

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVIII. évfolyam

3. szám

2008. március

AZ UNIVERZUM URALKODÓ ANYAGFAJTÁJA, A »SÖTÉT ANYAG«

Fényes Tibor
MTA ATOMKI, Debrecen

Manapság már meggyőző érvek szólnak amellett, hogy az Univerzumban jelen van, sőt túlsúlyban van egy sötét (azaz nem sugárzó és nem abszorbeáló) anyag, amelynek a mibenlétét egyelőre nem ismerjük. A következőkben röviden áttekintjük az ezzel kapcsolatos eredményeket.

A sötét anyag létre utaló megfigyelések

Rotációs görbék

A legkorábbi – és a mai napig legmeggyőzőbb – érvek abból a megfigyelésből származnak, hogy a különböző látható (azaz valamilyen elektromágneses sugárzást kibocsátó) objektumok (csillagok, gázfelhők, galaxisok, galaxishalmazok) gyorsabban mozognak, mint amit a látható más objektumok gravitációs hatása alapján várni lehet. Az első ilyen észlelést *F. Zwicky* végezte 1933-ban.

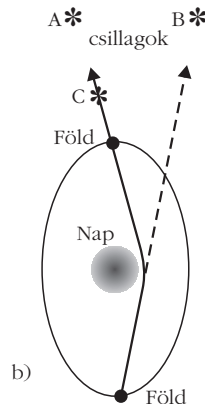
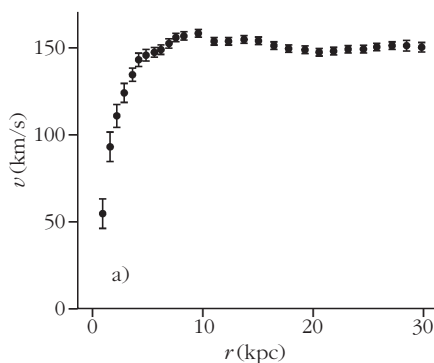
Tekintsünk például egy spirálgalaxist, amelynél a fényt kibocsátó anyag zömmel a központi részben van koncentrálnva, de van egy vékony korongban rajta túlnyúló rész is. Vizsgáljunk egy olyan m tömegű csillagot, amelyik a galaxis középpontjától r távolságra van és v sebességgel mozog a sugárra merőlegesen. Ekkor a centrifugális és gravitációs erők egyensúlya miatt

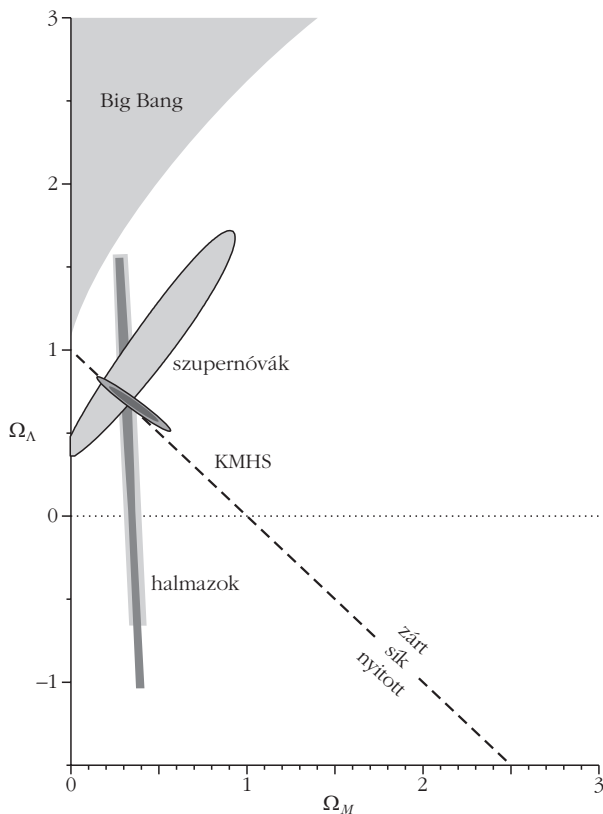
$$\frac{m v^2}{r} = G_N \frac{m M(r)}{r^2},$$

ahol $M(r)$ az r sugáron belüli tömeg, G_N a gravitációs állandó. Egy olyan csillagnál, amelyik a központi nagy tömegű részben van, $M(r) \propto r^3$, és így $v \propto r$. Ugyanakkor a központi részen kívül $M(r) \approx$ állandó, így $v \propto 1/r^{1/2}$. A sebesség az r -rel növekszik kis távolságoknál, nagyobbaknál viszont várhatóan csökken. Ezzel szemben például az NGC 3198 galaxis úgyneve-

zett „rotációs görbéje” az *1.a ábra* szerint alakul. Látható, hogy a maximális sebesség elérése után a távolság növekedésével a sebesség lényegében állandó értéket vesz fel (a várható csökkenés helyett).

