

Veliki prasak

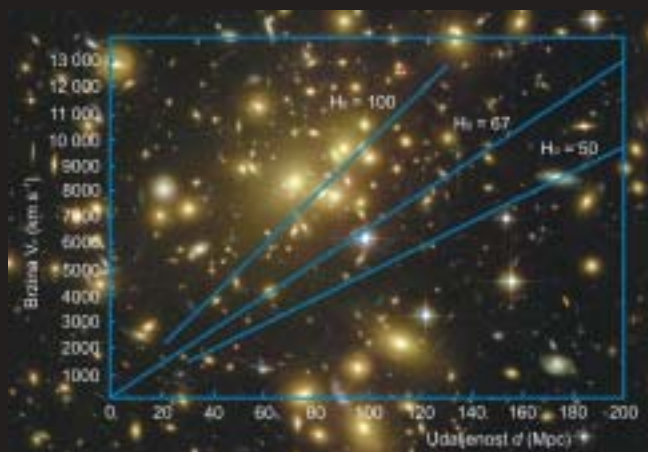
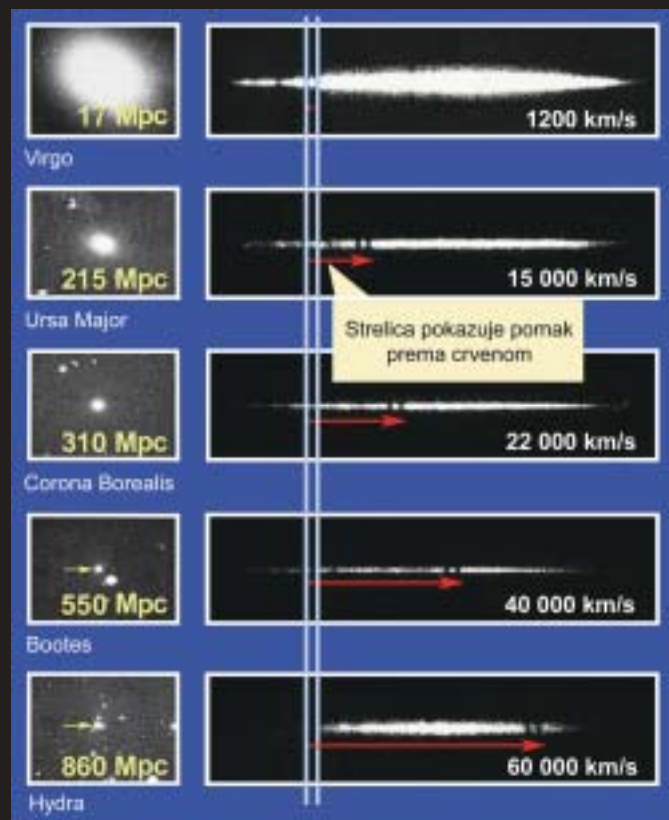
Prema teoriji Velikog praska, koju je većina prihvatila, čitav je svemir na početku bio sabijen u jednoj točki beskonačne gustoće. Prije otprilike 13,7 milijardi godina ta se jedinstvena točka počela širiti. Iz nje je osim mase i energije, nastao prostor ali i sve nam poznate sile, pa i samo vrijeme. Postupno se vruća energetska kupelj hladila, čestice su se spojile u atome, dok se napokon iz plazme nisu oblikovale galaksije, zvijezde, planeti, te naposljetku i život. O svemu tome saznat ćete ako pročitate nedavno objavljenu knjigu Marina Fonovića *Svemir*, iz koje prenosimo poglavlje o postanku svemira.

Marino FONOVIĆ, Plomin

Pogledamo li duboko u svemir primijetit ćemo da se daleki skupovi galaksija udaljavaju od nas. Zapravo, udaljenost između velikih skupova postupno se povećava i stoga svemir stalno raste. Ta činjenica, koju je još 1929. godine utvrdio američki astronom Edwin Hubble, jedno je od najvećih otkrića moderne astronomije.

Knjigu *Svemir*, iz koje je preuzet ovaj tekst, možete kupiti samo kod autora i nakladnika: marino.fonovic@ttf.hr ili 099 400 8203.

Astronomi brzinu galaksija mjere proučavanjem položaja tamnih linija u njihovim spektrima. Što je brzina udaljavanja galaksije veća, to su zbog Dopplerovog efekta spektralne linije više pomaknute prema crvenijim, većim valnim duljinama (sl. 1.a). Naime, kad se galaksija udaljava od nas, valovi njezine svjetlosti se rastežu. Što se galaksija brže kreće, više se rastežu i valovi svjetlosti. Duže valove doživljavamo kao crveniju svjetlost. Hubble je otkrio da prividna brzina galaksije ovisi o njezinoj udaljenosti, što je galaksija dalje, to se ona brže udaljava od nas (ima veći crveni pomak). Tu relaciju nazivamo Hubbleov zakon koji pišemo: $v = H_0 \cdot d$. Ovdje v označava brzinu udaljavanja galaksije, d njezinu udaljenost, H_0 je tzv. Hubbleova konstanta čiju vrijednost izražavamo u pomalo čudnim je-



Slika 1. Pomak prema crvenom u galaksija (a) i grafikon koji prikazuje ovisnost između brzina udaljavanja galaksija i njihovih udaljenosti za tri različite vrijednosti brzine širenja svemira, što je tzv. Hubbleova konstanta.



Slika 2. Supernova tipa I.a koja je 1994. godine eksplodirala u vanjskom području lentikularne galaksije NGC 4526 udaljene 55 milijuna svjetlosnih godina. Mjerenjem pomaka spektralnih linija utvrđeno je da se galaksija udaljava od nas brzinom od 448 km/s. Snimka: HST/NASA/ESA.

dinicama: kilometar u sekundi na megaparsek (km/s/Mpc). To je prirast brzine udaljavanja po jednom megaparseku (sl. 1.b). Hubbleov zakon koji povezuje brzine i udaljenosti (s iznimkom situacije kad se ništa uopće ne kreće) važeći je u bilo kojem dijelu svemira.

Galaksije u pokretu

Hubbleovo otkriće bilo je tako neočekivano da nije odmah shvaćeno njegovo puno značenje. Kako bismo si lakše (dvo-dimenzionalno) predočili Hubbleov zakon, uzmimo balon i nacrtajmo na njemu nekoliko točkica. Polako ga napušimo. Kako

se balon širi, tako se udaljenost između svakog para točkica povećava. Zamislite da ste vi jedna od tih točkica i gledate prema ostalim točkicama. S tog mjesta promatranja vama bi se činilo da se sve točkice udaljuju od vas. Nije bitno koju točku odaberete, sa svake je isti pogled. Dakle, galaksije u svemiru koji se širi su poput točkica na balonu koji napuhavamo.

Kad jednom odredimo vrijednost Hubbleove konstante, možemo iz crvenog pomaka u spektru galaksije na temelju Hubbleova zakona odrediti njezinu udaljenost. Veličina Hubbleove konstante je povezana sa starošću, razvojem i sudbinom svemira.

Već sedam i pol desetljeća astronomi pokušavaju što točnije odrediti vrijednost Hubbleove konstante. Hubble je u početku predlagao vrijednost od 500 km/s/Mpc. Allan R. Sandage i drugi astronomi znatno su poboljšali točnost mjerenja i prvotnu vrijednost Hubbleove konstante smanjuju na 50–100 km/s/Mpc. Do kraja prošlog stoljeća procjene Hubbleove konstante nalazile su se uglavnom unutar ranije određene granice. U svemu ovome nastala je zbrka, u kojoj su se znanstvenici po svojoj slobodnoj prosudbi odlučivali za proizvoljnu vrijednost Hubbleove konstante.

