

Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno-matematički fakultet
Departman za fiziku
Smer - astronomija sa astrofizikom



Naslov:

Tamna materija i tamna energija

Seminarski rad iz predmeta Nuklearna fizika

Student:

Marjanović Rade 460/02

Mentor:

dr Miodrag Krmar

Jun, 2007. godine

Novi Sad

Uvod

Još u staroj Grčkoj se postavilo pitanje od čega je sastavljen Univerzum. Odgovor na ovo možda jednostavno pitanje nije tako trivijalan. Barioni, nama poznatiji kao protoni i neutroni (najpoznatiji predstavnici te grupe) od kojih je sačinjena sva vidljiva materija, ne odgovara većem delu mase u Univerzumu. Umesto toga, čini se da živimo u Univerzumu sastavljenom primarno od nove, nepoznate i nedefinisane forme materije i energije. Postoje tri glavna dokaza u korist ove teorije.

Nukleosinteza Velikog Praska, veoma uspešna teorija nuklearnog porekla najlakših elemenata periodnog sistema, zajedno sa najskorijim merenjima količine deuterijuma - teškog vodonika (koji predstavlja fosil iz vremena nukleosinteze, jer je verovatnoća njegovog nastanka u drugim procesima izuzetno mala) u svemiru, nam govore da je svega oko 4 % mase i energije u Univerzumu u formi "uobičajene" (barionske) materije, sa ostatkom u, za sada, nepoznatoj formi.

Još od pionirskih radova Frica Cvikija iz 30-ih godina XX veka, astronomi su sumnjali da tamna komponenta materije - ona koja ne emituje niti apsorbuje svetlost - odgovara najvećoj količini mase u Univerzumu. Tokom poslednje decenije astronomi su postigli konsenzus da je tamna materija sveprisutna u galaksijama i da se računa kao najveća komponenta mase u jatima galaksija i superjatima (većim sistemima sastavljenim od nekoliko jata). **Većina mase našeg Univerzuma je tamna materija.** Dalje, prosto zbog tako velike količine tamne materije u odnosu na običnu, proizilazi zaključak da tamna materija mora da se sastoji od nečeg egzotičnog - sa elementarnim česticama stvorenim u ranom toplom Univerzumu, kao vodećim kandidatima. Vodeći kandidati među česticama su aksioni i neutralini.

Tokom nekoliko poslednjih godina, astronomi su došli do još značajnijeg, a istovremeno i više zbunjujućeg, otkrića u vezi sa sastavom Univerzuma. Koristeći supernove tipa Ia sa visokim crvenim pomacima kao sonde za istoriju širenja svemira, našli su dokaze da se širenje ubrzava, umesto da se, prema očekivanjima, usporava. Ovaj rezultat implicira postojanje velikih količina "tamne energije" čija gravitaciona sila ima odbojan karakter (videti odeljak 1.).

Možda najveća od svih misterija jeste zapravo čudna mešavina koja sačinjava naš Univerzum - obična materija, egzotična tamna materija i tamna energija, sve tri komponente u značajnim količinama. Ovo čudno uređenje

možda implicira, kao svojevremeno Ptolomejevi epicikli, da ne razumemo u potpunosti zakone fizike koja opisuje naš Univerzum. Čak je vrlo moguće da ono što nazivamo tamnom materijom i tamnom energijom su zapravo manifestacije nekog nepoznatog aspekta gravitacije ili samog prostor-vremena.

Univerzum je ravan

Po Ajnštajnovoj opštoj teoriji relativnosti, ukupna gustina materije i energije (masa ili energija po jedinici zapremine) određuje prostornu zakrivljenost semira (videti odeljak 2.). Za neku gustinu - tzv. kritičnu gustinu svemir nema zakrivljenost ("ravan") i geometrija je prosta - Euklidovska. Superkritičan (zatvoren) svemir se zakrivljuje u sebe (poput površine balona, samo u sve tri dimenzije, pre nego u dve) i subkritičan (otvoren) svemir je zakrivljen od sebe, poput sedla. Doprinosi sastavu svemira koji su gore navedeni sumarno daju gustinu čija je vrednost bliska kritičnoj, što za posledicu ima da je svemir najverovatnije ravan.

Kosmička mikrotalasna pozadina (CMB) se takođe može koristiti za određivanje oblika svemira i tako da obezbedi nezavisnu računicu za ukupnu količinu materije i energije u svemiru. Ugaona veličina toplih i hladnih oblasti na mapi CMB je direktno povezana sa oblikom svemira - u zatvorenom svemiru su te oblasti veće nego što je to slučaj u ravnom ili otvorenom svemiru, jer se ukupna zakrivljenost svemira ponaša kao kosmičko sočivo, uvećavajući ili umanjujući te oblasti (videti sliku 1.). Istraživači su skoro imali veoma zapažen uspeh u određivanju ugaone veličine toplih i hladnih oblasti u CMB. BOOMERanG, MAXIMA i DESI eksperimenti su potvrdili indikacije ranijih eksperimenata da je svemir zaista ravan, što implicira devijaciju gustine od kritične za maksimalno 6%.

Ovi eksperimenti su ne samo odredili oblik svemira, već su obezbedili važnu proveru određivanja sastava svemira drugim metodama. Budući CMB eksperimenti, uključujući MAP i Plank satelite, bi trebalo da otkriju važne tragove o prirodi tamne materije i tamne energije. Ipak, trebaće još eksperimenata u budućnosti da otkriju pravu prirodu oba problema.

Odeljak 1. Ajnštajnova gravitacija može biti odbojna

Najpoznatije obeležje gravitacije je da privlači, a ne odbija. Sudeći po Njutnovoj teoriji gravitaciona sila koju ispoljava telo je uvek privlačna i

proporcionalna masi tela. To je zapravo netačno, po Ajnštajnovoj teoriji - u neobičnim okolnostima gravitacija može biti odbojna. Ajnštajnova teorija, koja proširuje naša shvatanja gravitacije u slučajevima kada je ona ili izuzetno jaka ili se čestice kreću veoma velikim brzinama, poseduje i druge, uobičajenije, no ipak zadivljujuće karakteristike, koje uključuju i crne rupe.

Dok je centralna ideja Ajnštajnovе teorije da opiše gravitaciju kao osobinu zakrivljenog prostora, pre nego kao silu, o njoj se i dalje može diskutovati kao o sili. Zato što su masa i energija povezane u Ajnštajnovoj najpoznatijoj relaciji, $E = mc^2$, nije nimalo čudno da energija menja masu u Ajnštajnovoj verziji gravitacione sile. Ono što je novo sa tim pristupom je da pritisak takođe stvara gravitaciju. (Prisetiti se da pritisak može da se posmatra kao moment protoka u određenom smeru.) Kada posmatramo gravitaciju kao silu u opštoj relativnosti, snagu gravitacione sile koju ispoljava posmatrani objekat upravo određuju energija i pritisak $E + 3P$.

Pritisak običnog gasa je ka spolja i pozitivan. Po Ajnštajnovim jednačinama, onda je gravitaciono privlačenje lopte vrelog gasa (poput našeg Sunca) je veće od onog koje bi imalo telo ekvivalentne mase sastavljeno od hladnih čestica koje nemaju pritisak. Za većinu slučajeva razlika je previše mala da bi bila iole značajna. No ipak, baš ova osobina Ajnštajnovе teorije je ta koja vodi do predviđanja crnih rupa, objekata koji ne mogu da se održe nasuprot sopstvenoj gravitaciji i kolapsiraju u singularitet. Npr. u bilo kom stacionarnom objektu poput Sunca ili Zemlje gravitaciona sila mora biti balansirana sa pritiskom ka spolja ukoliko objekat zadržava svoj oblik i veličinu. (Kod Sunca pritisak nastaje od toplog gasa od kog je ono sastavljeno.) Višak gravitacione sile usled pritiska je mali. Kod masivnijih objekata gravitacija je jača i odgovarajući pritisak otpora mora biti jači. Ali kako raste pritisak, korekcija na gravitaciono privlačenje se takođe povećava. Kod veoma masivnih objekata, višak gravitacione sile usled pritiska može sam po sebi da nadmaši odbojnu silu usled pritiska (setiti se faktora 3 ispred pritiska u jednačini za gravitacionu silu) i stvara kontraefekat. Za veoma masivne objekte, na kraju pritisak koji se u početku opirao kolapsu će sada samo ubrzati kolaps i nastanak crne rupe.

Iako postoje jaki razlozi da se veruje da energija ne može biti negativna, negativni pritisak je osobina svega što je elastično (npr. gumene trake ili gumene ploče). Za ova dva primera mali pad u gravitacionom privlačenju je previše mali da bi bio merljiv. Ipak, postoje situacije u kojima je pritisak uprediv po veličini sa energijom, ali negativan, tako da gravitacija postaje negativna. Najekstremniji slučaj je energija kvantnog vakuuma, gde

je pritisak tačno suprotan energiji, sa rezultatom da je gravitaciono privlačenje ne samo dva puta veće nego u Njutnovim predviđanjima (predviđanjima ako se držimo Njutnove teorije) nego takođe i odbojno! U Ajnštajnovoj teoriji odbojna gravitacija je moguća, ali u Njutnovoj nije.

