

MODERNA KOZMOLOGIJA - trijumf i izazov fizike

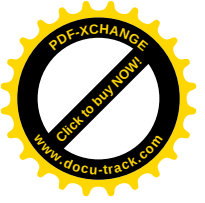
I. Picek, PMF, Zagreb

Ulaskom u novi milenij počela su obilježavanja velikih teorija s kraja prethodnog tisućljeća. Jedna od njih je kvantna mehanika, kojom je trajno obilježeno prethodno stoljeće. Prije točno pet godina na ovom istom mjestu održan je skup posvećen stogodišnjici Planckovog otkrića kvanta, a moje predavanje pod naslovom „Kvantna fizika i astrofizika“ [1] prethodnica je i najava današnjeg. Naime, već je u njemu istaknut spoj kvantne fizike i specijalne teorije relativnosti, kao „moderne reinkarnacije“ kvantne mehanike. Riječ je o relativističkoj kvantnoj mehanici, koja se najprije proslavila kroz formulaciju kvantne elektrodinamike (QED), da bi u konačnosti dovela do *standardnog modela elementarnih čestica i svih poznatih temeljnih sila* (osim gravitacije, koja je na dimenzijama elementarnih čestica potpuno zanemariva).

Današnji skup posvećen je Svjetskoj godini fizike, kojom obilježavamo stogodišnjicu Einsteinovih radova iz 1905. godine, poglavito uvođenje Einsteinove specijalne teorije relativnosti. I moje današnje predavanje, koje se bavi prožimanjem kvantne fizike i teorije relativnosti (dakle prožimanjem zasebnih tema dvaju prethodnih predavanja), od početka je fokusirano na svemir, a time i na „preostalu“ *gravitacijsku silu*, koja dominira na svemirskim dimenzijama. U tom području fizike svjedoci smo sjajnog uspjeha modernog, *standardnog kozmološkog modela*, uvedenog na tragu Einsteinove opće teorije relativnosti kao općeprihvaćene teorije gravitacije.

Uspješan radni opis kako temeljne fizike tako i kozmologije, putem dvaju *standardnih modela*, jednog koji se odnosi na opis najmanjih i drugog koji se odnosi na opis najvećih dimenzija, trebalo bi još upotpuniti odgovarajućim standardiziranjem zakona fizike koje bi vodilo na jednako uspješan radni opis kompleksnih struktura iz domene kemije i biologije, a onda i (inteligentnih) oblika života.

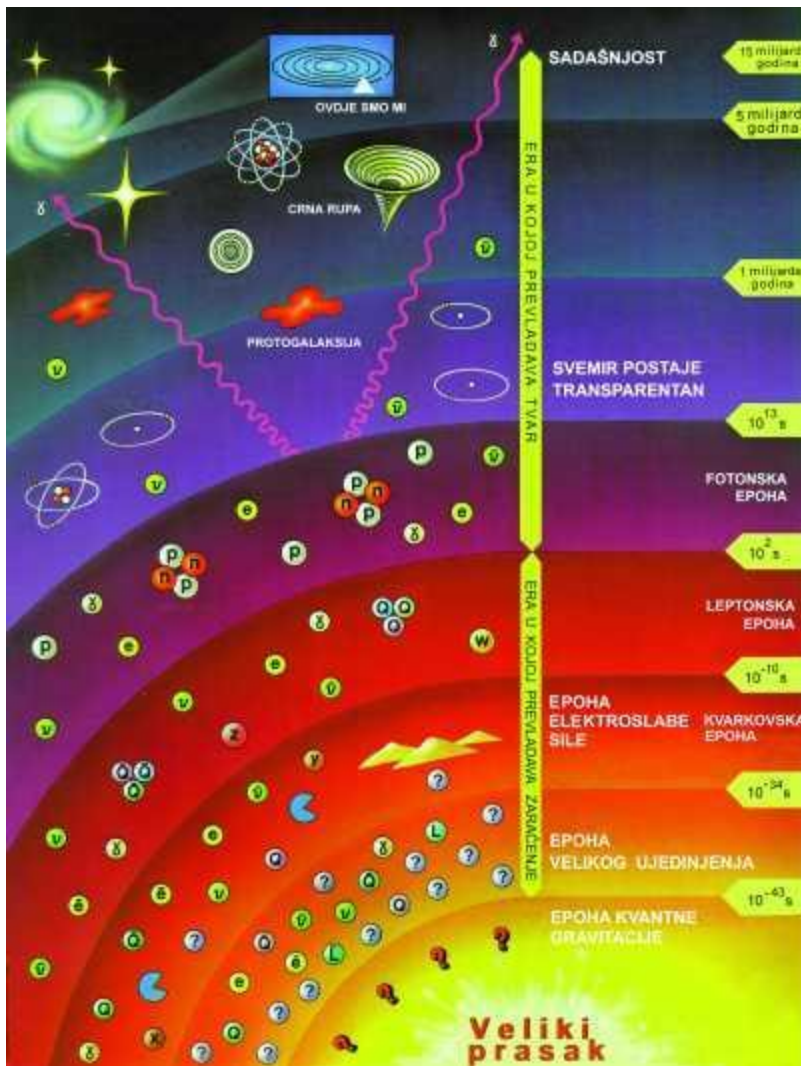
Današnja usporedba postojećeg standardnog modela čestica i sila te standardnog kozmološkog modela suočava se s finim podešavanjem parametara na kojima se temelje ti modeli. Činjenica da bez takve „urote parametara“ nisu mogući niti zamislivi oblici života, izazov je objašnjenjima života koja se temelje na načelu selekcije