1. ábra. A sötét anyag létre utaló megfigyelések. a) Az NGC 3198 jelű spirálgalaxisban észlelt rotációs görbe. Sebesség (v) a távolság (r) függvényében. (1 pc = 3,262 fényév = $3,086 \cdot 10^{16}$ m.) *Begeman* (1989) alapján [1]-ből. b) Gravitációs fényelhajlás. A C jelű csillag más csillagok társaságában látszik, ha a Föld a Nap fölött van, mint ha – fél évvel később – alatta.





2. ábra. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (KMHS), a szupernóvák és a Világegyetem nagy halmazainak (galaxisok, galaxis-halmazok) vizsgálatából következően megengedett Ω_m és Ω_Λ értékpárok. A vizsgálatok együttesen $\Omega_m \approx 0,24$, $\Omega_\Lambda \approx 0,76$ sűrűségeket valószínűsítene. [2] alapján.

Azt is észlelték, hogy bizonyos galaxishalmazokban a galaxis mozgási sebessége jóval nagyobb, mint amit a halmaz világító komponenseiből számítható gravitációs potenciál megengedne. Másként fogalmazva: nincs elég látható anyag, hogy az összetartsa a galaxishalmazt az észlelt sebességeknél.

Mindkét jelenség megmagyarázható úgy, hogy a galaxist, illetve galaxishalmazt körülveszi egy hatalmas sötét anyagot tartalmazó halo (udvar), amelynek sugara sokkal nagyobb, mint a látható objektumé.

A sötét anyag létére ma már nagyszámú mérés utal. A részletes elemzés alapján saját galaxisunkban a sötét anyag mennyisége a teljes galaxistömeg akár 90%-át is elérheti. Galaxishalmazokban és szupernagy galaxishalmazokban egyaránt megnyilvánul a sötét anyag jelenléte, sőt minél nagyobb a távolságlépték, annál nagyobb a sötét anyag aránya.

Gravitációs lencsehatás

Az általános relativitás elméletéből következően nagy tömegek (benne a sötét anyag is) az Univerzumban elhajlíthatják a fényt. Nagyszámú mérés mutatja, hogy a jelenség valóban létezik. Például a szerint, hogy a Föld – Naphoz viszonyított – pályájának melyik részén áll, egy adott csillag más látható égi objektumok közelében található (lásd 1.b ábrát). A galaxishalmazokra vonatkozó nagyszámú mérés eredményeként az adódik, hogy a sugárzó/sötét anyag aránya: 1/5–1/6.

Újabb direkt bizonyítékok a sötét anyag létére

Újabbban távoli galaxisok ütközésének analizéséből, továbbá a C10024+17 galaxishalmaz Hubble-úrszondával végzett vizsgálatából direkt bizonyítékokat is nyertek a sötét anyag létére. Bizonyos feltételek mellett kialakulhatott sötét anyag galaxis is. (CERN Courier 2006. október, 2007. július, 2005. április)

Galaxisok kialakulása

A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás irányfüggést, anizotrópiát mutat, de ez csak 10^{-5} rendben jelentkezik. Ezek az anizotrópiák nagyon kicsik ahhoz, hogy galaxisok kialakulásához vezessenek. A probléma megoldása lehet, hogy a sötét anyagban nagyobb inhomogenitások alakultak ki a mikrohullámú háttérsugárzás anyagról való lecsatolódása előtt. Ezek az inhomogenitások azután a barionos anyagot gravitációsan összehúzták.



A fentiekben vázlatosan ismertetett nagyszámú megfigyelés alapján ma már jól megalapozottan állítható, hogy az Univerzumban létezik egy sötét (azaz nem fénylő és nem elnyelő) anyag.

A sötét anyag sűrűsége az Univerzumban

A sötét anyag sűrűsége (Ω_{SA}) az Univerzumban két sűrűségadat különbségéből adódik: $\Omega_{SA} = \Omega_m - \Omega_b$, ahol Ω_m az Univerzum anyagsűrűségét, Ω_b pedig a barionos anyagsűrűségét jelöli. Itt az Ω mennyiségek alatt relatív sűrűségek értendők:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{krit}}$$

ahol

$$\rho_{krit} = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G_N} = 1,05 \cdot 10^{-5} h^2 \frac{\text{GeV}}{c^2} \frac{1}{\text{cm}^3}.$$

H_0 a Hubble-állandó jelenkori értéke, G_N a gravitációs állandó, $h = 0,73$. A kritikus sűrűség (ρ_{krit}) választja el a táguló Világegyetemet a zsugorodó Világegyetemtől, ennek jelenlegi értéke ismert.