Prilikom stvaranja svog originalnog statičkog modela svemira, Ajnštajn je podesio jedan elemenat svoje teorije: uravnotežio je privlačnu silu materije u svemiru sa odbojnom silom svoje kosmološke konstante, koja je matematički ekvivalentna energiji vakuuma (opisanoj gore). Ukoliko se širenje svemira zaista ubrzava a ne usporava, kao što ukazuju trenutni podaci, ne treba ići iza Ajnštajnovе teorije da bi se našla objašnjenja. Samo vidimo jednu novu osobinu gravitacije.

Neovoljno obične materije

Sada imamo dovoljno dokaza da tip materije od koje smo mi sastavljeni obuhvata mali deo (oko 4%) ukupne mase i energetskeg budžeta svemira. Tri nezavisne metode ukazuju na ovakav zaključak (videti sliku 2.).

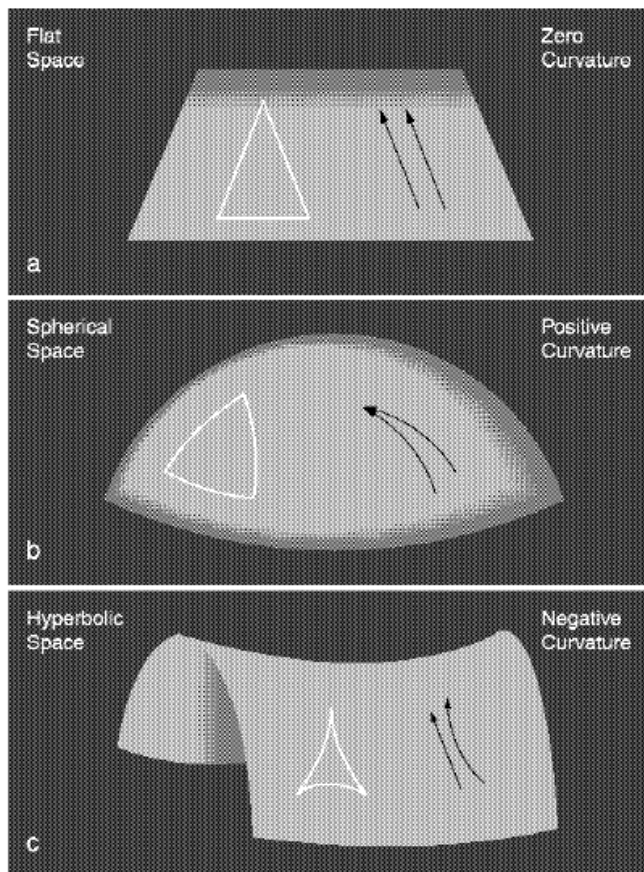
Tokom prva tri minuta nakon Velikog Praska, protoni i neutroni su fuzionisali da bi se stvorila jezgra najlakših elemenata u Periodnom sistemu, vodonika, deuterijuma (teškog vodonika), tricijuma, helijuma i litijuma. Relativna zastupljenost ovih elemenata, naročito deuterijuma, je osetljiva na gustinu obične materije. Skora merenja primordijalne zastupljenosti deuterijuma u prvobitnim oblacima gasa duž linije posmatranja udaljenih kvazara, su obezbedila precizna merenja prosečne gustine bariona, koja iznosi oko 4% kritične gustine.

Odeljak 2. Razumevanje zakrivljenosti prostor - vremena

Centralna ideja Ajnštajnovе teorije relativnosti je zakrivljenost prostor-vremena. Dok je veoma teško (ako ne i nemoguće) vizualizovati zakrivljeni 3-D prostor, matematički ga je vrlo lako opisati. Ipak, moguće je vizualizovati niži zakrivljeni prostor. Zamislite univerzum sa samo dve prostorne dimenzije, pre nego sa tri koliko ima naš prostor. Dvodimenzioni analog našeg svemira može imati tri različite forme: rava, poput lista običnog papira; pozitivno zakrivljen (zatvoren) poput površine lopte; ili negativno zakrivljen (otvoren) poput sedla (ili čipsa), kao što se vidi na slici 1.1.

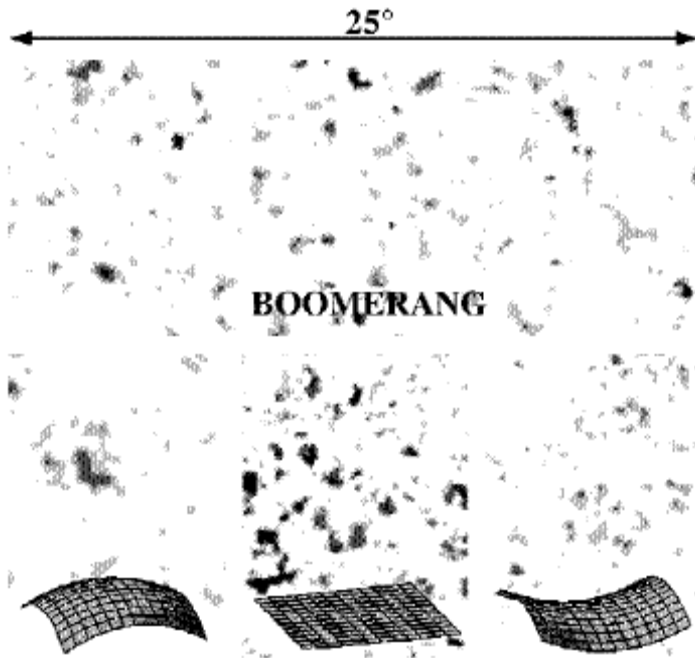
Gledano iz luksuza našeg trodimenzionog svemira, ova tri dvodimenziona svemira se veoma razlikuju. Ipak, postoje prosti matematički alati koji bi omogućili hipotetičkim dvodimenzionim stanovnicima ovih svemira da otkriju oblik svog svemira. Najprostiji uključuje jednu od osnovnih istina euklidove geometrije: u ravnom (Euklidovom) prostoru, zbir uglova u trouglu je 180 stepeni. To nije istinit iskaz za otvoren ili zatvoren prostor: za zatvoren svemir (površina lopte), zbir uglova trougla je uvek veći od 180 stepeni, a za otvoren svemir je uvek manji od 180 stepeni. Bez bega u tri dimenzije, dvodimenzioni stanovnici ovih zakrivljenih univerzuma mogu da odrede oblik svog svemira.

Mi možemo da uradimo isto. Trik u celoj priči je da se koriste veoma veliki trouglovi. U malenom trouglu na površini lopte, vrednost za koju zbir uglova prelazi 180 stepeni je toliko mala da je nemerljiva. U našem svemiru najveći trougao koji možemo da postavimo se širi do površine poslednjeg rasejanja CMB. Mereći veličinu toplih i hladnih oblasti na mikrotalasnom nebu koristi se metod trouglova za određivanje oblika svemira. Fizička veličina tih oblasti zavisi od jednostavne fizike a ne od oblika svemira. Ipak, ugaona veličina tih oblasti zavisi od oblika svemira, kroz efekat trouglova o kome je bilo reči. Mereći veličinu ovih oblasti, BOOMERanG, MAXIMA i DASI eksperimenti su zapravo utvrđivali zbir uglova u najvećem trouglu koji možemo da postavimo.



Slika 1.1 Trodimenzioni zakrivljeni prostor nije moguće vizualizovati, ali zakrivljenost dvodimenzionog prostora je moguće ilustrovati. Pozitivno zakrivljen svemir je poput površine lopte; negativno zakrivljen svemir je poput sedla. Svemir sa nultom zakrivljenošću je poput ravni. Geometrija zakrivljenog prostora, bio on dvo- ili trodimenzionalan, je različita: paralelne linije se mogu preseći (pozitivno zakrivljen svemir) ili mogu da divergiraju (negativno

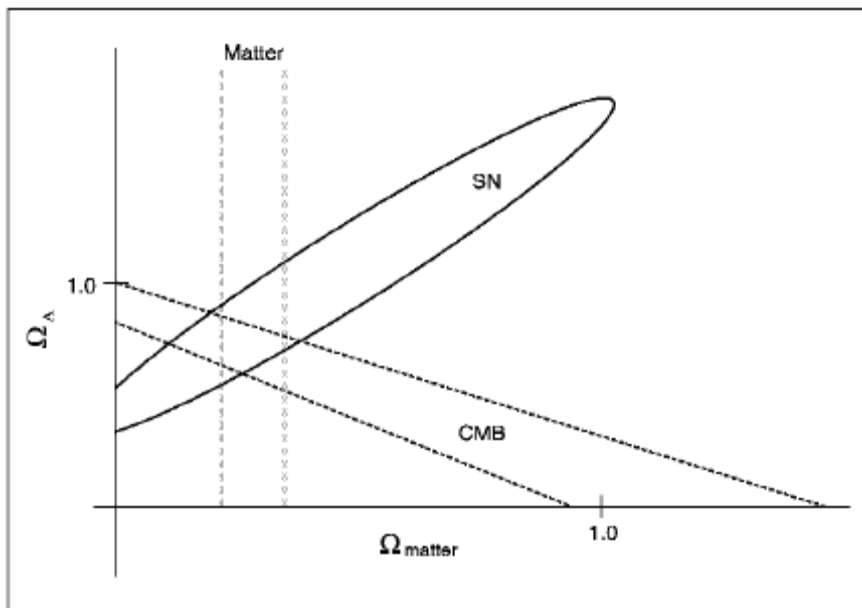
zakrivljen svemir) i suma uglova u trouglu može biti veća (pozitivno zakrivljen svemir) ili manja (negativno zakrivljen svemir) od 180 stepeni. Određivanje zakrivljenosti svemira na osnovu CMB se zasniva na ovim činjenicama.