Kao izmjeriti Hubbleovu konstantu

U suštini određivanje Hubbleove konstante je jednostavno, potrebno je samo izmjeriti brzinu i udaljenost galaksija. Mjerenje brzine neke galaksije je lako i izravno: na osnovi izmjerenih pomaka spektralnih linija određuje se brzina udaljavanja.

Kad je određivanje Hubbleove konstante tako jednostavno, zašto je ono ipak veliki problem suvremene kozmologije, prisutan već više od sedamdeset godina? Dva su osnovna razloga. Prvi je što na gibanje galaksija utječe i gravitacijsko privlačenje njihovih susjeda. Druga teškoća proizlazi iz činjenice da je mjerenje galaktičkih udaljenosti znatno teže, nego što smo mislili. Dakle, za točno određivanje Hubbleove konstante ne samo što moramo imati točne indikatore udaljenosti, već mjerenja moraju biti načinjena pri vrlo udaljenim galaksijama, kod kojih su vlastite brzine zanemarive u odnosu na brzinu širenja prostora.

Prva mjerenja udaljenosti drugih galaksija načinjena su krajem 1920-ih pomoću promjenljivih zvijezda cefeida. Cefeide su izuzetno sjajne zvijezde, njihove apsolutne magnitude dosežu –6, što znači da mogu biti 10 000 puta sjajnije od Sunca. Ali čak i pomoću najvećih teleskopa izrađenih prije 1990-ih godina prošloga stoljeća, cefeide su se mogle opaziti samo u nekolicini najbližih galaksija koje pripadaju Mjesnoj grupi. Astronomi su razvili i metode za mjerenje udaljenosti galaksija izvan Mjesne grupe, međutim one ovise o sekundarnim pokazateljima udaljenosti baždarenim unutar Mjesne grupe gdje su udaljenosti određene pomoću cefeida. U sekundarne pokazatelje udaljenosti spadaju kuglasti skupovi, supernove (sl. 2.) i područja H II – golemi oblaci u kojima se rađaju zvijezde. Pronalazeći takve objekte u galaksijama izvan Mjesne grupe i mjereći im sjaj, usporedimo ih s odgovarajućim objektima opaženim u npr. susjednoj Andromedinoj galaksiji te tako procijenimo udaljenost do udaljenijih galaksija.

Desetljećima su se astronomi nadali da će problem određivanja međugalaktičkih udaljenosti biti riješen kad budu moguća promatranja s većom rezolucijom. Svemirski teleskop Hubble može razlučiti cefeide na deset puta većoj udaljenosti, dakle u 1000

puta većem volumenu svemira, nego što je moguće prilikom opažanja s površine Zemlje. Uostalom ovo je i bio glavni motiv za gradnju svemirskog optičkog teleskopa, čija bi mjerenja omogućila točnije određivanje Hubbleove konstante.

Uporabom svemirskog teleskopa pomoću cefeida izmjerene su udaljenosti dvadesetak galaksija izvan Mjesne skupine, udaljenih do 20 Mpc. Od posebne važnosti bilo je određivanje udaljenosti skupa galaksija u Djevici, koji sadrži mnoštvo različitih vrsta galaksija u kojima ima dovoljno sekundarnih pokazatelja uporabljivih, nakon baždarenja prema izmjerenoj udaljenosti skupa, za određivanje udaljenosti još daljih galaksija.

Mjerenja izvršena pomoću Hubbleova teleskopa pokazuju da je vrijednost Hubbleove konstante oko 73 km/s/Mpc s mogućom pogreškom prilikom mjerenja od oko 5 posto.

Prostor i vrijeme: gdje je središte svemira?

Današnji kozmolozi promatraju svemir kao neku golemu arenu u kojoj sve galaksije bježe jedna od druge, i to na takav način da se bilo koja galaksija može smatrati središtem svemira. Međutim, mogli biste pomisliti da ipak mora postojati neko »pravo središte«, neka točka u kojoj se odigrala početna eksplozija (ili početak razilaženja) zbog koje su se galaksije toliko udaljile jedna od druge.

No, kako se čini, takva središta nije bilo. Kad se bavimo svemirom i kada razrađujemo ono što znamo u najširim mogućim okvirima, tada se dolazi do spoznaje da moramo u izvjesnoj mjeri napustiti svoj osjećaj za svakodnevne pojave. Ovdje se moramo osloniti na matematičke teorije koje nam se mogu na prvi pogled učiniti neobičnim, ali koje se, za razliku od našeg osjećaja za obične pojave, slažu s eksperimentima i opažanjima. Za svijet vrlo velikih veličina kozmolozi se koriste Einsteinovom općom teorijom relativnosti, a ta se teorija bavi gravitacijom, prostorom i vremenom.

Kad primijenimo tu teoriju, ustanovit ćemo da svemir nije jednostavno započeo eksplozijom u jednoj točki prostora nakon koje su galaksije, slično komadićima preostalima nakon eksplozije goleme bombe, razbacane na sve strane. Premda se svemir širi, on se ne širi u nešto. Teorija nam, naime, kaže da se i sam prostor isteže i sa sobom nosi skupove galaksija. Širenjem tog sustava skupovi se sve više udaljavaju jedan od drugog, pritom se svako područje svemira širi jednakom brzinom pa se udaljeniji skupovi međusobno udaljavaju brže od onih bliskih.

Širi li se svemir?

Nije točno reći da se sve u svemiru širi. Zemlja ne postaje veća, niti se to ne zbiva sa Sunčevim sustavom ili našom galaksi-

Olbersov paradoks

Jedno od najvažnijih znanstvenih opažanja možete načiniti kad pogledate u tamno noćno nebo. U prvi mah to zvuči pomalo čudno kao i pitanje koje slijedi. Zašto je nebo noću tamno? Posve je jasno da će na strani Zemljine polutke koja nije obasjana Suncem biti noć ali to nije potpun odgovor na naše pitanje. To na izgled jednostavno pitanje u prošlosti je zbunjivalo mnoge umove, njegovu je važnost već u 16. stoljeću shvatio engleski astronom Thomas Digges. Isto pitanje postavio si je 1610. i Johannes Kepler, a u 18. stoljeću problemom noćnog neba bavili su se astronomi Edmund Halley i Jean-Philippe Loys de Chesaux.

Zagonetku tamnoga noćnog neba najčešće ćete pronaći pod imenom Olbersov paradoks, nazvanom po njemačkom astronomu Heinrichu Olbersu koji je taj kozmološki problem 1826. predstavio javnosti. Olbers i ostali razmišljali su o tome kako bi izgledalo noćno nebo da svemir postoji oduvijek, da je beskonačan, nepromjenljiv i jednoliko napučen zvijezdama čiji se broj povećava s udaljenošću. U takvom svemiru, kamo god pogledamo morali bi vidjeti neku zvijezdu, baš kao što bi u beskonačnoj šumi u svakom smjeru vidjeli stablo (sl. 3.). Iako bi mnoge zvijezde bile vrlo daleko, ipak bi nam pogled uvijek završio na površini neke od njih. Zbog toga bi noću nebo blistalo kao površina Sunca. No, zašto je onda nebo noću tamno?



Slika 3. Šuma bukve na obroncima Učke. U beskonačnom, nepromjenljivom svemiru, kamo god pogledali morali bismo vidjeti zvijezde baš kao što bismo u beskonačnoj šumi morali u svakom smjeru vidjeti stablo. Snimila: Ljiljana Fonović.