Megjegyezzük, hogy a teljes sűrűség a részsűrűségek összegeként adódik: $\Omega_{teljes} = \Omega_m + \dots + \Omega_\Lambda$, ahol Ω_Λ a „sötét energia” miatt fellépő sűrűség. A mikrohullámú háttérsugárzás vizsgálatából tudjuk, hogy $\Omega_{teljes} = 1,003 \pm 0,017$, ami azt jelenti, hogy az Univerzum egésze sík térmetrikájú, azaz euklideszi.

A sötét anyag sűrűségének meghatározásához tehát ismerni kell az anyag Világegyetemben való sűrűségét és a barionos anyagsűrűségét. Barion névvel a részecskefizikában olyan nehéz részecskéket jelölnek, amelyek feles saját perdülettel (spinnel) rendelkeznek. Ezek legismertebb képviselői az atommagokban található protonok és neutronok. A továbbiakban „barionos” anyag alatt általában olyan anyagot értünk, amely általunk ismert részecskékből épül fel. A precíz

kozmológiai mérések ma már lehetővé teszik mind az Ω_m , mind az Ω_b meghatározását.

Az Ω_m meghatározható a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (KMHS), a szupernóvák és az Univerzum nagyléptékű szerkezetének vizsgálatából. Ezek mindegyike csak bizonyos Ω_m és Ω_Λ értékpárokat enged meg, de a három méréstípus együttesen lehetőséget ad az anyagsűrűség egyértelmű meghatározására, lásd a 2. ábrát. Az eredmény: $\Omega_m = 0,24 \pm 0,04$.

A barionos anyagsűrűsége (Ω_b) a legkönnyebb elemek (D, He, Li) Univerzumban megfigyelt előfordulási gyakoriságából kaphatunk információt.

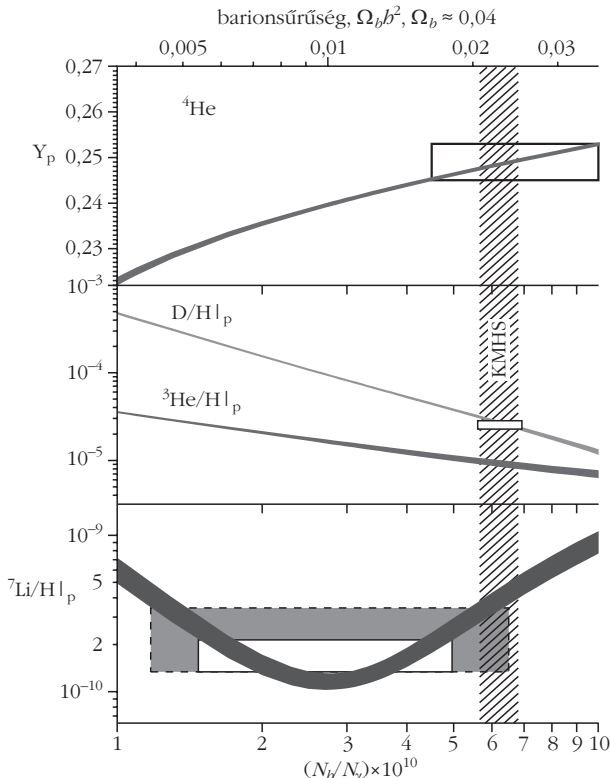
A jelenleg megfigyelhető Univerzum 70–80%-ban hidrogénből és 20–30%-ban héliumból áll. Az összes többi elem gyakorisága ezeknél nagyságrendekkel kisebb. A héliumnál nehezebb elemek a csillagokban lejátszódó nukleáris fúzióban jönnek létre. Ugyanakkor a hélium gyakorisága nem magyarázható meg ilyen módon. Ennek két oka is van:

– A csillagokban lévő hélium mennyisége, ahogy az optikai mérések mutatják, független a csillag korától. Ha a hélium hosszú idő alatt alakulna ki nukleáris fúzióban, mennyisége más lenne a fiatalabb csillagokban, mint az idősebbekben.

3. ábra. A megfigyelt ^4He , D, ^3He és ^7Li gyakoriságok (téglalapok, amelyek 2σ statisztikus hibát jeleznek) összevetve az Ősrobbanás standard modelljének előrejelzéseivel (görbék). (A $^7\text{Li}/\text{H}|_p$ esetében a szaggatott vonallal feltüntetett téglalap $\pm 2\sigma$ statisztikus és szisztematikus hibát jelöl.)

Y_p : primordiális ^4He tömegarány. $\text{D}/\text{H}|_p$, $^3\text{He}/\text{H}|_p$, $^7\text{Li}/\text{H}|_p$: szám gyakorisági arányok hidrogénre vonatkoztatva. N_b/N_γ : barion/foton arány. Ω_b , b^2 : barionsűrűség, ahol $b = 0,73 \pm 0,04$.