Slika 1. Šema toplih i hladnih oblasti u kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini (CMB) očekivana za vrlo gust, zatvoren svemir; za kritičnu gustinu i ravan svemir; i za vrlo redak (u smislu gustine), otvoren svemir (dole s leva na desno) i realna mapa CMB snimljena pomoću BOOMERanG eksperimenta (gore). Male temperaturne varijacije mapiraju raspodelu materije 400 000 godina posle

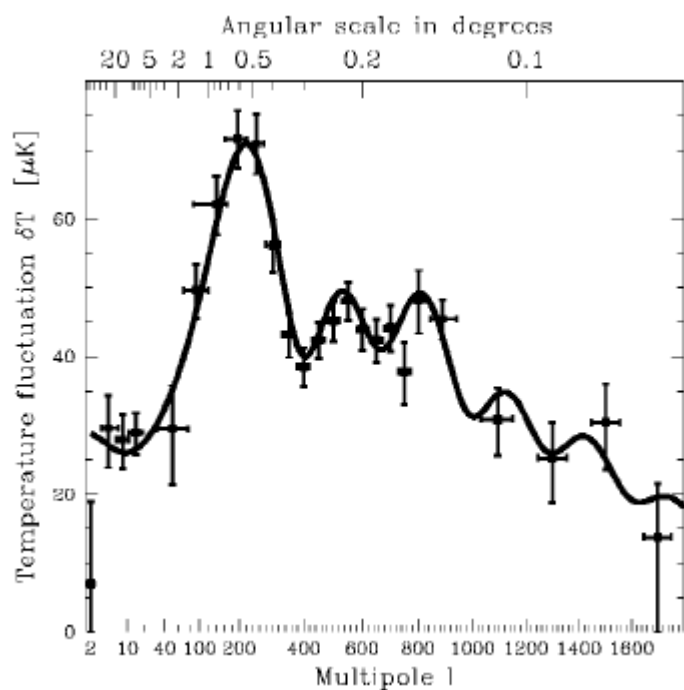
Velikog Praska; njihova ugaona veličina je određena oblikom svemira. Rezultati BOOMERanG-a ukazuju na to da živimo u prostorno ravnom svemiru. Slika: BOOMERanG kolaboracija.

Kao drugo, statističke osobine fluktuacija u kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini su osetljive na gustinu bariona. Npr. kada se uzmu u razmatranje parovi tačaka na nebu, i izračuna razlika u mikrotalasnim temperaturama između tih tačaka, te pritom posmatramo mnogo takvih parova tačaka sa mnogo različitih ugaonih rastojanja među njima, shvatimo da je razlika u temperaturi za neke uglove veća nego za druge. Kada se to prikaže grafički u funkciji ugla, kriva pokazuje pikove i doline u razlici temperature. Što je veća gustina bariona, veći je odnos između amplituda prvog i drugog pika na grafiku. Rezultati sa BOOMERanG, MAXIMA i DASI (slika 3.) daju vrednosti gustine bariona koje su konzistentne sa gustinom određenom iz nukleosinteze Velikog Praska, ali sa nešto većom neodređenošću.



nagnuti trougao obeležava merenja CMB koja ukazuju na ravan, kritičan svemir (ovde je suma materije i tamne energije jednaka jedinici).

Slika 2. Saglasnost tri nezavisna merenja gustine mase/energije u svemiru, što je prikazano njihovim presekom. Dve ose su tamna energija (vertikalna) i materija (horizontalna). Elipsom je prikazano merenje pomoću supernovih, koje ukazuje da se širenje svemira ubrzava. Vertikalne linije odgovaraju merenjima gustine tamne materije i



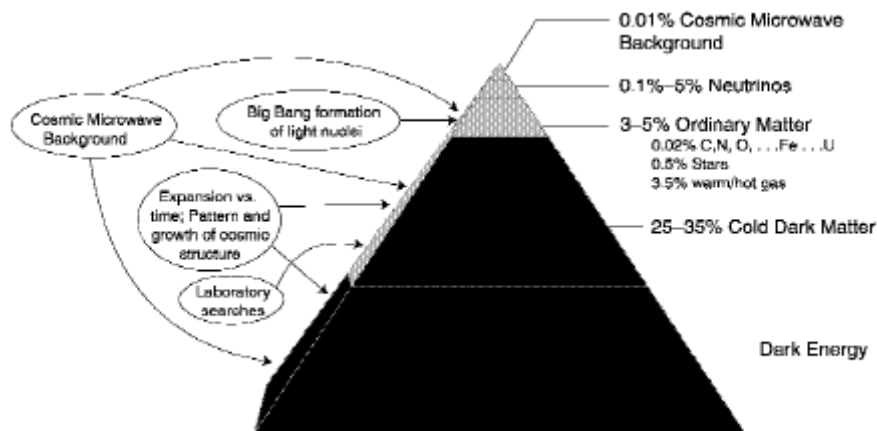
pomoću nukleosinteze Velikog Praska. Puna kriva je teorijsko predviđanje za ravan svemir čiji je sastav 4% obične materije, 29% hladne tamne materije (CDM) i 67% tamne energije. Slika: M. Tegmark i M. Zaldarriaga, 2002.

Slika 3. Spektar perturbacija u fluktuacijama kosmičke mikrotalasne pozadine izmeren pomoću BOOMERanG, MAXIMA i DASI eksperimenata. Visina krive predstavlja meru temperaturnih razlika, dok je horizontalna osa mera ugaone razlike, gde veće vrednosti / odgovaraju manjim uglovima. Pozicija prvog pika ukazuje na to da živimo u ravnom svemiru; odnos amplituda prvog i drugog pika nam govori da je gustina bariona oko 4%, što je konzistentno sa određivanjem

Treći metod, poput prvog, uključuje proučavanje primarnog gasa u svemiru preko apsorpcije svetlosti sa udaljenih kvazara. U tom slučaju, ukupna količina svetlosti koja je apsorbirana se može iskoristiti za određivanje ukupne količine obične materije koja je postojala u svemiru svega nekoliko milijardi godina posle Velikog Praska. Rezultati ovih proučavanja, koji nisu toliko precizni, su takođe konzistentni sa gustinom bariona od svega 4% kritične gustine.

Ova tri metoda za utvrđivanje količine bariona, mere količinu obične materije kada je svemir bio svega nekoliko minuta star, i kada je bio star nekoliko milijardi godina, raspektivno. Iako su ovi rezultati konzistentni, bilo bi dobro imati sličnu računicu za količinu obične materije danas.

Takav proračun je nešto teži, jer su se zvezde rađale i umirale, barioni su se promešali procesom formiranja struktura, i svemir je generalno, komplikovanije mesto nego što je bio. Danas barioni postoje u sjanim zvezdama, toplim i hladnim oblacima gasa, tamnim zvezdama (bledim zvezdama poput belih patuljaka, neutronske zvezde i crne rupe) i možda u nekim drugim oblicima. Popisom sjajnih zvezda i hladnog gasa je utvrđeno da odgovaraju svega jednoj terćini materije koja odgovara proceni iz primordijalne nukleosinteze. Ostatak bariona je "taman" (videti sliku 4.).



Slika 4. Piramidalni dijagram sastava svemira i različite tehnike koje se mogu koristiti za merenje različitih komponenti. Npr. dokazi o tamnoj materiji dolaze iz kosmičke mikrotalasne pozadine i oblika kosmičke strukture. Labortaorijska istraživanja imaju potencijala za identifikovanje tamne materije detekcijom čestica tamne materije u haloima ili njihovim stvaranjem u akceleratorima.

Gde su tamni barioni i u kojoj formi postoje? Najverovatnija forma je topli gas koji ispunjava oblasti među galaksijama, tzv. topla međugalaktička sredina. Topli gas u međugalaktičkoj sredini je teško posmatrati direktno. Astronomi imaju neke nagoveštaje iz posmatranja difuzne emisije x-zraka i iz merenja apsorpcije svetlosti da postoje značajne količine gasa u toploj međuzvezdanoj sredini, ali još uvek nisu u mogućnosti da preciznije odrede količinu. Unutar naše Galaksije, postoje dokazi da nešto tamnih bariona egzistira u formi starih belih patuljaka.

Iako ne postoje dokazi da količina materije danas u svemiru prelazi procenu iz primordijalne nukleosinteze, nedostaje nam prava procena količine materije u svemiru danas. Takva procena je visoko na listi prioriteta i želja šta bi astronomi hteli da urade u sledećoj dekadi.