(„bez varijacije nema selekcije“ [2]). To nudi i neke potpuno nove odgovore na pitanje o inteligentnim oblicima života u svemiru.

I SPOZNAJA GALAKTIČKOG SVEMIRA

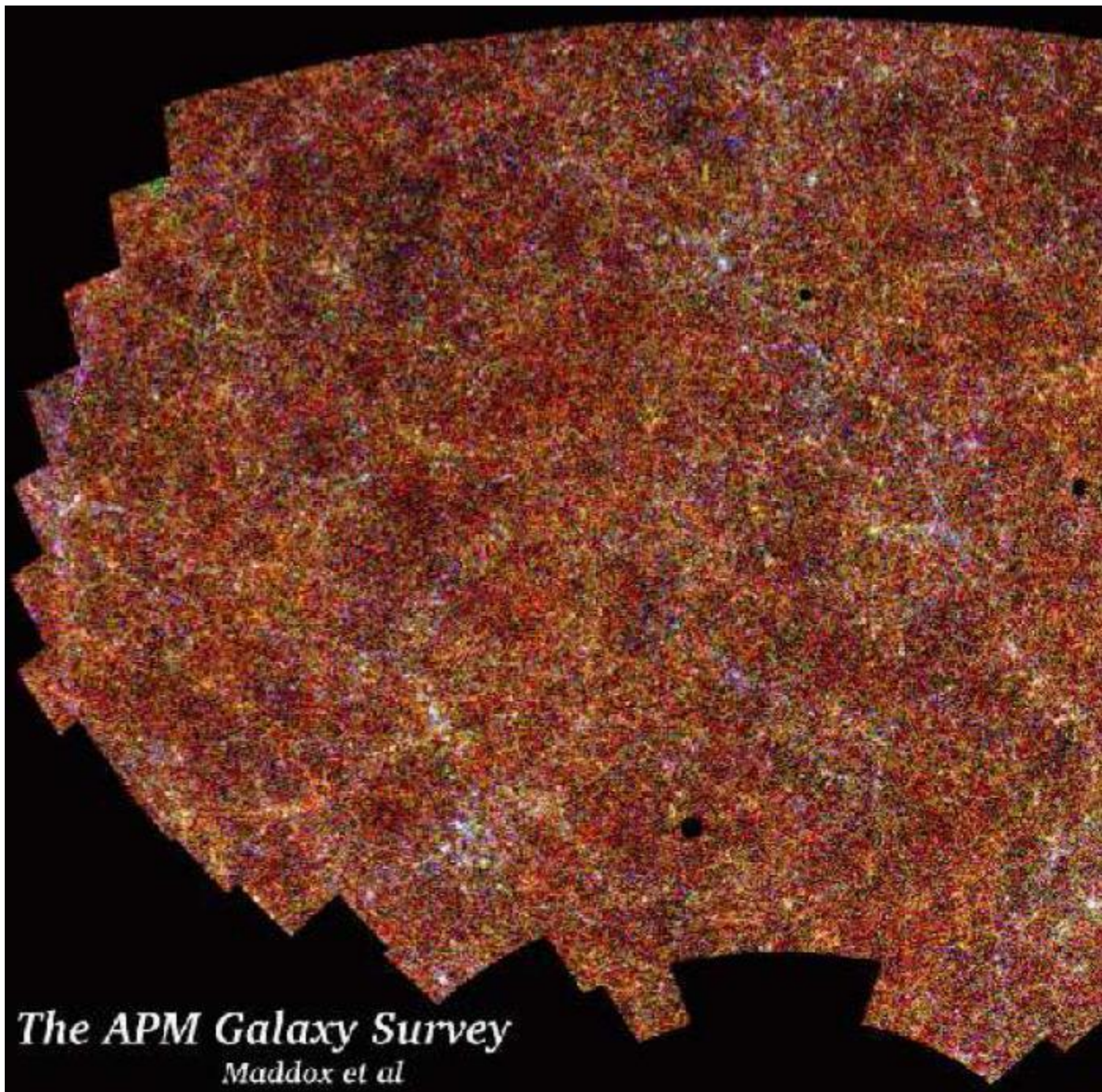
U svakoj povijesnoj epohi i svakoj civilizaciji vladalo je uvjerenje kako je baš u njoj, ako ništa drugo, onda barem postignuto razumijevanje svemira. Budući da su s našeg gledišta ta prijašnja razumijevanja naivna, pitamo se nismo li i sami upali u zamku samozadovoljstva, da smo baš mi dosegli konačne odgovore. Ipak, izvjesno pravo na „aroganciju“ daju nam moćne tehnike moderne „svemirske arheologije“, nedostupne prethodnim naraštajima. To da odgovore ipak tražimo u prošlosti nije vezano uz strast antikvara da bi se „starom“ posvetili zbog same starine, već zbog činjenjenice da nam dublji pogled na nebeski svod otkriva jedinstveni svemirski pokus započet na početku stvaranja svemira. (Slika 1).