Rješenje je u modelu svemira koji nije vječan, pa svjetlost zvijezda do nas još nije mogla stići. Da bi nam nebo bilo posve ispunjeno zvijezdama i sjajno poput površine Sunca morali bismo gledati u prošlost 10^{23} godina – naime toliko bi do nas moralo putovati svjetlo najudaljenijih zvijezda. Naš svemir (star oko 13,7 milijardi godina) naprosto ne postoji dovoljno dugo, da bi mogao proizvesti ravnomjerno sjajno nebo kao što je površina Sunca.

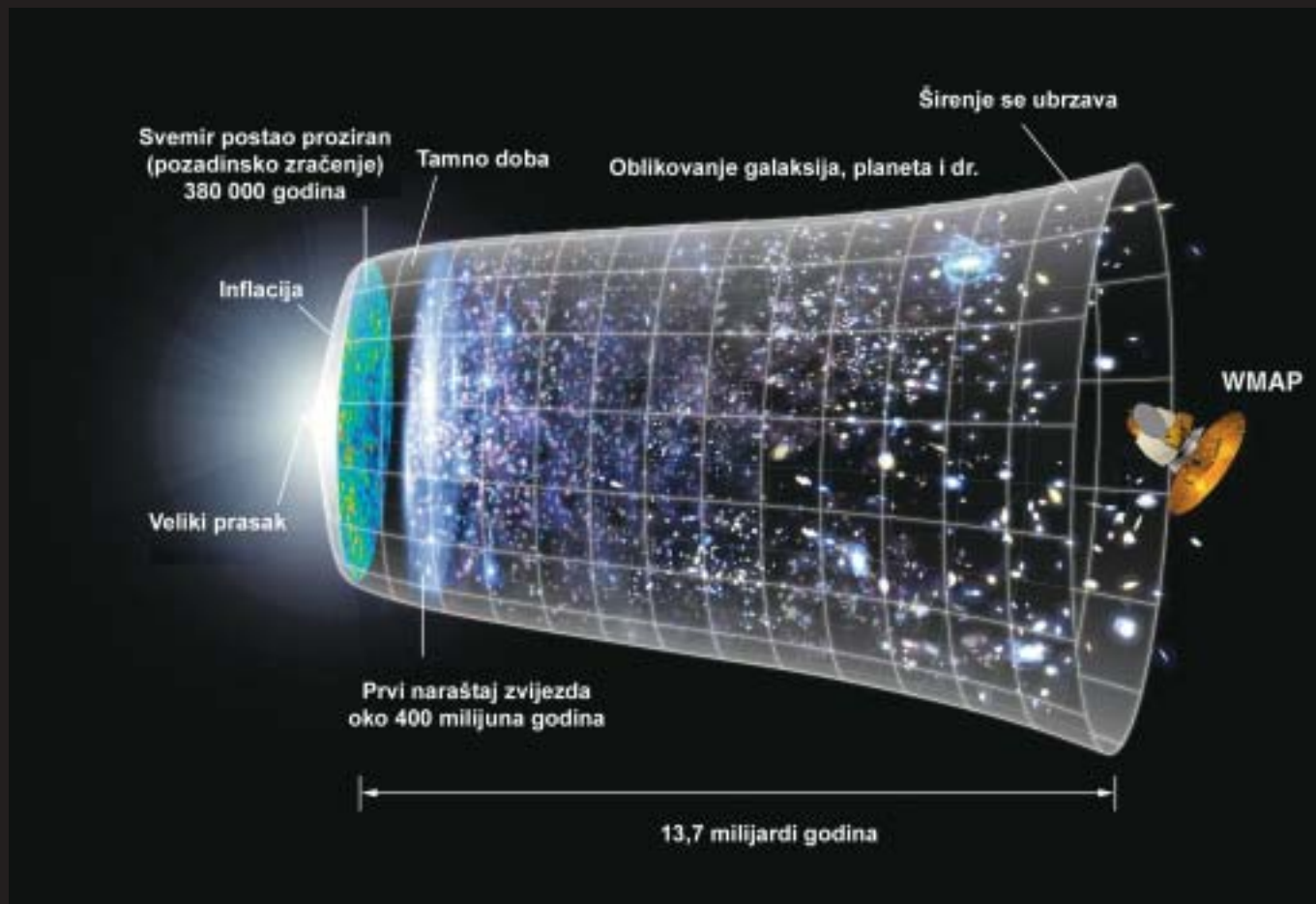
Osim toga svemir se širi, svjetlo koje stiže od udaljenih izvora što bježe od nas slabi zbog pomaka prema crvenome (Dopplerov efekt).

Gledajući kroz pukotine između zvijezda i galaksija mi gledamo u daleku prošlost, u vrijeme prije negoli su postojale galaksije. Najdalje možemo do-prijeti do površine posljednjeg raspršenja, stvorene 380 000 godina poslije Velikog praska, to je granica koja razdvaja neprozirni svemir od prozirnoga. Premda je prema teoriji Velikog praska u to vrijeme plin koji je ispunjavao svemir imao temperaturu 3000 K on je do danas širenjem svemira »ohlade« na samo 2,73 K. Taj umirući žar Velikog praska izvor je pozadinskog zračenja koje su 1965. otkrili Penzias i Wilson, dakle nebo ipak nije posvema crno. Tama noćnog neba dokaz je rođenja svemira u određenom trenutku vremena, dokaz o valjanosti modela Velikog praska. Mi zapravo noću golim okom promatramo širenje svemira.

jom. Gravitacija također drži i galaksije na okupu u grupama i skupovima. Samo na golemim udaljenostima između skupova galaksija, širenje svemira pobjeđuje gravitacijsku privlačnu silu te se jedino oni međusobno udaljuju u svemiru.

S obzirom da se svemir širi, čini se logičnim da je u prošlosti sve moralo biti bliže negoli je danas. Obrnemo li današnji smjer gibanja galaksija, stigli bismo do trenutka kad su se sve galaksije dodirivale. Odemo li još dalje u prošlost, pronašli bismo svu

materiju i svu radijaciju stisnutu u sićušnom prostoru, neusporedivo manjem od jezgre jednog jedinog atoma. Ta je materija bila nevjerovatno vruća i gusta. To je podrijetlo zamisli po kojoj se svemir što ga danas vidimo u određenom trenutku rodio u eksploziji koju zovemo Veliki prasak (engl. Big Bang). Novija kozmološka i astrofizička istraživanja pokazuju da se trenutak nastanka svemira zbilo prije otprilike 13,7 milijardi godina. Otada se svemir stalno širi raspršujući svoj sadržaj u svim smjerovima preko sve većih udaljenosti (sl. 4.).



Slika 4. Evolucija svemira: na dijagramu su prikazane promjene u svemiru od Velikog praska do naših dana. Ilustracija: NASA/WMAP.

Početak u singularnosti

Vratimo se nakratko u prošlost da vidimo kako se rodila ideja o Velikom prasku. U desetljeću nakon Einsteinova otkrića opće teorije relativnosti, koje se dogodilo 1916., matematičari su istraživali mogućnosti dopuštene fizikalnim zakonima.

Jedna od posljedica Einsteinove matematike bila je da svemir ne može biti statičan već se mora mijenjati, može se postupno ili širiti ili stezati. Na to je još 1922. ukazao ruski kozmolog i matematičar Alexander A. Friedmann. Einstein je i sam došao do takvog zaključka ali mu se nije sviđao jer je bio pobornik Newtonove predodžbe o beskonačnom nepromjenjivom svemiru, stoga u svoje jednadžbe uvodi tzv. kozmološku konstantu.