EGZOTIČNA TAMNA MATERIJJA

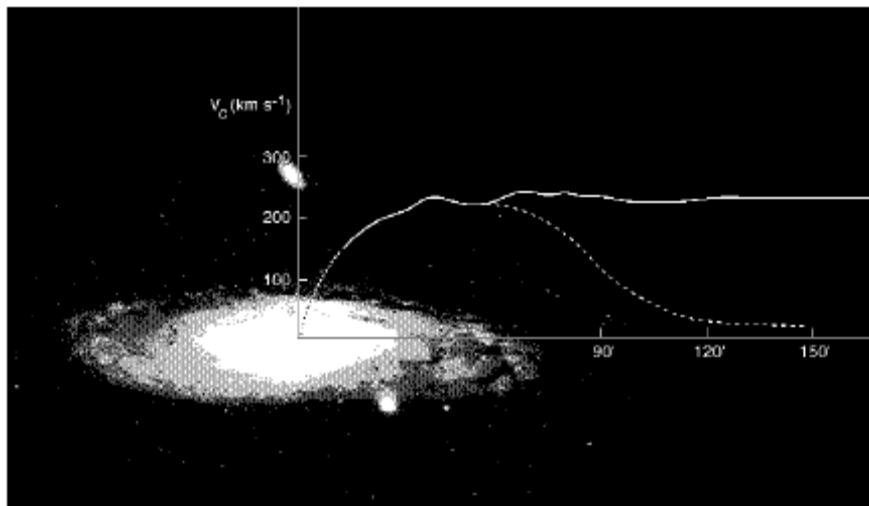
Na barione otpada svega 4% kritične gustine, i postoje nekakve smernice koje ukazuju na činjenicu da na materiju ukupno otpada oko 35% kritične gustine. Veliko neslaganje između ova dva broja je esencijalni element u slučaju egzotične (nebarionske) tamne materije. Dok ta dodatna materija nije vidljiva sa teleskopima, njeni gravitacioni efekti - od održavanja galaksija i jata na okupu do igranja kritične uloge u formiranju struktura na velikoj skali - su veoma vidljivi.

Dokazi za postojanje tamne materije

Postojanje tamne materije je dosta dobro utvrđeno na mnoštvu skala. U velikim spiralnim galaksijama je moguće izmeriti brzinu rotacije oblaka gasa do vrlo velikih udaljenosti od galaktičkog centra. Ponašanje brzina rotacije implicira da postoji značajna masa iza udaljenosti na kojima više nema zvezda i da većina materije koja održava spiralnu galaksiju takvom kakva je postoji u tamnom produženom halou. (slika 5.). Slične dinamičke dokaze o postojanju tamne materije možemo videti i u eliptičnim galaksijama. Prosto govoreći, ima više mase nego što se vidi u galaksijama svih tipova.

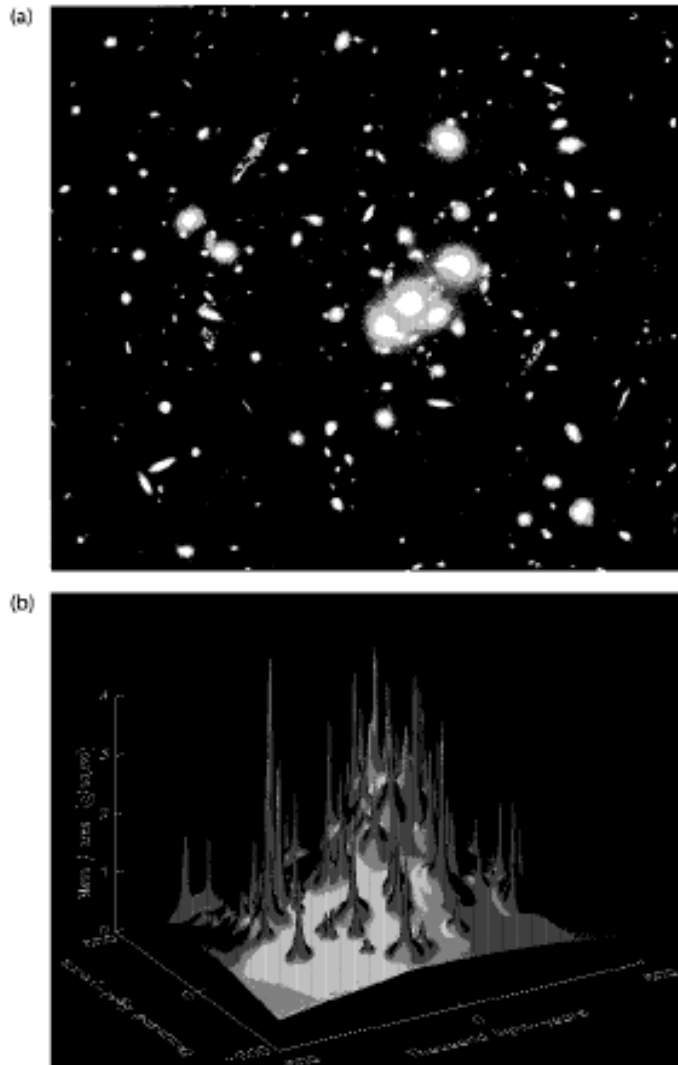
Efekat tamne materije je još izraženiji u jatima galaksija. Jata galaksija se kreću velikim brzinama, i masa koja je potrebna da bi ih održala kao jata daleko prevazilazi masu sadržanu u svim zvezdama koje čine te galaksije. Tamna materija iz galaktičkih jata stvara takođe i kosmičku fatamorganu: Svetlost emitovana sa udaljenih galaksija koja prolazi pored

jata se savija usled gravitacionog efekta tamne materije u jatu, kao što je predviđeno Ajnštajnovom teorijom. Blizu centra jata, ovaj efekat može biti toliko jak da stvori višestruke slike udaljenih galaksija. Ako odemo još dublje u analizu, taj efekat vrši distorziju oblika svake od tih udaljenih galaksija (slika 6.). Gravitaciono sočivo, kako je nazvan ovaj fenomen, baziran na jednom od prvih testova Ajnštajnovе teorije, se danas koristi rutinski za mapiranje tamne materije u jatima i pojedinačnim galaksijama. Ova metoda nam vrlo direktno ukazuje na to da jata imaju oko 100 puta veću masu nego što bi je imali da se sastoje samo od zvezda.



Slika 5. Slika Andromedine galaksije sa njenom krivom rotacije (brzinom oblaka gasa i zvezda oko centra galaksije u odnosu na udaljenost od centra). Konstantnost (ravnoća) krive iza tačke gde prestaje svetlost ukazuje na prisustvo tamne materije koja drži galaksiju na okupu. Isprekidana linija koja opada ka nuli pokazuje kako bi kriva izgledala u odsustvu tamne materije. Slika: M. Roberts.

Slika 6. (a) Slika pomoću Hablovog svemirskog teleskopa na kojoj se vidi efekat gravitacionog sočiva na svetlost sa udaljenih galaksija (distorzovane i višestruke plave slike) od strane bližeg jata (narandžaste galaksije). (b) Izvedena mapa mase koja se mora nalaziti između udaljenih galaksija i našeg položaja da bi izazvala efekat gravitacionog sočiva. Visina površi je proporcionalna projektovanoj gustini mase. Slike. NASA, W.N. Colley, E. Turner, i J.A. Tyson



Čak i na još većim skalama, efekat tamne materije može biti detektovan preko privlačenja koje ispoljava na pojedinačne galaksije. Pažljivo mereći brzine i rastojanja hiljada galaksija, pokazano je da se doslovno sve galaksije - uključujući i našu - kreću brzinama preko i većim od brzina očekivanih usled širenja svemira. Ove dodatne "svojstvene" brzine, koje potiču od gravitacionog efekta tamne materije, obezbeđuju sredstva za mapiranje raspodele tamne materije na skalama koje su veće čak i od tih jata. Ova tehnika je otkrila velike akumulacije tamne materije, uključujući vrlo poznati "Veliki Atraktor". Opet, količine materije koje su otkrivene na ovaj način daleko prevazilaze one koje se dobiju računajući samo zvezde, pa čak i barione.

Konačno, gravitacija materije koja je luminozna nije sama dovoljna da objasni formiranje mnoštva različitih struktura koje postoje u našem svemiru danas - od galaksija do velikih galaktičkih jata. Svi objekti koje

danas vidimo su evoluirali iz sićušnih neravnina u raspodeli materije koje su postojale na samom početku i koje su otkrivene COBE eksperimentom. Ovaj proces je vođen nepopustljivom, privlačnom silom gravitacije koja deluje neprekidno već 13 milijardi godina. Za nivoom neravnina koje je otkrio COBE kao početnom tačkom, strukture koje danas vidimo nisu mogle nastati gravitacionim efektom samo luminozne materije.

Postoji malo sumnji u postojanje tamne materije. Dešifrovanje njene prirode ostaje i dalje jedan od velikih izazova kosmologije danas. Pošto postoje jaki dokazi da nije sastavljena od uobičajene materije, otkrivanje prirode tamne materije će imati jake implikacije na fiziku.

Količina tamne materije

Koliko zapravo tamne materije postoji? Najdirektniji put ka proceni kvantiteta koristi jata galaksija za procenu kosmičkog inventara svih formi materije. Jata su veliki objekti i trebalo bi da ponude dobar uzorak materije u svemiru. Stoga, merenje odnosa ukupne količine materije prema količini obične materije u jatu se može iskoristiti za određivanje ukupne količine materije u svemiru.

Većina obične materije u jatima postoji u formi vrelih oblaka unutar jata koji emituju x-zračenje i mogu biti zabeleženi u sklopu emisije x-zračenja jata ili iz malog efekta distorzije koji jata stvaraju u kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini, što je poznatije kao Sunjajev-Zeljdovič efekat. Obe metode daju istu količinu gasa u jatu. Ukupna masa može da se odredi preko efekta gravitacionog sočiva, kao i preko korišćenja kretanja galaksija (ili temperature vrelog gasa) da bi se zaključilo koliko materije je potrebno da bi održali barioni u jatu na okupu; sve tri metode daju konzistentne rezultate. Odnos ukupne količine materije prema količini vidljive materije određen za jata (otprilike 9 prema 1) i vrednost količine obične materije dobijena iz primordijalne nukleosinteze (oko 4%) impliciraju da je ukupna količina tamne materije oko 35% kritične gustine.