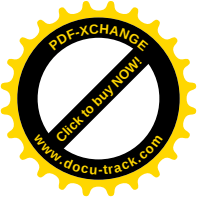
Slika 1: Nalazimo se u svemiru ohlađenom nakon velikog praska, na mjestu gdje je život omogućen prosječnom zvijezdom prosječne galaktike

Svemir rođen u velikom prasku raspršen je do svemirske praznine tek neznatno kontaminirane materijom u obliku galaktika i galaktičkih jata [3]. Mi smo stanovnici jedne od tih galaktika, Mliječne staze, čiji je disk jasno vidljiv za vedrih noći. Pažljivijim promatranjem uočavaju se i zvijezda i periodična ponavljanja, koja su u prošlosti poticala izučavanje vidljivog svemira. Prošlo stoljeće je donijelo neviđene mogućnosti sagledavanja potpuno novih, prostom oku ali i vidljivoj svjetlosti nedostupnih uzoraka (engl. *patterns*), na temelju kojih sve pouzdanije zaključujemo o našem mjestu u svemiru. Nalazimo se uz prosječnu zvijezdu između stotinu

milijardi njih u našoj galaktici, koja je pak prosječna među stotinjak milijardi galaktika našeg svemira (Slika 2).



Slika 2: Primjer galaktičkog ispitivanja APM (Authomatic Plate Measuring Machine) iz 1990, koje je rezultiralo katalogom s više milijuna galaktika