Einstein je zamislio jednu novu silu, »antigravitaciju«, koja za razliku od ostalih sila nije potjecala ni iz kakvog posebnog izvora, već je bila utkana u samu tvar prostorvremena. On je tvrdio da prostorvrijeme ima usadenu težnju ka širenju, koja bi se trebala nalaziti u potpunoj ravnoteži s privlačnim djelovanjem svekolike materije u svemiru, rezultat čega je statički svemir.

Tek nakon što je otkriven Hubbleov zakon – počelo se razmišljati o tome da jednadžbe možda opisuju stvarni šireći svemir u kojemu živimo. Znanstvenik koji je prvi pokušao iskoristiti Einsteinove jednadžbe za opisivanje rođenja svemira bio je Georges Lemaitre, belgijski isusovac i teorijski kozmolog Vatikanskog opservatorija.

Lemaitre nije vidio nikakva razloga za uvođenje kozmološke konstante, izmišljene ni iz čega. On je 1931. izložio teoriju po kojoj je svemir nastao iz kugle tvari gustoće jednake gustoći atomske jezgre – neutronske zvijezde, koju je nazvao izvorni atom (praatom). Lemaitre nije pokušao objasniti podrijetlo izvornog atoma koji je prema njegovoj teoriji bio nalik golemoj nestabilnoj atomskoj jezgri koja se rascijepila ili raspala. Izvorni atom bilo je samo 30 puta veći od promjera Sunca.

Međutim, Einsteinove jednadžbe pokazuju odakle je stigao Lemaitreov izvorni atom. Premda je gustoća atomske jezgre – odnosno neutronske zvijezde, najveća gustoća u kojoj danas može postojati tvar, ako se još više sažme, urušit će se u točku i pritom pretvoriti u crnu rupu. Engleski matematičar i kozmolog Roger Penrose je 1964., pomoću Einsteinovih jednadžbi do-

kazao da će sva materija koja upadne u crnu rupu biti sabijena u jednu točku unutar nje. Ta točka beskonačno velike gustoće i ništičnog obujma nazvana je singularnost. To je Stephena Hawkinga potaknulo na razmišljanje, što bi bilo kad bi pustili da u Penroseovom modelu crne rupe vrijeme počne teći unatrag. Zaključio je da bi Penroseova singularnost mogla odgovarati Lemaitreovom izvornom atomu, koji je u određenom trenutku eksplodirao u obliku Velikog praska, izokrećući dinamiku crne rupe tj. izbacujući iz sebe materiju umjesto da je guta. Hawking i Penrose su 1970. objavili rad koji je matematički pokazao da je, ako su Einsteinove jednačbe u redu, svemir započeo iz singularnosti s Velikim praskom.

Prvi trenutak

Veliki prasak bio je početak svega: vremena, prostora i svih sastojaka tvari u svemiru. Prije Velikog praska – nije postojalo. Vrijeme i prostor oduvijek su nerazdvojno povezani u onome što je Albert Einstein nazvao prostorno vremenski kontinuum. Kad je nastalo vrijeme i prostor se mogao početi širiti. Isto tako, kad je stvoren prostor, moglo je početi teći i vrijeme.

Sam trenutak Velikog praska i kratak period od 10^{-43} sekundi nakon stvaranja, posve je prekriven velom tajni. Naime, Einsteinova opća teorija relativnosti, jedina opće prihvaćena teorija prostora i vremena, ne funkcionira za sustave manje od 10^{-35} metara – Planckova udaljenost i za događaje koji traju kraće od 10^{-43} sekundi – Planckovo vrijeme. Unutar Planckovog vremena (nazvanog po Maxu Plancku, jednom od osnivača kvantne mehanike) prostor i vrijeme gube značenje kakvo imaju u našem svakodnevnom životu. Osim toga u ovom sustavu trebalo bi u duhu kvantne mehanike opisati i gravitaciju. Međutim, unatoč osobitim naporima posljednjih desetljeća, fizičarima još uvijek nije uspjelo napraviti upotrebljivu kvantnu teoriju gravitacije. Sve dok ne budemo raspolagali odgovarajućom teorijom gravitacije sam trenutak stvaranja svemira i kratko razdoblje manje od Planckova vremena, ostat će izvan domašaja znanosti. Taj početni period svemira zovemo epoha kvantne gravitacije ili Planckova epoha.

U nastojanju da razviju teoriju kvantne gravitacije znanstvenici su iskušavali mnoge putove, a jedan od najpopularnijih u zadnjih dvadesetak godina je tzv. teorija struna (engl. *string theory*)

Ta teorija ima neobično svojstvo, neki bi ga mogli nazvati i manom, da pretpostavlja više od tri prostorne dimenzije, gdje su preostale dimenzije zaokružene u sebe a sve to na razini 10^{-35} metara.

Unutar tako sićušnih razmjera teorija predviđa tanane titrajuće strune koje različitim načinima i frekvencijama titranja tvore

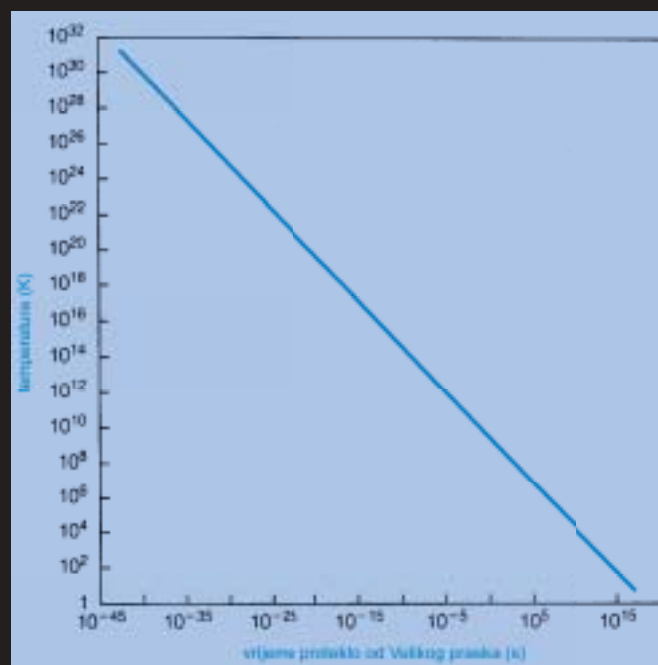
57 poznatih čestica (noviji broj). Tako struna koja titra na jedan način predstavlja elektron, na neki drugi način foton, a na neki treći način graviton. Da biste dobili predodžbu o usporedbi veličina, zamislite da je atom velik kao naš planetarni sustav. U toj usporedbi je jedna struna veličine atoma!

Zanimljivo je spomenuti da teorija supersitnih struna pretpostavlja najmanje devet prostornih dimenzija, od kojih šest nisu zamjetljive nama koji živimo u trodimenzionalnom svijetu. Te dodatne dimenzije čine teoriju struna izuzetno složenom. Fizičari se trude domoći dokaza o postojanju struna. Naznake drugih dimenzija možda bi se mogle nazrijeti za sudara čestica u golemim ubrzivačima čestica – akceleratorima – kad se na kraju obračunava energija. Ako je imalo nedostaje možda je iscurila u drugu dimenziju.