Merenja sopstvenih kretanja galaksija i količina mase koja se nalazi u haloima spiralnih galaksija ukazuju na ukupnu gustinu materije koja je konzistentna sa ovom procenom. Koristeći velike numeričke simulacije formiranja struktura u svemiru izvedene na moćnim superkompjuterima, kosmolozi dolaze do sličnih procena ukupne gustine materije, zasnovano na gravitacionom privlačenju potrebnom da se formiraju strukture koje danas vidimo od neravnina koje su postojale u prvim trenucima.

Sumirajući, postoje jaki dokazi da tamna materija drži svemir na okupu, od najmanjih galaksija do najvećih struktura koje vidimo. Iako još uvek postoje sistematske nesigurnosti, broj nezavisnih linija rezonovanja ukazuje na gustinu tamne materije od oko 35% kritične gustine.

Različita od obične materije

Tri jaka dokaza ukazuju na to da je tamna materija nešto drugo od obične materije. Količina tamne materije (oko 35% kritične gustine) je znatno veća od količine obične materije koja je izvedena iz primordijalne nukleosinteze ili kosmičke mikrotalasne pozadine (3 do 5% kritične gustine). Neslaganje je skoro faktora 10, što je mnogo veće od nesigurnosti za bilo koji broj. Količina tamne materije potrebna za stvaranje strukture koju vidimo danas iz raspodele narevanina koje su postojale ranije je mnogo veća od količine obične materije. Kao dodatni uslov je činjenica da oblik struktura koje postoje danas ne bi bio moguć čak ni da količini bariona odgovara 35% kritične gustine, a da nema egzotične tamne materije. Stavljajući na stranu merenja količine obične materije iz kosmičke mikrotalasne pozadine i primordijalne nukleosinteze neverovatnost skrivanja 99% bariona u formi koja nije detektabilna je obeshrabrujuća. Npr. stavljajući 35% kritične gustine na bele patuljke ili neutronske zvezde bi zahtevalo daleko veće formiranje zvezda nego što dokazi potvrđuju. Jednako je teško sakriti istu količinu bariona u vreo gas: stavljajući 35% kritične gustine na vreo gas bi izmešalo kosmičku mikrotalasnu pozadinu stvarajući previše hladnih i toplih oblasti u mikrotalasnom nebu.

Ostaci čestica iz Velikog Praska

Rani svemir je bio moćan akcelerator koji je stvorio ceo skup fundamentalnih čestica u prirodi. U najranijim trenucima je postojala neka vrsta demokratije među česticama, gde su sve čestice postojale u broju uporedivom sa brojem fotona kosmičke pozadine. Tokom vremena, kako se svemir hladio, masivne čestice su nestajale kako su se anihilirale sa svojim antičesticama. Bez specijalnih okolnosti samo bi fotoni (i druge čestice bez mase) postojali danas u svemiru.

Obična materija je opstala zbog malo veće količine materije u odnosu na antimateriju. Druge masivne čestice bi možda preživele ukoliko se njihova samoanihilacija nije završila. Nekompletna anihilacija se može javiti ako je

interakcija čestica slaba, poput neutrinske. Masivni neutriini su preživeli u velikom broju jer njihova anihilacija nije uspela da ih uništi dovoljno brzo. Ukoliko je priroda supersimetrična, najsitnija superčestica, poznatija kao neutralino, bi preživela u dovoljnoj količini da predstavlja značajan doprinos tamnoj materiji. (Postoje drugi, komplikovaniji načini na koje bi čestice iz ranog svemira mogle preživeti.)

Tokom godina mnoge čestice su razmatrane kao kandidati za tamnu materiju. Tri zaslužuju specijalno razmatranje, jer rešavaju važne probleme u fizici čestica i njihova moć kao tamne materije je kosmološki bonus: masivni neutriini, neutralini i aksioni.

- *Neutriini.* Zbog toga što je koncentracija neutriina zaostalih iz Velikog Praska dobro određena, njihov doprinos gustini mase u svemiru zavisi od njihove mase. Da bi odgovarale količini tamne materije jedna (ili kombinacija sve tri) vrsta neutriina bi trebalo da ima masu od 30 eV. Postoje dobri dokazi da bar jedna vrsta neutriina ima masu; ipak procena njihove mase je mnogo manja od gornje granice. Dalje, oblik formiranih struktura nije u skladu sa pretpostavkom da većinu tamne materije čine neutriini. Zapravo, masa neutriina koja proizilazi iz ekspeimenata ukazuje na to da neutriini doprinose sa svega 0,1 do 5%, otprilike isto koliko i svetle zvezde. Neutriini su deo kosmičke smeše. Ova činjenica daje neku dozu vere u ideju čestične tamne materije.
- *Neutralini.* Neutralino ima dobru zaleđinu u teoriji čestica, doveo bi do oblika formiranih struktura koji je konzistentan sa posmatranjima, i možda može biti eventualno stvoren u akceleratoru sa drugim supersimetričnim česticama. Dok su procene njegove mase dosta nesigurne, ona varira između 50 i 500 masa protona. Neutralino je stoga primarni kandidat za tamnu materiju i detekciju.
- *Aksioni.* Aksion je postuliran da ispravi ozbiljan ali suptilan problem sa drugačije veoma uspešnom teorijom kvantne hromodinamike. Naravno, ova teorijska uloga nije garancija da aksion zaista postoji. Ukoliko zaista postoje, onda aksioni nastaju kopiranjem u ranom svemiru i preživeli bi u dovoljnom broju da čine tamnu materiju danas, uprkos činjenici da je njihova predviđena masa, između 0,00001 i 0,001 eV/c², vrlo mala.

To su trenutno najcenjeniji kandidati. Ipak, skori progres u teoriji stringova je doveo do velikog broja novih ideja koje bi mogle objasniti zagonetku tamne materije (i možda čak i zagonetku tamne energije, takođe). Neki su da mi, zajedno sa slabom, elektromagnetnom, i jakom interakcijom zapravo živimo na 4-D "brani" u jedanaestodimenzionom prostoru, i gravitacijom koja deluje u svih jedanaest dimenzija. Ako postoje druge brane u jedanaestodimenzionom svemiru, njihova gravitaciona interakcija sa drugim branama može biti ono što zovemo tamnom materijom. Takođe je moguće da je tamna materija sastavljena od čestica koje su dosta teže od bilo kog od tri kandidata koji su razmatrani i koji su stvoreni pred kraj inflacije. Takve ideje su u ranoj fazi i imaju malu moć predviđanja. Ipak, gledajući njihov potencijalni značaj, zaslužuju dodatnu pažnju.

Kako se može napraviti pomak u biranju između ovih mogućnosti i dešifrovanja prirode tamne materije? Važna su dva komplementarna procesa: okarakterisati koliko je moguće osobine neravnina tamne materije (što je ključ za otkrivanje njene prirode) i pokušati direktno detektovati čestice tamne materije u našem halou i/ili ih proizvesti u akceleratorima.

Vrela, hladna ili nešto drugo?

Različite čestice-kandidati za tamnu materiju su okarakterisane na osnovu njihovih brzina: tamna materija čije se individualne čestice kreću brzo (brzinama bliskim brzini svetlosti) se zove vrela, a tamna materija čije se individualne čestice kreću sporo (brzinama mnogo manjim od brzine svetlosti) se zove hladna tamna materija. Neutrini spadaju u prvu grupu, vrelu tamnu materiju, dok su aksioni i neutralini hladna tamna materija. Neutralini se kreću sporo jer su teški, dok se aksioni kreću tako jer su nastali u hladnom stanju pri kvantnom procesu sličnom Boze-Ajnštajnovoj kondenzaciji. (Ostali kandidati su na sredini po brzinama i često se nazivaju topla tamna materija.)

Razlika između vrelog i hladnog je krucijalna za formiranje struktura: čestice vrela tamne materije se kreću dovoljno brzo da isprave neravnine na galaktičkim skalama (čestice iz oblasti sa visokom gustinom brzo popunjavaju oblasti niskih gustina). Sa druge strane to znači da bi galaksije morale nastati fragmentacijom većih struktura (superjata). Sa hladnom tamnom materijom strukture nastaju od prostijih ka složenijim - prvo se formiraju galaksije, potom se njihovim grupisanjem formiraju jata, itd. Tokom 1980-ih ovo je dovelo do dve konkurentne teorije formiranja struktura - scenario vrela tamne materije i scenario hladne tamne materije.

Posmatrački dokazi su danas vrlo jasni. Strukture formirane od prostijih - galaksije su nastale pre jata galaksija i superjata. Ova činjenica isključuje neutrine (ili druge buduće kandidate vrele tamne materije) kao dominantne konstituente tamne materije. Štaviše, formiranje struktura sa hladnom tamnom materijom je simulirano na superkompjuterima, i predviđanja se dobro slažu sa velikim brojem posmatračkih rezultata, uključujući mase i rasprostranjenosti galaksija, grupisanja galaksija, galaktička jata, raspodelu gasa na velik crvenim pomacima i fluktuacije u kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini. Ova saglasnost, zajedno sa neuspehom vrele tamne materije da obezbedi dokaze, pruža ubedljive indikacije da su čestice tamne materije hladne.