A felfelé futó vonalkázott sáv a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás vizsgálatából levont barionsűrűséget mutatja. [2, 220. o.] alapján.



– A hélium kialakulása hidrogénből nagy energia felszabadulásával jár. Ahhoz, hogy 20–30% legyen a hélium aránya az Univerzumban, a csillagoknak sokkal fényesebben kellene világítaniuk.

Valami olyan mechanizmus lehet felelős a legkönnyebb elemek kialakulásáért, amely már a legöregebb csillagok létrejötte előtt is működött. Az Ősrobbanási modell erre magyarázatul szolgál, ez a primordiális (ősi) nukleoszintézis.

A 3. ábrán feltüntetettük, hogy az Ősrobbanási modell a Big Bang után ~4 perccel milyen ^4He , D, ^3He és ^7Li elemgyakoriságokat jósol (görbék) és ugyanitt láthatók a mért kísérleti adatok is (téglalapok hibahatárokkal). E mérésekből következik, hogy a barionos anyagsűrűség az Univerzumban $\Omega_b = 0,042 \pm 0,005$. A kapott eredményt megerősítik a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás vizsgálatából leszűrt adatok is.

Az előbb ismertetett mérésekből következően tehát $\Omega_{SA} = \Omega_m - \Omega_b \approx 0,24 - 0,04 = 0,20$. Ez azt jelenti, hogy az Univerzum anyagának túlnyomó többsége sötét anyag, amelynek természete jelenleg nem ismert.

Sötét barionos anyag

Csillagászati mérések szerint a fénylő anyag sűrűsége az Univerzumban $\Omega_{fénylő} \approx 0,006$. Mivel $\Omega_b = \Omega_{fénylő} + \Omega_{sötét\ barionos}$ és $\Omega_b \approx 0,04$, világos, hogy az Univerzumban nagy mennyiségű sötét barionos anyagnak is kell lenni. Ezek lehetnek fehér és barna törpék, neutroncsillagok és fekete lyukak, közös néven MACHO-k (Massive Astrophysical Compact Halo Objects). A fehér törpék öreg csillagok kiegészített paraszai. A barna törpék csillagszerű objektumok, de nem elég nagyok ahhoz, hogy beinduljon bennük a termonukleáris fúzió. A neutroncsillagok és a fekete lyukak szupernóva-robbanások maradványai. Fekete lyuk akkor áll elő, ha a felrobbant csillag tömege igen nagy volt.

A MACHO-k megfigyelhető mikrolencsehatások révén. Ez abban áll, hogy amikor a MACHO áthalad egy háttérben lévő csillag előtt, gravitációs hatása a csillag fényét fókuszálja, mint egy lencse. Következésképpen a megfigyelő fényesebbnek látja a csillagot.

A 90-es évektől kezdve hosszú időn át megfigyelték a Nagy és Kis Magellán Felhőben (közeli minigalaxisokban) lévő csillagok millióinak fényerősségét. Amikor a galaxisunkban lévő nem fénylő objektumok áthaladnak a háttérben lévő csillagok előtt, ezek fényét bizonyos ideig felerősítik. Az „EROS” nevű program következtetése az, hogy a MACHO-k a Tejútrendszerünk halójának tömegéhez legfeljebb 20%-ban járulnak hozzá. E vizsgálatok – több más hasonlóval együtt – megerősítették, hogy ámbár bizonyára vannak nem fénylő barionos anyagok galaxisunkban, ezek mennyisége kevés. Még az sem biztos, hogy a hiányzó sötét barionos anyag teljes mennyiségére a MACHO-k magyarázatot adhatnak.

Miből áll a nem barionos sötét anyag?

A nem barionos sötétanyag-jelöltnek több követelménynek is meg kell felelni.

a) A Világegyetem életkorához (~14 milliárd év) képest stabilnak kell lenni, mivel egyébként mostanáig lebomlott volna.

b) Az elektromágneses sugárzással legfeljebb csak nagyon gyengén hathat kölcsön. Ezért sötét anyag.

c) Ki kell adja a helyes Ω_{SA} sűrűséget.

Neutrínók

Korábban azt gondolták, hogy a könnyű, relativisztikus sebességgel mozgó neutrínók lényeges hozzájárulást adhatnak a sötét anyaghoz. Ma már tudjuk, hogy a neutrínók sűrűsége (Ω_ν) az Univerzumban kisebb, mint 0,014, azaz a sötét anyag sűrűségéhez ($\Omega_{\text{SA}} = 0,20$) csak nagyon kis hozzájárulást adnak. Az Univerzum struktúráinak (galaxisainak) kialakulására vonatkozó elemzés is arra vezet, hogy a sötét anyag zömének hidegnek kellett lenni a kialakulás kezdetén. A könnyű neutrínók a korai Univerzumban közel fénysebességgel mozogtak (innen a „forró sötét anyag” név), így az észlelt kozmikus struktúrák nem alakulhattak ki belőlük.