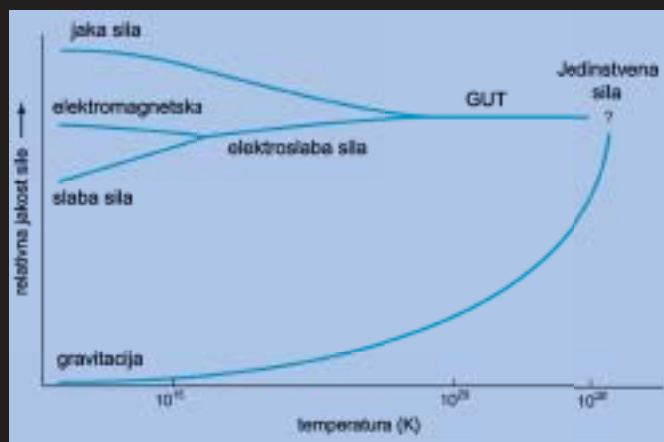
Temeljne sile

Na epohu kvantne gravitacije nastavlja se epoha velikog ujedinenja, od tog vremena kozmolozi mogu izračunati kako se svemir hladio (sl. 5.), a gustoća je padala sa sve većim širenjem prostora. Međutim, u ranom, vrućem svemiru, događala su se međudjelovanja koje ne možemo proizvesti u zemaljskim akceleratorima.

Poznato je da današnjim svemirom upravljaju četiri sile. Elektromagnetska sila upravlja elektricitetom i magnetizmom, slaba sila je odgovorna za radioaktivnost i cijepanje atoma, jaka sila



Slika 5. Svemir se hladi: grafikon prikazuje pad temperature od Velikog praska do sadašnjosti (10^{10} godina iznosi približno $3 \cdot 10^{17}$ sekundi).



Slika 6. U početku su četiri osnovne prirodne sile bile ujedinjene u jedinstvenu supersilu.

lijepi jezgre atoma, te gravitacija koja drži zvijezde i planete u putanjama. Većina teoretičara vjeruje da su u početku stvaranja svemira ove četiri sile bile ujedinjene u jedinstvenu »supersilu« ali su se širenjem i hlađenjem svemira jedna po jedna razdvajale (sl. 6).

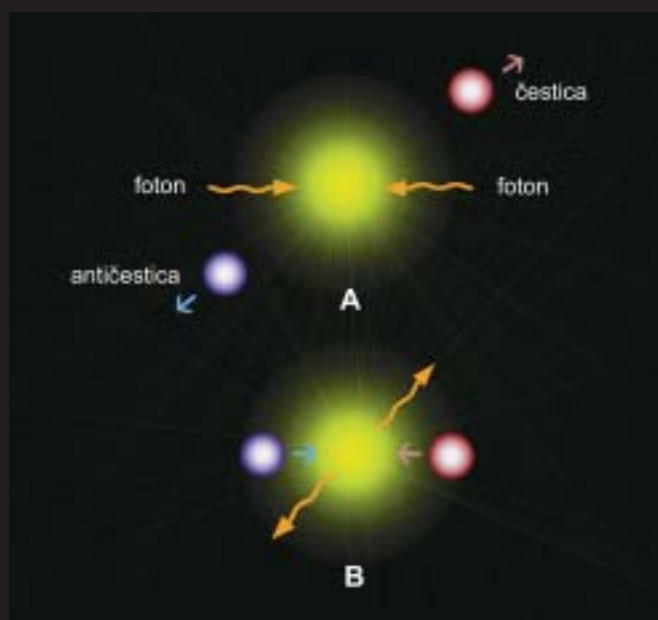
Oko 10^{-38} sekundi nakon nastanka svemira, pri temperaturi od 10^{29} K, bile su još ujedinjene jaka, slaba i elektromagnetska sila (gravitacijska sila razdvojila se u kvantnoj epohi) – to je tzv. veliko ujedinjenje. Teorije koje predviđaju ujedinjenje elektroslabe i jake sile nazvane su velikim ujedinjenim teorijama, na engleskome *Grand Unified Theories* (skraćeno GUTs). Akceleratori čestica su nam omogućili detaljno izučavanje ujedinjene elektroslabe sile (elektromagnetska i slaba sila). Tijekom 1970-ih u teoriju ujedinjene sile donekle se uspjela uklopiti i jaka sila. Ključno je u tome što se pri vrlo visokim energijama, odnosno temperaturama, ne može jednu silu razlikovati od druge.

Doba vladavine GUT sile trajalo je nevjerojatno mali djelić sekunde. Pri temperaturi od 10^{27} K i starosti svemira od 10^{-35} sekundi, jaka sila odvaja se od preostale dvije koje još uvijek zajedno tvore elektroslabu silu. Kad se razdvojila jaka sila, stvorena je golema količina energije koja je pogonila tzv. kozmičku inflaciju, tijekom koje se svemir ubrzano širi te naglo postaje vrlo velik i ravan. Svemir je u vremenu manjem od 10^{-33} sekundi narastao od veličine protona (10^{-15} m) do kugle čija je veličina deset milijuna promjera Sunčevog sustava. Što znači da veličinu udvostručuje svakih 10 bilijardi trilijuntinki sekunde! Proučavajući podrijetlo temeljnih sila, teoriju kozmičke inflacije zamislio je američki fizičar i kozmolog Alan Guth 1979. godine.

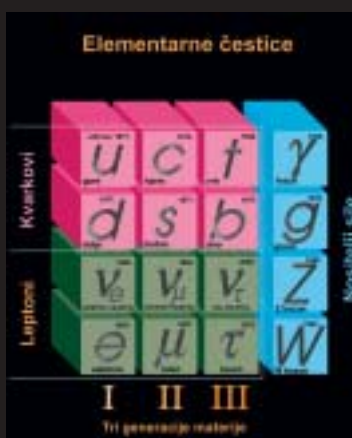
Svemir se u epohi elektroslabe sile i dalje širio, pa mu je temperatura padala. Pri temperaturi 10^{15} K i 10^{-10} sekundi starosti svemira razdvajaju se elektromagnetska i slaba sila.