Posle svega gore rečenog, postoje nagoveštaji problema sa modelom hladne tamne materije. Kompjuterske simulacije evolucije hladne tamne materije predviđaju više podstruktura u galaktičkim haloimane što se vidi i veće koncentracije tamne materije u centrima galaksija i jata nego što je izmereno. Možda postoje fizički mehanizmi koji ravnomernije raspodeljuju tamnu materiju i koji nisu uzeti u obzir prilikom simulacija ili postoje neki problemi u interpretiranju posmatranja. Ipak, takvo rešenje još uvek nije nađeno. Ovi rezultati su dali potporu pojavi spekulacija da posmatranja otkrivaju naku novu karakteristiku tamne materije.

Identifikovanje čestica tamne materije

Zasnovano na dokazima iz astrofizike, kosmologije i fizike čestica, napravljen je napredak u potrazi za česticama tamne materije u laboratoriji. Nakon decenije napora, pokušaji da se otkriju tri glavna kandidata su sada dostigli ili dostižu nivo osetljivosti potreban za testiranje njihovih kandidatura direktno.

Neutrini

Uprkos činjenici da neutrini ne mogu sami sačinjavati strukture na velikim skalama koje vidimo u svemiru, merenje njihovih masa je potrebno da bi se videla njihova uloga u kosmologiji. Merne tehnike uključuju proučavanje spektra beta-raspada, proučavanja bezneutrinog dvostrukog beta-raspada, kao i potragu za oscilacijama među različitim vrstama neutrina. Proučavanje oscilacija neutrina nastalih dejstvom kosmičkog zračenja u Zemljinoj atmosferi i nastalih na Suncu je već dalo jake dokaze da neutrini imaju masu i

da je minimalna kosmička gustina neutrina uporediva sa gustom mase zvezda. Na toj minimalnoj gustini mase, neutrini mogu imati mali, ali detektabilan uticaj na formiranje struktura na velikoj skali, što bi moglo dozvoliti kosmološko određivanje njihove mase.

Neutralini

Eksperimentalci koriste dva opšta pristupa: (1) direktnu detekciju elastičnog rasejanja neutralina koji navodno postoje u halou naše Galaksije pomoću veoma osetljivih laboratorijskih detektora i (2) detekciju produkata anihilacije neutralina koji se akumuliraju u Suncu, Zemlji ili halou naše Galaksije. Oblast direktne detekcije je vrlo aktivna, pogotovo u Evropi sa eksperimentima zasnovanim na germanijumu najviše moguće radioaktivne čistoće, funkcionisanjem vrlo velikih NaI scintilatora i razvojem potpuno novih kriogenih senzora. DAMA kolaboracija u Gran Saso laboratoriji u Italiji je iznela podatke da je detektovala "potpis" neutralina preko godišnje modulacije signala u iznosu od $\pm 2\%$ u 100 kg NaI čiji uzrok bi mogao biti Zemljino godišnje kretanje kroz lokalni oblak neutralina. Ipak, američki eksperiment Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) i drugi eksperimenti u evropskim laboratorijama čini se da se protive ovom rezultatu. Iako rezultat DAMA nije potvrđen, ovo je uzbudljiv period u potrazi za tamnom materijom, jer trenutna generacija eksperimenta dostiže nivo osetljivosti potreban za detekciju neutralina. Određeni broj eksperimenata druge generacije (CDMS II u Americi, i CRESST II i Genius u Evropi) će biti još osetljiviji i istražiti veći deo teorijski značajnijeg dela svemira. Neutralini u galaktičkom centru i oni zarobljeni u Suncu ili Zemlji se mogu anihilirati i osloboditi visokoenergetske neutrine. Anihilacija neutralina u našem galaktičkom centru bi stvorila gama-zrake, antiprotone i pozitrone; GLAST eksperiment će imati značajnu osetljivost na tragove neutralina iz haloa u vidu gama-zračenja. Trenutna generacija neutrinskih detektora je osetljiva na neutraline otprilike isto koliko i eksperimenti direktne detekcije. Konačno, postoji mogućnost da će neutralino biti stvoren i detektovan u eksperimentu u nekom od akceleratora (npr. u Fermilabovom Tevatronu ili CERN-ovom Velikom Hadronskom Kolajderu).

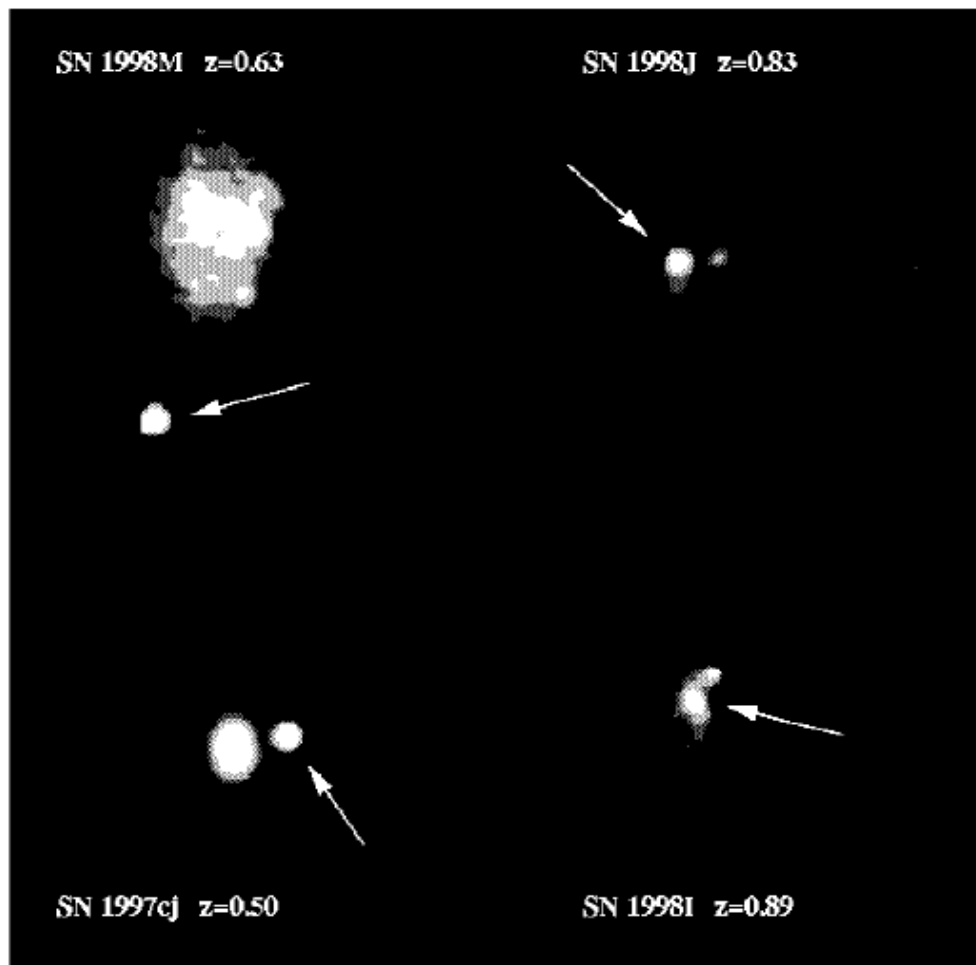
Aksioni

Metod koji najviše obećava za detekciju aksiona je preko njihovih interakcija u halounaše Galaksije sa vrlo jakim magnetnim poljem. U prisustvu magnetnog polja aksioni bi proizveli slabo mikrotalasno zračenje detektabilno u podesivoj mikrotalasnoj šupljini. Američki aksionski eksperiment je dostigao osjetljivost potrebnu za početak testiranja hipoteze o aksionskoj tamnoj materiji. Skoro odobrena poboljšanja uključuju SQUID pojačavače koji će omogućiti potragu za aksionima kroz opseg masa kroz jedan red veličine (od tri koliko je dozvoljeno trenutnim teorijama). Japanska kolaboracija razvija vrlo osjetljive fotonske detektore koristeći atome u visokopobuđenim stanjima koji će pokrivati isti opseg masa.

TAMNA ENERGIJA

Da li se širenje svemira ubrzava pre nego usporava?

Supernove tipa Ia, termonuklearne eksplozije belih patuljaka koji su nešto masivniji od Sunca (1,4 mase Sunca - Čandrasekarov limit), imaju krajnje jedinstven pik luminoznosti (kada se koriguje na brzinu opadanja sjaja). Pošto su vrlo sjajne, mogu se videti i proučavati kroz ceo vidljivi svemir i mogu služiti kao svojevrsni markeri u proučavanju širenja svemira u ranijim fazama. Tokom 70 godina astronomi su pokušavali da izmere usporavajuće delovanje gravitacije na širenje svemira da bi tako odredili ukupnu količinu materije u svemiru. U začuđujućem i uzbudljivom preokretu stvari, dva tima koja su nezavisno proučavali supernove na velikim crvenim pomacima (što odgovara velikim udaljenostima) (slika 7.) su relativno skoro otkrili da se širenje svemira ubrzava, a ne usporava! Ubrzavanje zahteva nešto novo, jer bi bilo koja količina materija izazvala usporavanje. Priroda ove nove komponente, nazvane tamna energija u duhu Cvikijevog imena tamna materija, još uvek nije shvaćena.