Axionok

Az axionok hipotetikus részecskék. Létezésüket a kvantum-színdinamikai „erős CP-probléma” megoldására javasolták az 1970-es évek végén, de a szuperhőrelméletekben is természetszerűen megjelennek. Tömegük $\mu\text{eV}/c^2$ nagyságrendben lehet,¹ semleges pszeudoskálár (0^+ spin-paritású) részecskék és a korai Univerzumban nagy mennyiségben keletkeztek. Ha a tömegük az 1–100 $\mu\text{eV}/c^2$ tartományba esik, a kritikus sűrűség nagyságrendjében járhatnak hozzá a sötét anyag sűrűségéhez.

Detektálásuk elvileg lehetséges erős mágneses térbe helyezett mikrohullámú rezonátorokban, ahol átalakíthatók mikrohullámú fotonokká. Több programban is kerestek axionokat. A nagyobbik LLNL (California) program mérései alapján kizárható az axionok léte az 1,9–3,3 $\mu\text{eV}/c^2$ tömegtartományban.

¹ Az elektronvolt (eV) a magfizikában használatos energiaegység: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Einstein híres képlete alapján az energia (E) és tömeg (m) közötti összefüggés: $E = mc^2$, ahol c a fény sebessége vákuumban.

mányban. A mérések folytatódnak, egyelőre zömmel negatív eredménnyel. Részletesebben a [3–4]-ben látható. Axionok létére utaló jeleket találtak atommagátmenetek vizsgálata során [5].

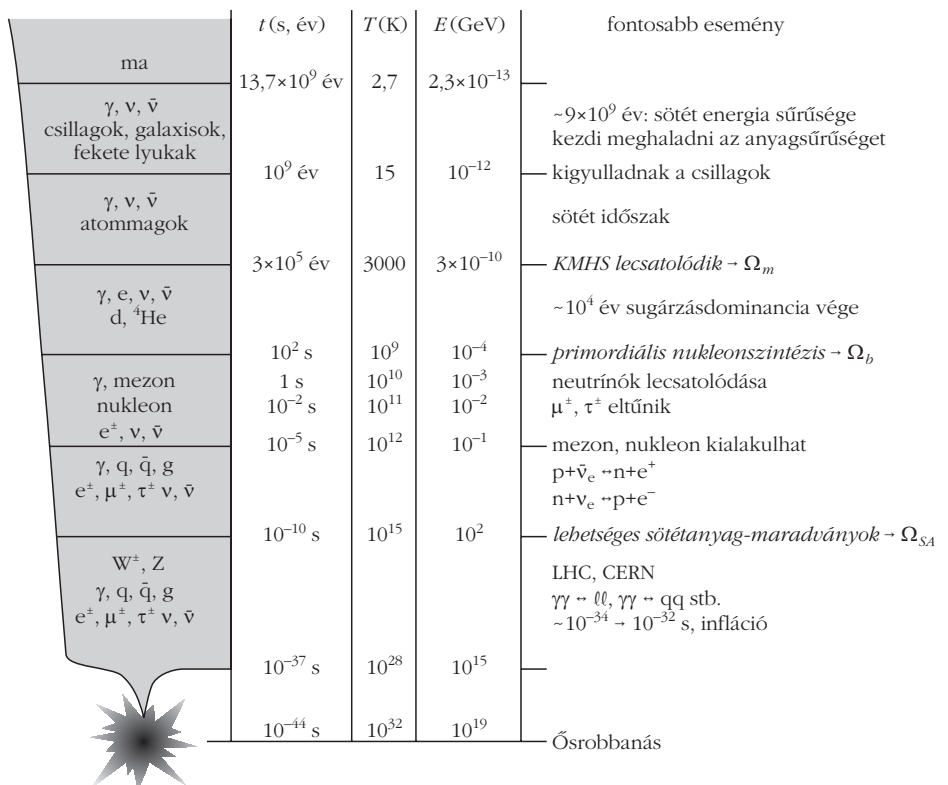
Gyengén kölcsönható nagy tömegű részecskék, WIMP-ek