Kvarkovi i leptoni

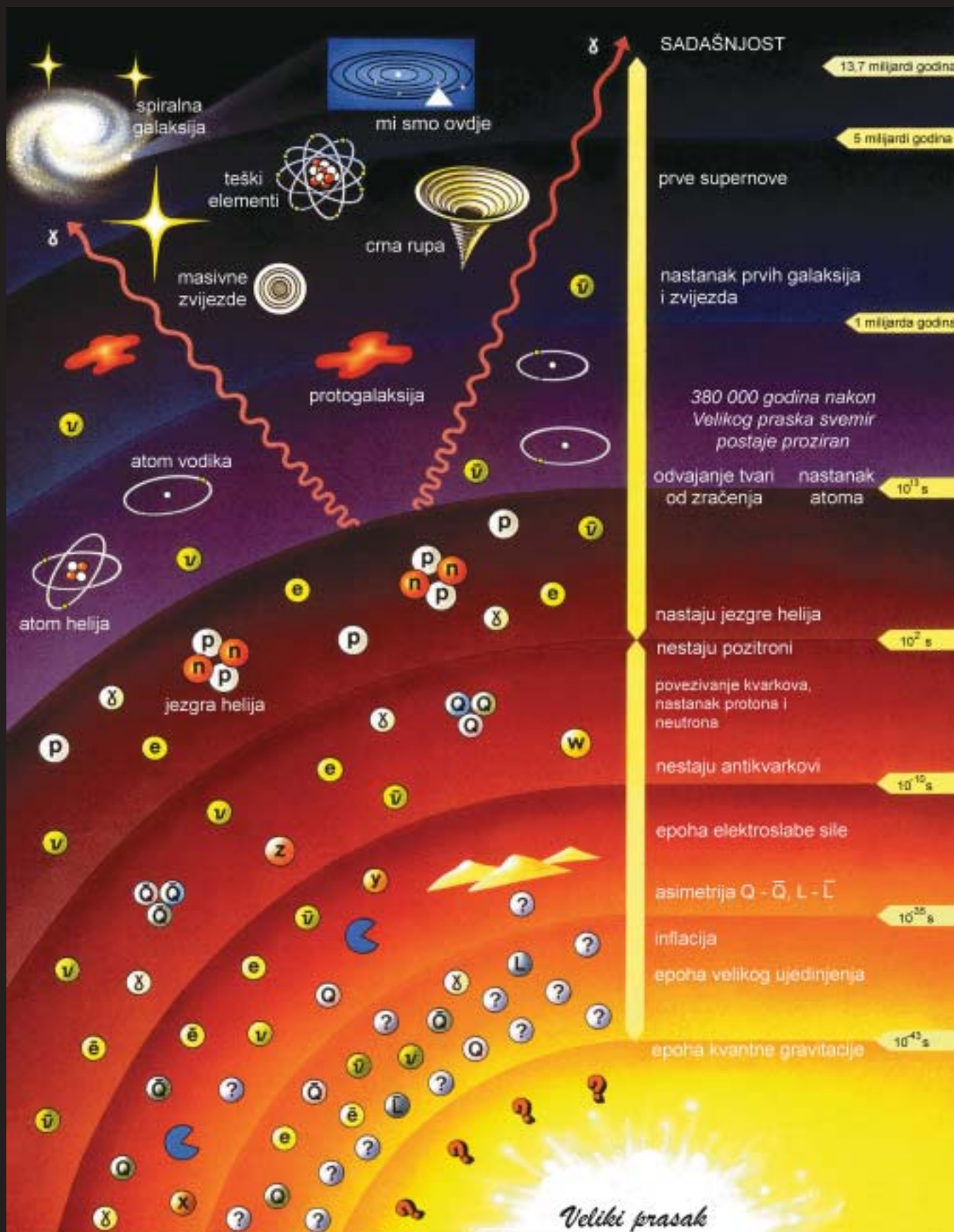
Energija Velikog praska stvorila je parove čestica – jedne materijske i jedne antimaterijske koje su spontano nastajale i nestajale (sl. 7). U trenutku kad je svemir nastao, temperatura je bila toliko visoka da su se fotoni mogli pretvarati u tvar a ona ponovo u fotone u skladu s Einsteinovom jednadžbom $E = m c^2$. Rani svemir bio je pun subatomske čestice (sl. 8). Prema teoriji u ranom svemiru mogle su nastati i egzotične masivne čestice poput X-bozona, Higgsovih bozona (vrlo teška čestica čije je postojanje još 1964. predložio škotski fizičar Peter Higgs) i WIMP-ova. Već u vrijeme kozmičke inflacije nastaje neznatna asimetrija između materije i antimaterije. U kasnijim epohama će se materija i antimaterija međusobno poništiti, anihilirati, ali mali prečišćak materije nad antimaterijom koji je ostao netaknut stvoriti će danas poznati svemir (taj se proces zove bariogeneza).



Slika 7. U mladom svemiru materija i antimaterija su se spontano stvarale i anihilacijom uništavale. Energija elektromagnetskog zračenja stvara parove čestica i antičestica (A), one se gotovo trenutačno anihiliraju pri čemu se oslobađa jako zračenje (B).



Slika 8. Građevni blokovi materije. Standardni model fizike čestica sastoji je od relativno malog broja osnovnih čestica. To su kvarkovi podijeljeni u tri generacije od kojih svaka sadrži po dvije čestice. Na sličan način podijeljeni su i leptoni. Kvarkovi i leptoni su fermioni, a u silama između njih posreduju virtualne čestice koje se nazivaju fotonima (prenose elektromagnetsku silu), gluonima (prenose jaku silu) i prenositeljima slabe sile W – i Z – bozonima.



Slika 9. Povijest materije i zračenja u svemiru. Sva materija, što je danas vidimo, a od koje su nastale sve zvijezde i galaksije, stvorena je u prvim minutama nakon Velikog praska.

Razlog zbog kojeg se materija i antimaterija nisu posve anihilirale odmah čim su bile stvorene, ostavljajući za sobom prazni svemir, možda je zasluga hipotetskog X-bozona. To su bile najmasivnije čestice koje su mogle nastati uslijed velike inflacijske energije. Hlađenjem svemira ove čestice su postale nestabilne pa su se raspale u lakše kvarkove i leptone. S obzirom da se pojavljuju u tri različite generacije kvarkovi brojčano prevladavaju u plazmi kvarkova i leptona.

Na otprilike 10^{-5} sekundi od početka vremena postalo je odjednom prehladno da bi kvarkovi mogli postojati odvojeni jedni od drugih pa su se povezali u trojke i nastali su hadroni: protoni i neutroni (sl. 9). Kad temperatura padne ispod 10^{11} K protoni se ubrajaju u materiju, dok se skoro 2000 puta lakši elektroni u vrućoj zgusnutoj plazmi ponašaju kao zračenje, pa uz fotone i neutrine, daju svoj doprinos termičkoj ravnoteži. Zbog takva sudioništva elektrona i neutrina koji su leptoni, ta se epoha naziva leptonskom.

U ovoj energetske kupelji na svaku milijardu fotona, elektrona ili neutrina, dolazi tek jedan nukleon odnosno proton ili neutron. Protoni i neutroni u početku slobodno prelaze jedni u druge pa ih ima isti broj, no kako se svemir brzo širi i hladi, prevladaju pretvorbe težih neutrona u lakše protone pri čemu se oslobađa energija. Kad je uspostavljena ravnoteža među ovim pretvorbama, na svaki je neutron dolazilo po sedam protona.

Po prilici jednu sekundu nakon početka vremena, svemir se ohladio na 10^{10} K, njegova gustoća se toliko smanjila da se termička ravnoteža više nije mogla održavati slabo međudjelujućim česticama – neutrinima. Sada sve veći broj pozitronskih i elektronskih parova međusobno anihilira i prelazi u fotone.

Svemirom je zavladao zračenje, tako da je dolazilo po prilici milijardu elektromagnetskih fotona na svaki proton, neutron ili elektron.

Ono što se dogodilo s česticama materije kroz tih prvih nekoliko minuta vladanja zračenja osobito je važno za nas, jer su se u tom razdoblju počeli udruživati protoni i neutroni i tako formirati jezgre helija. Bio je to postupni proces.

Stvaranje atoma i prvo svjetlo

Oko 13,8 sekundi nakon Velikog praska neutroni s protonima mogli su se privremeno povezati u jezgre atoma deuterija. Deuterij je slabo povezana jezgra koja se u kaosu, kakav je vladao u svemiru u njegovim najranijim fazama, raspadala čim bi bila stvorena. Međutim, kada je svemir bio star oko tri minute, temperatura je pala na 10^9 K i deuterij je mogao ostati na životu dovoljno dugo da bi se spojio s dodatnim česticama, te tako

stvorio vrlo stabilnu jezgru helija što se sastoji od dva protona i dva neutrona. Taj se proces naziva prvotna nukleosinteza. Temperatura i gustoća svemira brzo su pali ispod razine potrebne za tu prvotnu nuklearnu fuziju, pa je već u 3 minute i 46 sekundi nakon početka vremena prestalo dalje stvaranje elemenata. U tom kratkom vremenu svemir je uspio otprilike četvrtinu vodikovih jezgri (protoni) pretvoriti u helij i tek vrlo mali dio u deuterij i litij.