Slika 7. Slike udaljenih supernova tipa Ia. Za oko mesec dana, ove termonuklearne eksplozije proizvedu otprilike istu količinu svetlosti koliko i ostale zvezde u galaksiji zajedno. Slika: NASA

Pošto posmatranja supernovih daju tako iznenađujuće rezultate, astronomi pažljivo tragaju za uzrocima sistematskih grešaka usvojenim merenjima ili interpretaciji. Postoji mnoštvo mogućih izvora greške. Npr. supernove tipa Ia možda nisu ostale standardne tokom prethodnih epoha. Moguće je da velike čestice prašine (tzv. "siva prašina") prožima međugalaktički prostor, apsorbujući nešto svetlosti sa udaljenih supernova, time oponašajući efekat ubrzavajućeg svemira. Za sada nije nađena nijedna sistematska greška koja bi poništila ove rezultate.

Nezavisna potvrda ubrzavanja svemira

Dok rezultati od supernovih mogu biti podložni nekoj nepoznatoj grešci, postoji nezavisna potvrda neobičnog otkrića da se širenje svemira ubrzava, a ne usporava. Dolazi iz merenja CMB, koja daju popis materije i energije u svemiru. Merenja ukazuju na to da je svemir ravan; to implicira da suma materije i energije (tj. njihovih gustina) mora biti jednaka kritičnoj gustini. Pošto nezavisni proračuni ukazuju na to da materiji odgovara oko 35% kritične gustine, merenja CMB ukazuju na postojanje još jedne komponente koja se ne grupiše sa materijom ina koju otpada oko 65% kritične gustine. Ta nedostajuća masa/energija koja je otkrivena pomoću CMB je konzistentna sa komponentom tamne energije na koju ukazuju merenja supernovih

Zašto se širenje svemira ubrzava?

Po Ajnštajnovoj teoriji, u neobičnim situacijam gravitacija može biti odbojna (videti odeljak 1.). Ono što je potrebno je vrsta energije koja je elastična (negativan pritisak). Postoji forma energije za koju se zna da ima ovo svojstvo - energija kvantnog vakuuma (originalno nazvana kosmološkom konstantom od strane Ajnštajna). Ipak, ta činjenica ne završava priču o tamnoj energiji. Svi pokušaji računanja energije kvantnog vakuuma koristeći naše trenutno razumevanje fizike daju vrednosti koje su minimalno 55 redova veličine (10^{55} puta) prevelike. Možda će napredak u razumevanju kvantnog vakuuma eventualno da reši neslaganje, ali većina teoretičara veruje da će takav napredak dovesti do objašnjenja zašto energija vakuuma mora biti tačno nula pre nego mala ali konačna vrednost potrebna da objasni ubrzavajući svemir.

Predložena su i druga objašnjenja za tamnu energiju. Postoji mogućnost da je polje čestica, poetski nazvano "Kvintesencija" (Srž), na delu. Ukoliko je to slučaj, bili bi smo na početku (na sreću, blage) inflatorne epizode. Topološki defekti nastali iz faznog prelaza u ranom svemiru bi se mogli zapetljati i izazvati negativan pritisak, potpuno isto kao i gomila umršenih gumenih traka kada bi pokušali da ih razdvojimo. Ili možemo doživljavati efekte dodatnih prostor-vremenskih dimenzija.

Konačna sudbina svemira zavisi od prirode tamne energije. Ukoliko je tamna energija zaista energija kvantnog vakuuma, tada je sudbina svemira nastavak ubrzanja širenja svemira. Kao rezultat, za 150 milijardi godina svega hiljadu ili nešto više galaksija će biti vidljivo čak i za najjače teleskope, jer

će se većina galaksija udaljavati prebrzo da bismo ih videli. Sa druge strane, ukoliko svemir prolazi kroz blagu i privremenu fazu inflacije, tada će opet jednom početi da se usporava i nebo će ostati ispunjeno galaksijama dok sve njihove zvezde ne izgore.

Konačno, dolazimo do "zašto sada?" pitanja. Čini se da živimo u specifičnom periodu kada svemir prelazi iz faze usporavanja u fazu ubrzavanja. Da li je ta faza samo koincidencija ili ima neko dublje značenje?

Dva ključna izazova: dešifrovanje tamne materije i energije

Povremeno nauka stigne do litice - raskrsnice gde svi putevi, čini se, vode ka konfuziji. Ove krize uglavnom prethodne velikim konceptualnim probojima (otkrićima). Svakako, fizičari i kosmolozi su sada zatečeni u jednoj takvoj (divnoj) dilemi. Njihova slika svemira sada zahteva čudnu vrstu tamne energije sa negativnim pritiskom, zajedno sa tamnom materijom koja je sastavljena od nečeg drugačijeg od bariona koji su sastavni elementi nas i zvezda.

Dešifrovanje prirode tamne materije i energije je jedan od najbitnijih ciljeva u fizici svemira. Rešavanje oba problema je ključ za dalji napredak u kosmologiji i fizici čestica. Rešavanjem ovih problema će se rešiti ne samo pitanje sudbine svemira već i sama priroda materije, prostora i vremena. Kroz kombinaciju novih pristupa i povećanjem kvaliteta instrumentalne tehnike, naučnicima se nudi da naprave velike pomake u narednim godinama.

Astronomski alati

Postoji nekoliko astronomskih načina da se pristupi problemu određivanja osobina tamne materije i tamne energije. Zasnivaju se na dva različita tipa informacija. Brzina širenja svemira zavisi od njegovog sastava. Mereći razdaljine među objektima kao funkciju crvenog pomaka, astronomi mogu da odrede istoriju širenja i odatle da zaključe o relativnoj količini tamne materije i energije, kao i da saznaju nešto o prirodi tamne energije. Brzina formiranja struktura u svemiru je osetljiva na tamnu materiju i tamnu energiju, tj. njihove količine. Na velikim skalama, brzina rasta neke strukture je primarno osetljiva na količinu tamne energije i njene osobine. Jednom kada metrija kolapsira da bi formirala galaksije i jata, osobine galaksija i jate su osetljive na detaljne osobine tamne materije.

Postoji nekoliko moćnih tehnika za dobijanje brzine širenja svemira. Posmatranjem ugaone veličine vrelih i hladnih oblasti u mikrtalasnoj pozadini mogu odrediti rastojanje do površi na kojoj je nastalo zračenje; to rastojanje zavisi od istorije širenja svemira od pre 400 000 godina do danas. Map i Planck misije će izvršiti precizna merenja ovog tipa u narednim godinama.

Posmatranjem udaljenih supernova, može detaljno da se prouči istorija širenja sve do crvenih pomaka oko 2, što odgovara vremenu od par milijardi godina posle Velikog Praska do danas. Trenutni podaci su pružili jake dokaze u korist postojanja tamne energije. Širokougaoni teleskopi su potrebni da bi se našli veći i uniformniji uzorci supernovih. Ovakvi teleskopi će znatno uvećati broj uzoraka supernovih (za faktor 10 ili više). Veliki uzorci će obebediti ne samo veću statističku preciznost već i bolju kontrolu sistemskih grešaka. Npr. veliki uzorak supernovih može biti podeljen na manje poduzorke u potrazi za sistematskim trendovima i testiranjem validnosti rezultata.

Verovatnoća efekta gravitacionog sočiva na udaljene objekte je osetljiva na udaljenost do "sočiva" i pozadinskog izvora; ove udaljenosti zavise od istorije širenja svemira. Posmatranja jata koja sadrže višestruko prelomljene izvore na nekoliko različitih crvenih pomaka mogu da se iskoriste za merenje relativnih udaljenosti do sočiva i izvora. Ovakva posmatranja će zahtevati detaljne mape mase jata zasnovane na posmatranjima efekta gravitacionih sočiva.

Poput rastojanja do objekata sa visokim crvenim pomacima u svemiru, zapremina povezana sa datim crvenim pomakom je osetljiva na istoriju širenja. Brojanje objekata poznate (ili one koju je moguće izračunati) suštinske vrednosti gustine može biti iskorišćeno da se dobije zapremina u funkciji crvenog pomaka, i iz toga istorija širenja. Galaksije i jata fiksnih masa su vrlo obećavajuće za ovu svrhu.

Postoji nekoliko moćnih tehnika za ispitivanje brzine rasta struktura u svemiru. Stvaranje prvih zvezda i galaksija u svemiru (par miliona godina posle Velikog Praska) je osetljivo na prirodu tamne materije. Npr. vruća tamna materija (neutrini) u potpunosti inhibira rano formiranje galaksija, i proučavanje formiranja velikih oblaka gasa koji se vide usled apsorpcije svetla sa udaljenih kvazara smanjuje udeo tamne materije u obliku neutrina na ispod 10%. Posmatranja "slabog" efekta gravitacionog sočiva (npr. male distorzije u obliku galaksija) mogu biti upotrebljene da bi se izmere osobine grupisanja materije na velikoj skali tokom poslednjih 10 milijardi godina. Amplituda ovakvog grupisanja kao funkcija skale i crvenog pomaka zavisi od

količine tamne energije i njenih osobina. Posmatranja "jakog" efekta gravitacionog sočiva mere raspodelu mase unutar galaksija i jata. Profil gustine u jezgrima galaksija i jata kao i broj patuljastih sistema oko velikih galaksija su osetljivi testovi osobina tamne materije. Odsustvo centralne kondenzacije tamne materije može biti dokaz nove fizike tamne materije - ili čak nekonzistentnosti u paradigmi čestične tamne materije. Merenje sopstvenih brzina galaksija i jata galaksija kao funkcije crvenog pomaka je jak alat za ispitivanje rasta struktura u tamnoj materiji. U narednih par godina, supernove se mogu sistematski koristiti za proširenje trenutnih posmatranja sopstvenih brzina za faktor 2. Napredak se isto može očekivati i na polju upotrebe fluktuacija odnosa luminoznost-površina kod galaksija u cilju obezbeđivanja veoma preciznih merenja udaljenosti ($\pm 3\%$). Korišćenje ovog metoda na velikim teleskopima sa adaptivnom optikom bi trebalo da omogući merenje sopstvenih brzina na skalama 10 puta većim od trenutnih. Sopstvene brzine jata se takođe mogu meriti koristeći efekat poremećaja vrelog gasa u jatu koji vrši na mikrotalasnu pozadinu (Sunjajev-Zeljdovič efekat). Brojnost galaksija i jata je osetljiva na brzinu rasta struktura u svemiru. I brzina rasta i brzina ekspanzije utiču na broj.