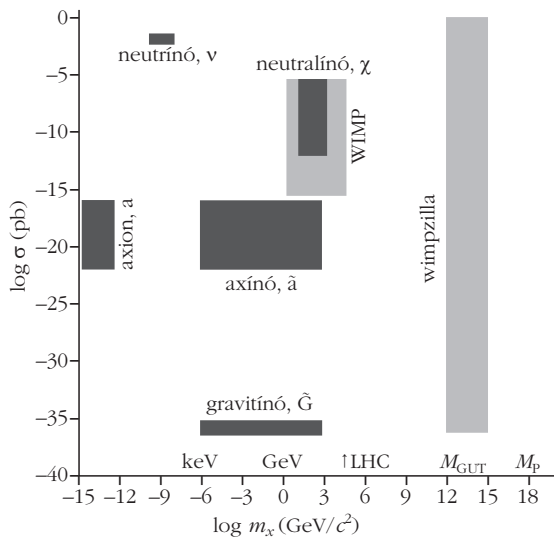
Az angol elnevezés alapján WIMP: Weakly Interacting Massive Particles. Jelenleg ezek a leginkább elfogadott jelöltek a sötét anyagra. Természetükre többféle elképzelés van, legesélyesebbek a stabil, legkönnyebb szuperszimmetrikus (SUSY) részecskék, a neutralínók ($\tilde{\chi}_{1-4}^0$), amelyek a semleges gauginók ($\tilde{\gamma}, \tilde{Z}^0$) és semleges higgsínók keveredéséből állnak elő, részletesebben lásd [6, IX.6.1. pont]. A neutralínók mellett a következő érvek szólnak.

a) Nem csak az asztrofizika, hanem a részecskefizika számos problémája (például a tömeghierarchia-probléma) is megoldható lenne, ha a szuperszimmetrikus részecskék léteznének. A szuperszimmetria matematikai realitás, mivel a fő különbség a normál és szuperszimmetrikus részecskék között abban van, hogy más a saját perdületük (spinjük).

b) A neutralínók eleget tehetnek mindazon követelményeknek, amelyeket a sötét anyaggal kapcsolatban elvárhatunk. A legkönnyebb SUSY-részecskék – az elmélet szerint – várhatóan stabilak, mivel nincs más SUSY-részecske, amibe bomolhatnak. A neutralínók, mint a nevük is mutatja, semlegesek. A SUSY-elmélet szerint a neutralínók várható tömege nagy (10 GeV – néhány TeV), több nagyságrenddel nagyobb, mint a

4. ábra. A Világegyetem története az ősrobbanási modell alapján. Itt t az Ősrobbanás utáni időt, T a hőmérsékletet, E a részecske legvalószínűbb energiáját jelenti.





5. ábra. Néhány WIMP-típusú részecske anyaggal való kölcsönhatási hatáskeresztmetszetének logaritmusa ($\log \sigma$) a jelölt tömegének logaritmusa ($\log m_x$) függvényében. Itt a hatáskeresztmetszet pikobarnokban ($1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$) egységekben, a tömeg GeV/c^2 egységekben van megadva, c = fénysebesség vákuumban. A hatáskeresztmetszetek csak nagyságrendi becsléseket jelölnek. A WIMP-pel jelölt tartomány néhány szuperhúrelmélethez követhető jelölést is tartalmaz. [7] alapján.

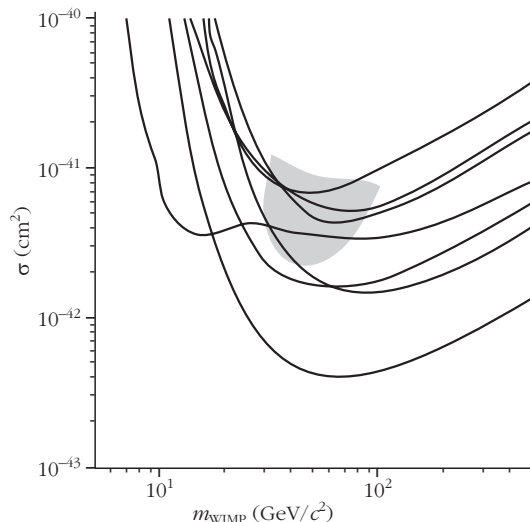
proton tömege. Ebből következően viszonylag lomha mozgásúak. Az ősrobbanási modell szerint a neutralinók nagy mennyiségben keletkeztek a kezdeti forró plazmában, termikus és kémiai egyensúlyban. Nagy tömegük miatt az Univerzum hűlése során hamar kifagyhattak „hideg” anyagként (az infláció, azaz a hirtelen nagyarányú kiterjedés után $\leq 10^{-10}$ s időben, lásd a 4. ábrát). Miután kifagytak, a WIMP-sűrűség lényegében állandó marad. A részecskék – átélvén ~ 14 milliárd év viszontagságait – a mai napig megmaradtak. Egyik legfontosabb érv a neutralinók mellett, hogy figyelembe véve a várható tömegüket és lomha mozgásukat, a részletes számítások szerint majdnem pontosan kiadják a Világegyetem sötét anyagának sűrűségét ($\Omega_{\text{SA}} \sim 0,20$). Végül a neutralinók mellett szól, hogy rendkívül kicsi a kölcsönhatásuk² más anyaggal (várhatóan csak a gravitációs és gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, lásd az 5. ábrát), így kicsi a tömörülési hajlamuk, a csillagok közötti térben gázszerűen viselkedhetnek. A 4. ábrán a sötét anyag sűrűségének meghatározása szempontjából fontos eseményeket dőlten jelöltük. Feltüntettük azt is, hogy a CERN-beli nagy hadron ütköztető beindulása után körülbelül milyen energia fog rendelkezésre állni részecske keltésére.

