, csak annyit tudunk hogy gravitációsan kölcsönhat és nem barionos. A további megfigyelések már az asztrofizikusok feladatai közé tartoznak.

Irodalom

- KUN M., SZABADOS L.: *A Tejútrendszer változó arca* – Magyar Tudomány 2004/6, 722
 NÉMETH J.: *A Világegyetem fejlődése* – Magyar Tudomány 2003/10, 1248
 NÉMETH J.: *Mi az a sötét energia?* – Fizikai Szemle 54/1 (2004) 1
 PATKÓS A.: *Mi jöbet Einstein után?* – In A fizika százada, a Természet Világa különszáma 2006, 112