Nijedna od ovih metoda nije dovoljna sama po sebi. Kombinacija metoda je potrebna da bi se definitivno odredila priroda tamne materije i tamne energije. Ove metode su često komplementarne - što znači, obezbeđuju različite informacije - ali ponekad obezbeđuju i važnu proveru jedna drugoj. Nijedna metoda nije imuna na mogućnost postojanja male ili nepoznate sistematske greške, te su takve provere veoma bitne. Važnost komplementarnog merenja i proveranja je ilustrovana trenutnim podacima na slici 2.

Za proučavanje tamne materije će možda biti potrebna i nova vrsta teleskopa. Širokougaoni (više od 1 stepena) teleskopi sa gigapikselnim CCD kamerama obezbeđuju pretraživanje velikih oblasti na nebu za supernovama (tip Ia se javlja u periodu od oko 1 u sekundi u svemiru ali su raširene na preko 40 000 kvadratnih stepeni neba) i mapiranje raspodele tamne materije na velikim skalama.

Konačno, teorija i računanje na velikoj skali će igrati kritičnu ulogu. Da bi se stekao pun potencijal merenja razvoja struktura u svemiru, potrebo je obimno numeričko modeliranje i simuliranje predviđanja različitih modela hladne tamne materije. Potreba za većim dinamičkim opsegom i bolja ulazna fizika su izazov trenutnim kompjuterskim resursima. Slično, bolje teorijsko razumevanje supernovih tipa Ia je ključno za njihovo korišćenje kao

kosmičkih daljinomera. Postizanje ovakvog razumevanja će zahtevati napretke u naučnom računarstvu na velikoj skali. Trenutno, kopjuterska sredstva su vremenski ograničavajuć faktor za analizu podataka iz CMB, i situacija će postati još kritičnija sa MAP, Planck i drugim visokorezolucionim satelitima.

Laboratorijske potrage

Laboratorijski eksperimenti su komplementaran pristup identifikaciji čestica tamne materije. Sva tri kandidata - aksioni, neutralini i neutrini - mogu biti otkriveni u laboratoriji. Potraga će uključiti akceleratore, specijalizovane detektore tamne materije i velike podzemne detektore.

Akceleratori će pomoći u obezbeđivanju važnih ograničenja za osobine nekih čestica tamne materije ili čak iotkriti tražene čestice (npr. neutralino). Na primer, kombinacijom eksperimaneta za oscilovanje neutrina, koji koriste neutrine iz postojećih akceleratora i budućih mionskih kolajdera sa proučavanjima atmosferskih i solarnih neutrina će biti u mogućnosti da otkriju mase i odnose mešanja neutrina. Ovo će omogućiti i pojašnjenje uloge koju neutrini imaju pri formiranju struktura. Potraga za bezneutrinskim dvostrukim beta-raspadom pruža dalja ograničenja za osobine neutrina. Slično, potraga za supersimetrijom u LHC-u i za neutralinima u halou naše Galaksije će biti komplementarne i dostići će slične osetljivosti.

U direktnoj potrazi za neutralinima, potrebno je početi pripreme za treću generaciju detektorskih eksperimenata, sa dva moguća scenarija na umu. Ako druga generacija eksperimenata otkrije signal, pažnja će se pokloniti na dobijanje informacije koja će povezati signal sa galaksijom i obezbediti informaciju o halou i raspodeli tamne materije unutar njega. Ukoliko eksperimenti druge generacije ne uspeju da otkriju signal, pažnja će biti poklonjena tehnikama smanjenja pozadinskih signala. Ovaj drugi put će biti prisilana ukoliko se otkriju supersimetrije u LHC-u ili Tevatronu. indirektna potrage za neutralinima će profitirati sa novim instrumentima poput GLAST-a (Gamma Ray Large Space Telescope), koji će imati energetska rezolucija da traže gama zrake nastale pri anihilaciji neutralina u galaktičkom centru. Detektori za neutrine koji imaju veliku detektorsku površinu će komplementirati eksperimente za direktnu detekciju neutralina velikih masa. Iako je primarna motivacija za ove instrumente različita, trebalo bi da budu dizajnirani da dozvole i ovakve eksperimente.

Izazov potrage za aksionima će biti da prošire opseg masa za istraživanje ka višoj granici mase. Ukoliko ne smislimo nekakve širokopojasne metode, trenutni principi se trebaju proširiti ka većim frekvencijama koristeći, npr., podesive "photon bandgap" šupljine.

Na kraju ali ne i najmanje važno, testovi gravitacije bilo na maloj skali sa eksperimentima popšut Kevendišovog ili na velikoj skali sa testovima principa ekvivalencije mogu donekle rasvetliti probleme tamne materije i energije. Ove zagonetke mogu biti znak da naučnici ne razumeju gravitaciju, i neki modeli tamne energije predviđaju postojanje novih sila, slabijih od gravitacije, koje mogu da se otkriju sa osetljivijim testovima principa ekvivalencije.

Nove prilike

Kako počinje novi vek, naučnici imaju prvi, probni spisak konstituenata svemira: jedna trećina materije i dve trećine tamne energije, koje zbirno daju kritičnu gustinu i ravan svemir. Ovakav popis postavlja nova i dublja pitanja čiji odgovori će imati dubok trag i u kosmologiji i u fizici čestica i čije će odgovaranje uključiti i fizičare i astronome. Naučnicima se nudi da napreduju u postavljanju dva ključna pitanja o sastavu našeg svemira i samoj prirodi prostora, vremena i materije.

Šta je tamna materija?

Tamna materija - nešto što niti emituje niti apsorbije svetlost - održava svemir na okupu. Njena priroda je misterija. Postoje jaki dokazi da većina nje nije od obične materije od koje smo sastavljeni mi i zvezde. Trenutna hipoteza je da je sastavljena od elementarnih čestica preostalih iz najranijih trenutaka. Vodeći kandidati za tamnu materiju su nove čestice čije je postojanje predviđeno teorijom u pokušaju unificiranja sila i čestica u prirodi. Pokazujući da jedna (ili nekoliko) od ovih čestica grade tamnu materiju ne bi samoodgovorilo na jedno od ključnih pitanja kosmologije već bi i imalo implikacije na fundamentalne sile i čestice u prirodi.

Tragovi o prirodi tamne materije će doći iz astronomske posmatranja njene distribucije u svemiru kao i iz proučavanja evolucije struktura u svemiru. Postoje takođe i vrlo bitne prilike za detektovanje čestica tamne materije koje održavaju našu Galaksiju na okupu, bilo direktno ili indirektno,

detekcijom čestica u koje anihiliraju. Akceleratori će takođe možda biti u stanju da proizvedu čestice tamne materije.

Kakva je priroda tamne energije?

Dve nezavisne linije dokaza ukazuju na postojanje nove vrste energije koja prožima svemir i kojoj odgovaraju dve trećine kritične gustine i koja izaziva ubrzanje širenja svemira, pre nego usporenje. to je krajnje neobičan rezultat, toliko neobičan da prvo moramo da potpuno dokažemo dalje ubrzavanje širenja i samim tim i postojanje tamne energije. Pretpostavljajući da postoji, ova misteriozna energija ispoljava do sada neviđenu osobinu gravitacije (ponekad može biti i odbojna), i razumevanje njene prirode može dovesti do napretka u našem razumevanju prostora, vremena i materije. Objašnjenja data za tamnu energiju variraju od energije kvantnog vakuuma do uticaja nevidljivih dimenzija prostor-vremena. Časopis *Science* nije preterivao kada je 1998 izabrao kao naučno otkriće godine da se svemir ubrzano širi.

Tamna energija je po svojoj prirodi ekstremno difuzna, i njeni efekti mogu da se osećaju samo na najvećim skalama, gde utiče na širenje svemira i rast struktura u njemu. Otkrivanje prirode tamne materije će zahtevati teleskope pre nego akceleratora, i ključne prilike za ispitivanje širenja svemira i nastanka struktura leže u supernovama, galaksijama i jatima.

Nove vrste teleskopa će možda biti neophodne u proučavanju tamne materije i energije. Mapiranje tamne materije efektom gravitacionih sočiva i potragom za dalekim supernovama će svakako zahtevati pretraživanje velikih oblasti neba. Ovakva pretraživanja mogu biti izvedena sa širokim vidnim poljem (1 stepen ili više) teleskopa i jednako velikim CCD kamerama (verovatno gigapikselnim ili većim). Sloan Digital Sky Survey (projekat digitalizacije neba i mapiranja velikih struktura) i MACHO projekat (potraga za tamnim zvezdama u halou naše Galaksije preko efekta mikrosočiva) su pokazali vrednost takvih teleskopa specijalne namene.

L I T E R A T U R A :

1. Connecting quarks with Cosmos - eleven science questions for the new century - grupa autora, National Academies Press, 2003.