A szuperszimmetria-modelleknek nagyon sok változata van, de majdnem mindben található olyan szuperszimmetrikus részecskék, amelyekből az Univerzum sötét anyaga összeállhat.

² Az atommagfizikában használt kölcsönhatási hatáskeresztmetszet definíció szerint $\sigma \equiv \Delta N N_0^{-1} n_s^{-1}$, ahol ΔN a létrejött magreakciók száma, ha a céltárgyra N_0 bombázó részecske esik, n_s a céltárgy felületességére eső atommagok száma. σ dimenziója (hossz)², egy-egye a barn (rövidítve: b), $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

A neutralinók létének kimutatására számos próbálkozás történt. A Földünk mozog, így a sötét anyagot alkotó részecskékkel (gyenge kölcsönhatással) ütközéseknek kell létrejönni. Különböző elméleti becslések szerint a detektor anyagában kg-onként és naponként 0,1–0,0001 ütközési esemény várható, azaz kedvezőtlen esetben tízezer naponként egy. Az ütközésben a sötét anyag részecskéje meglöki a detektor valamelyik atomját, ami észlelhető például szcintillációs vagy kriogén típusú detektorral. A fő nehézséget a zavaró háttérsugárzás jelenti. A detektor anyaga tartalmazhat radioaktív szennyezést és a kozmikus sugárzás is ad zavaró jeleket. Ezért a méréseket rendkívüli tisztaságú detektorokkal, mélyen a föld alatt kell elvégezni, továbbá jelalak és/vagy irány szerinti diszkriminálást is alkalmazni kell a hasznos jelek elkülönítésére. Egy harmadik diszkriminálási módszer lehet például az, hogy a méréseket télen és nyáron is elvégzik. A Naprendszerünk a galaxisunk magja körül kering körülbelül 220 km/s, míg a Földünk a Nap körül 30 km/s sebességgel. Így az eredő sebesség más lesz télen, mint nyáron. E különbség elkülöníti a hasznos jeleket a háttértől, ami feltehetőleg nem változik az évszakkal. A szcintillációs detektor lehet NaI, folyékony vagy gázalakú xenon. A xenonnak nincs hosszú életidejű radioaktív izotópjá és intenzív fényjelet ad. Folyékony állapotban nagy a sűrűsége és így az érzékenysége is. Gáz állapotban a meglökés nyoma hosszabb és így lehetőség nyílik irány szerinti diszkriminálásra. A radioaktív bomlásból származó elektronok által létrehozott jelek jelalak-diszkriminálással elkülöníthetők az atommagmeglökődésből eredő jelektől, mivel az elektronjelek hosszabb lefutási idejűek.

6. ábra. Spintől független WIMP-nukleon kölcsönhatási hatáskeresztmetszet (σ) a WIMP-tömeg (m_{WIMP}) függvényében. (σ egy nukleonra van normálva.) A görbék a kizárási határra nyert kísérleti adatok (90%-os konfidencia mellett), amelyeket különböző programokban nyertek. Jobb oldalon felülről lefelé: IGEX (spanyol, orosz); DAMA, CRESST (olasz, Gran Sasso); CDMS(SUF) (USA, Soudan); ZEPLIN (UK, Boulby); Edelweiss (francia, Frejus); CDMS II. (USA, Soudan). A legalsó kísérleti görbe ~ 1 esemény/(kg·hét) kölcsönhatási aránynak felel meg. A sötétített rész elméleti előrejelzést mutat. Minden görbénél standard sötét anyag – halo paramétereket tételeztek fel. [4] alapján.



A kriogén detektor lehet Ge, Si, alumíniumoxid vagy más anyagból álló. Működési hőmérsékletük ~ 25 mK körül van. Az ütközéskor fellépő hőkvantumok (rezgési fononok) detektálására termisztorokat használnak. A kriogén detektorok jóval érzékenyebbek a szcintillációsoknál, mivel a fonongerjesztés a teljes energiával arányos, míg az ionizációs, illetve fényhozam csak egy kis része a meglökődő atommag teljes energiájának. Ha egyidejűleg mérik az ionizációt és a fononokat Ge- vagy Si-kristályokban, igen jó diszkriminációt lehet elérni.