Poslije prve četiri mahnite minute, kad su stvorene atomske jezgre, svemir se smirio. Tvar u svemiru bila je sazdana uglavnom od vruće plazme vodikovih i helijevih atoma te slobodnih elektrona. Zbog širenja svemir je postajao sve rjeđi. Daljnji postupni pad temperature usporio je elektrone tako da su se počeli spajati s atomskim jezgrama i stvorili prve atome. Naime, negativno nabijeni elektroni toliko su se usporili da su ih pozitivno nabijene jezgre mogle privući i prisiliti na kruženje. Međutim, moralo je proći oko 380 000 godina dok se mladi svemir dovoljno ohladio (na temperaturu 3000 K) da se elektroni povežu s jezgrama vodika i helija i naprave atome. Na kraju tog razdoblja, oko 23 posto tih atoma bili su atomi helija, a od 77 posto napravljen je vodik, drugi kemijski elementi nastat će mnogo kasnije u zvijezdama. Ako izuzmemo male količine koju su zvijezde pretvorile u teže elemente, omjer između vodika i helija u barionskoj tvari se od tada nije značajnije promijenio.

S obzirom da su se elektroni priljubili uz jezgre vodika i helija, svemir sada postaje proziran za fotone i svjetlost Velikog praska se mogla nesmetano širiti. U ranom svemiru fotoni svjetlosti stalno su se sudarali s atomskim jezgrama i elektronima tako da nisu mogli prevaliti veće udaljenosti između sudara. Foton bi se odbio od jedne čestice, potom od druge, zatim od treće i svjetlost se nije mogla kretati ravno, pa je svemir bio neproziran. Zbog istog razloga ne možemo vidjeti u unutrašnjost Sunca.

Površina posljednjeg raspršenja, stvorena 380 000 godina poslije Velikog praska, je granica koja razdvaja neprozirni svemir od prozirnoga. Iza te granice ne možemo ništa razlučiti, ni izgled ni građu tvari. To možemo zamisliti kao da je sve obavijeno nekom gustom vrućom maglom, skriveno iza neprozirne ko-prene. Dakle, koliko god snažni naši teleskopi postali dalje od »površine posljednjeg raspršenja« nastale oko 380 000 godina od Velikog praska nećemo moći doprijeti.

Toplinsko zračenje koje stiže s ove »površine« uslijed širenja svemira, do danas ohlađeno je na 2,73 K i predstavlja tzv. kozmičko pozadinsko mikrovalno zračenje koje su još 1965. godine slučajno otkrili fizičari Arno Penzias i Robert Wilson (sl. 10.). To slabo pozadinsko zračenje prostora još je 1948. godine, rabeći teoriju Velikog praska, predvidio ukrajinsko-američki fizičar i kozmolog George Gamow s kolegama.



Slika 10. Rog–antena u Holmdelu (New Jersey) kojom su Arno Penzias i Robert Wilson 1965. otkrili slabašno pozadinsko zračenje. Ta čudna mikrovalna antena izvorno je bio namijenjena pokusima za satelitsko prenošenje TV signala preko Atlantika. Snimka: Bell Telephone Laboratories.

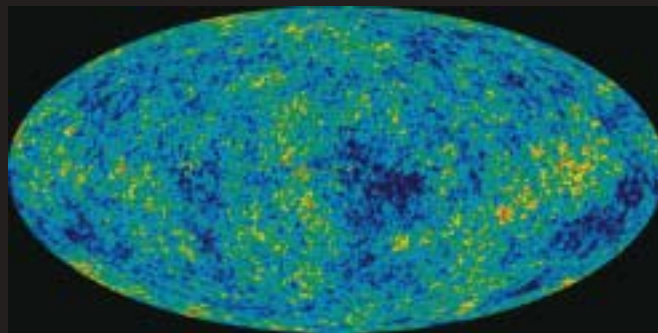
Iznimna ravnomjernost hladnoga pozadinskog zračenja na svim dijelovima neba, potvrđuje pretpostavku kozmologa da je svemir jednak u svim smjerovima te da zapravo mjerimo toplinu samog svemira, a ne zračenje velikog broja dalekih tijela. Materija i elektromagnetsko zračenje bili su neraskidivo vezani sve do trenutka prvog svjetla.

Svjetlost s površine posljednjeg raspršenja snimio je 1992. godine satelit COBE (Cosmic Background Explorer). Višestruko detaljnije snimke pozadinskog zračenja je 2003. godine načinio satelit WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe).

Rađanje galaksija i prvih zvijezda

Nakon što je postao proziran, svemir je prije početka paljenja prvih zvijezda prošao kroz dugo razdoblje tame. Zasljepljujuća svjetlost Velikog praska pretvorila se najprije u nevidljivo infracrveno a potom u pozadinsko radiozračenje, preostala hladna i tamna tvar bila je nesposobna da stvori svjetlost. Milijardu godina nakon Velikog praska temperatura je pala na 18 K. Početne nehomogenosti koje su se pojavile još u prvim trenucima nastanka svemira, iako vrlo male, prouzročile su grupiranje tvari u nakupine – preteče protogalaksija. Nakupine tamne tvari, vjerojatno sastavljene od subatomske čestice poput WIMP-ova i neutrina, gravitacijom privlače oblake vodikovog i helijevog plina u mrežu vlakana te tako stvaraju zamatke galaksija.

Višegodišnjim mjerenjima pomoću satelita COBE i WMAP, u pozadinskom zračenju uočena su neznatne temperaturne razlike uzrokovane nakupljanjem tamne tvari. Plava područja na



Slika 11. Snimka neba u području mikrovalnog zračenja dobivena sa satelita WMAP prikazuju svemir star samo 380 000 godina. Plava, neznatno hladnija područja su nakupine tamne tvari koje predstavljaju »zamatke« budućih galaksija. Snimke: COBE/WMAP/NASA.

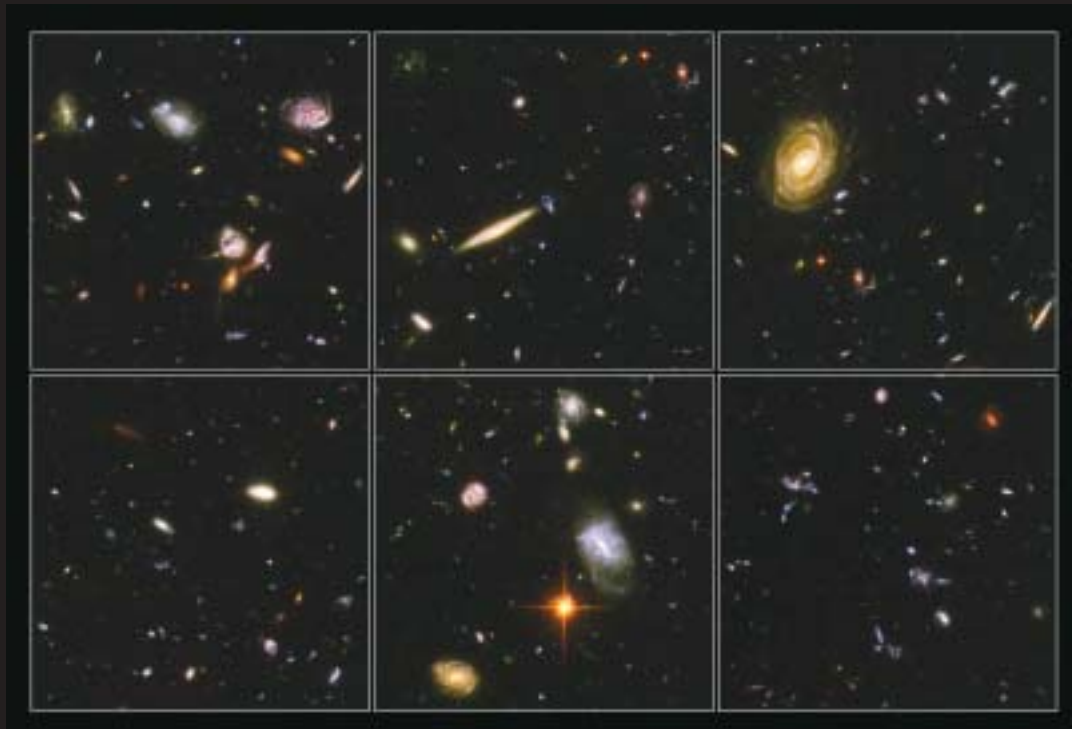
WMAP-ovoj nebeskoj karti (sl. 11.) hladnija su mjesta od jake gravitacije. To su zapravo nakupine tamne tvari koje predstavljaju »zamatke« budućih galaksija.

Svemirski teleskop *Hubble* pokazuje da većina galaksija nastaje sudaranjem oblaka plina (sl. 12.). Ako oblaci kruže jedan oko drugog novonastala će galaksija biti vrteća spiralna poput naše. Kad se oblaci ne vrte, sav se njihov plin pretvara u zvijezde i stvara kuglu zvijezda bez plina – eliptičnu galaksiju. Privučene tamnom materijom galaksije se skupljaju u filamente, s golemim praznim prostorom između njih zbog čega današnji svemir ima spužvastu strukturu.

Sažimanjem plina u galaksijama zapaljen je prvi naraštaj zvijezda tzv. III. populacije, od kojih one najmasivnije vrlo brzo eksplodiraju kao supernove. Svemir se nastavlja hladiti sve do današnje temperature od 2,73 K. U jezgrama prvih zvijezda, koje su se u potpunosti sastojale od vodika i helija, plinova iz Velikog praska, nukleosintezom stvaraju se teže atomske jezgre poput ugljika i kisika. Novi elementi stvoreni u zvijezdama, raspršuju se svemirom zvjezdanim vjetrovima i eksplozijama supernova, čineći osnovu za nove naraštaje zvijezda i njihove planetarne sustave. Ako su prisutni pogodni uvjeti, na nekom od tih planeta može nastati i živa tvar; na kraju pojavila su se i ljudska bića – samo jedan od izvanrednih proizvoda razvoja iz zvjezdane prašine. Nakon otprilike 13,7 milijarda godina razvoja, svemir je postao svijet kakvog gledamo oko sebe. Galaksije se stvaraju i danas, male galaksije i oblaci plina stvaraju veće galaksije. Ponekad se veća galaksija sudari i stopi s manjom galaksijom.

Model stalnog stanja

Kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje – ohlađeno zračenje zaostalo iz vremena ranog svemira, Hubbleov zakon o širenju svemira, omjer lakih elemenata, radiogalaksije i kvazari razlozi



Slika 12. Pogled u najdublji svemir: na ovim fotografijama snimljenim Hubbleovim svemirskim teleskopom tijekom 2003. i 2004. godine vidimo galaksije kako su izgledale prije 13 milijardi godina, dakle samo 700 milijuna godina nakon Velikog praska. Snimka: HST/NASA/ESA.

su zašto većina kozmologa danas prihvaća model Velikog praska, a ne suparnički model stalnoga stanja.

Engleski astrofizičar Fred Hoyle i njegovi istomišljenici Tommy Gold i Herman Bondi predložili su 1940-ih teoriju koja objašnjava širenje svemira bez potrebe za postojanjem Velikog praska. Istakli su da ako šireći prostorvrijeme stvara nove atome vodika brzinom od samo jednoga novog atoma u prostoru od 10 milijarda prostornih metara svemira na godinu, dobilo bi se dovoljno atoma za ispunjavanje razmaka nastalih razmicanjem galaksija. Prema tome svemir je uvijek bio isti i uvijek će ostati isti, nije imao početak ni kraj.

Suparništvo između modela Velikog praska i stalnoga stanja poticalo je astronome na podrobno proučavanje. Teorija stalnoga stanja najprije je imala problema s brojnim slabim izvorima radiovalova, koje je poboljšana tehnika radioastronoma pronalazila u sve većem broju. Utvrđeno je da se jači izvori nalaze na većim udaljenostima od slabijih. Gledajući sve dublje u svemir mi zapravo gledamo sve dalje u prošlost, pa ovo otkriće ukazuje na evoluciju radiogalaksija od jačih prema slabijim izvorima. Upravo se teorija Velikog praska zasniva na ideji da se svemir s vremenom mijenja te da se, prema tome, ne nalazi u stalnom stanju. Nedugo zatim Penzias i Wilson otkrili su mikrovalno zračenje pozadine neba koje se nije, osim pretpostavkom o Velikom prasku, nikako drukčije moglo objasniti, pa su teoriju nepromijenjenog stanja 1965. godine počeli polako napuštati pristaše.

Nadalje, proračuni prvotne nukleosinteze predviđaju da bi se »pepeo« Velikog praska, lakih elemenata stvorenih u prve četi-

ri minute, trebao sastojati od 77 posto vodika, 23 posto helija, i tek 0,0000001 posto litija. Analize oblaka međuzvjezdanog plina kakve opažamo u našoj i drugim galaksijama odgovaraju tim omjerima.

Prisutnost izotopa vodika – deuterija, u međuzvjezdanoj tvari koja još nije prošla kroz ciklus života neke zvijezde još je jedan dokaz da su laki elementi nastali neposredno nakon Velikog praska. Naime, deuterij je iznimno »krhka« čestica koja ne može nastati u nuklearnim reakcijama u jezgrama zvijezda, već se tamo samo razara.

I naposljetku, višegodišnjim mjerenjima pomoću satelita COBE i WMAP, uočena su neznatna temperaturna odstupanja (malo manja od 0,0001 K) u temperaturi pozadinskog zračenja koja su omogućila nastanak galaksija.

Još uvijek je mnogo ljudi koji odbijaju povjerovati u teoriju Velikog praska: no kad složimo zajedno sve činjenice i dokaze fizike vrlo velikoga i fizike vrlo maloga, teško je složiti nešto što bi bilo bolje od toga. Gotovo je nemoguće zamisliti objašnjenje za golemost i složenost svega oko nas, a koje bi sadržavalo više ljepote, strahopoštovanja i istinitosti. Pa ipak, prisjetimo se da su kozmolozi morali već nekoliko puta u prošlosti (nakon Galilejevih otkrića, Hubbleovih) vrlo korjenito preraditi svoje zamisli. Svi objekti u svemiru, zvijezde, galaksije, planeti, maglice, samo su mali dio onoga što u njemu postoji. Čak 95 posto svega u svemiru je nama skoro posve nepoznato a postojeći dokazi u prilog onome što nazivamo Veliki prasak utemeljeni su na proučavanju svemira kojeg vidimo.