A 6. ábrán feltüntetettük a spintől független WIMP-nukleon kölcsönhatási hatáskeresztmetszeteket a WIMP-tömeg függvényében. A görbék a kizárási határra nyert kísérleti eredményeket mutatják. A sötét anyag kimutatására egyelőre csak a DAMA (Gran Sasso, Olaszország) program jelzett pozitív eredményt, de ez megerősítésre vár.

A WIMP-ek normál anyaggal nem, vagy csak nagyon gyengén hatnak kölcsön. Ugyanakkor lehet egy érdekes sajátosságuk, nevezetesen hogy ezek saját maguk antirészecskéi. (Ha a neutrínó Majorana-részecske, ez is ilyen.) Így ha két ilyen részecske találkozik, megsemmisülés léphet fel, *amelyben nagy energiájú részecskék, köztük γ -sugarak keletkeznek*. Mivel a WIMP-ek tömege feltehetően néhány száz GeV/ c^2 , a γ -kvantumok energiája is ilyen nagyságrendben várható. Ennek vizsgálatára az USA-ban 2008-ban terveznek fellőni egy űrhajót, benne a GLAST (γ -ray Large Area Space Telescope) berendezést. Ez 20 MeV – 300 GeV kvantumenergia-tartományban regisztrálja a γ -sugárzást. A γ -kvantum által

7. ábra. Az épülő LHC kriogén rendszere elektronikájának ellenőrzése. (foto: CERN, 2007.)



kiváltott elektron–pozitron pár nyomát egy Si-detektorokból álló rendszer, a teljes energiát pedig egy elektromágneses kaloriméter méri [8]. Az ilyen irányú indirekt kutatási módszerek kiegészíthetik a korábban ismertetett direkt módszereket.

A különböző sötét anyag detektálására szolgáló programokról és módszerekről, továbbá az eddig elért eredményekről jó összefoglalás található a [2] és [4, 233. o.] munkákban.

A neutralínók kozmológiai kimutatása rendkívüli nehézséggel jár. A normál anyaggal való kölcsönhatási hatáskeresztmetszetek a neutralínóknál több nagyságrenddel kisebbeknek várhatók, mint a neutrínóknál. Ugyanakkor remény van arra, hogy a CERN-ben (European Organization for Nuclear Research, Genf) 2008-ban beinduló nagy hadron ütköztetőben (Large Hadron Collider, LHC) sikerül szuperszimmetrikus részecskéket előállítani, sajátágaikat meghatározni és eldönteni, állhat-e az Univerzum nem barionos sötét anyaga a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecskékből. A kérdés megoldása a 21. század egyik legfontosabb tudományos eredménye lehet.

Összegzés

Nagyszámú megfigyelés meggyőzően mutatja, hogy az Univerzumban jelen van egy sötét (azaz nem sugárzó és nem abszorbeáló) anyag, amelynek mibenlétét egyelőre nem ismerjük. Egzakt kozmológiai mérések mutatják, hogy az Univerzum anyagának döntő többsége e sötét anyagból áll. Egyik legvalószínűbb jelölt a sötét anyagra a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske, a neutralínó, de sok más elképzelés is van (például a szuperhúr-elméletekből következően). A sötét anyag részecskéi felfedhetik létüket úgy, hogy meglökik egy detektor atomjait, mivel Földünk a sötét anyagban mozog. Nagyon intenzív nemzetközi kutatások folynak a sötét anyag direkt és indirekt kimutatására a kozmoszban. Másrésztől a 2008-ban a CERN-ben beinduló nagy hadron ütköztetőben (7. ábra) remény van szuperszimmetrikus részecskék előállítására, ezek között lehet olyan, amelyből a sötét anyag áll.

Irodalom

1. Allday J.: *Quarks, leptons and the Big Bang*. 2nd ed. Inst. of Phys. Publ., Bristol, 2002.
2. Particle Data Group: Review of particle physics. *J. Phys. G.: Nucl. Part. Phys.* 33 (2006) 1.
3. Asztalos S.J., Rosenberg L.J., van Bibber K., Sikivie P., Zioutas K.: Searches for astrophysical and cosmological axions. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 56 (2006) 293.
4. Gaitskell R.J.: Direct detection of dark matter. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 54 (2004) 315.
5. Krasznahorkay A., de Boer F.W.N., Csatlós M., Csige L., Gácsi Z., Gulyás J., Hunyadi M., Ketel T.J., van Klinken J., Krasznahorkay A. Jr., Vitéz A.: Lepton pairs from a forbidden M0 transition: signaling an elusive light neutral boson? *Acta Phys. Polonica B*, 37 (2006) 239.
6. Fényes T.: *Részecskék és kölcsönhatásaik*. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2007.
7. Roszkowski L. *Pramana* 62:1 (2004) hep-ph/0404052
8. Atwood W.A., Michelson P.F., Ritz S.: Window on the extreme Universe. *Sci. Am.* 297/6 (2007) 28.