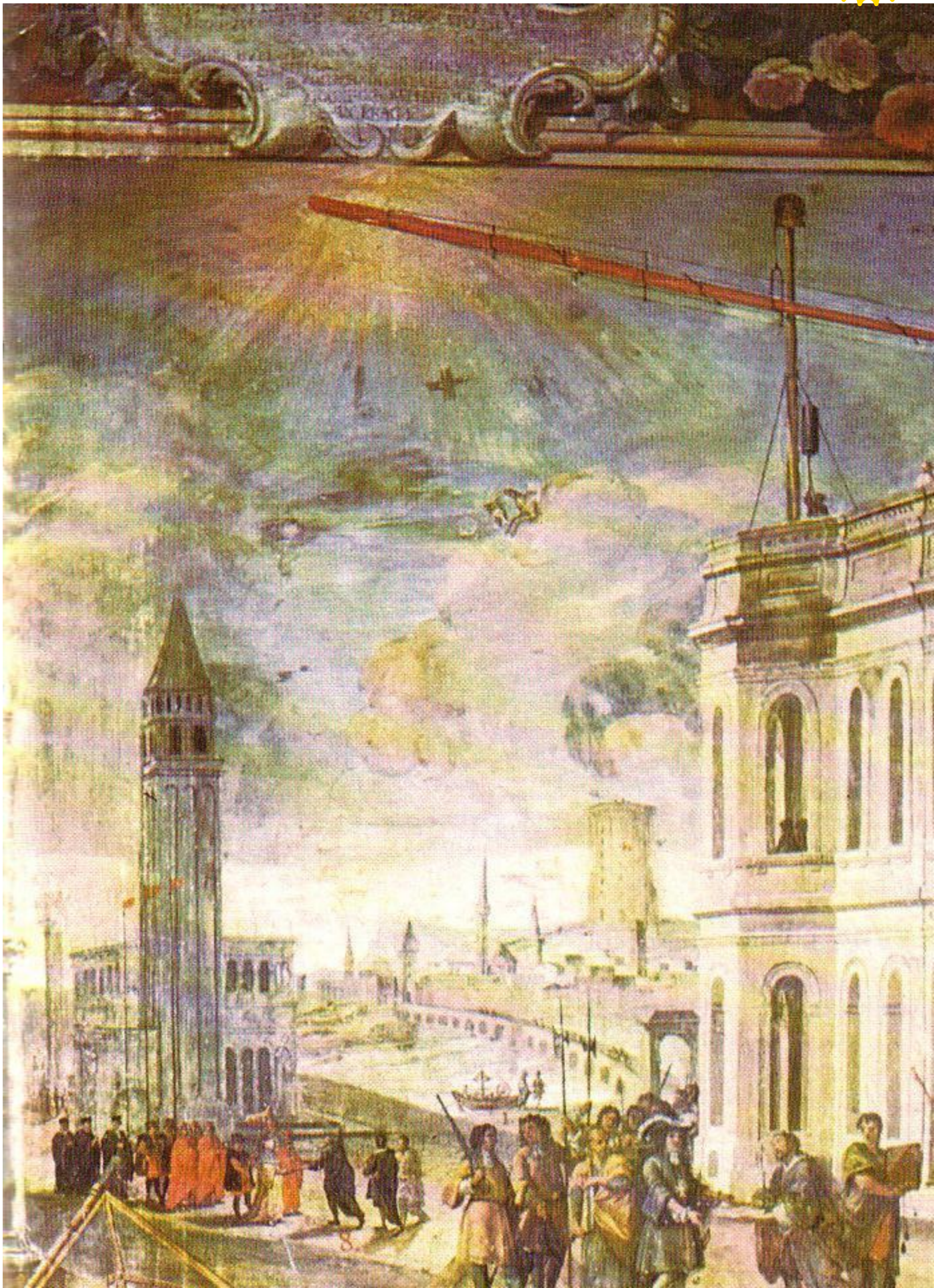


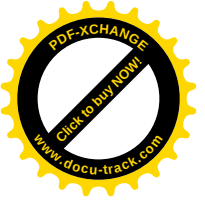
Ova spoznaja dopunjena je najnovijim kozmološkim mjerenjima na razmeđu tisućljeća, koja potvrđuju da je naš **položaj u kozmičkom prostoru** “**prosjek prosjeka**”, ali je sam naš trenutak u kozmičkom vremenu **izuzetno specijalan!**

Dosizanje ovakve slike praćeno je slijedom obrata u pokušajima razumijevanja prirode i zakona kojima se ona povinjuje. U ovom ćemo predavanju pokušati izdvojiti najznačajnije takve obrate, *izazove i trijumfe* koji su vodili do spoznaja objedinjenih u modernoj kozmologiji.

I.1 PRVI SPOZNAJNI OBRATI

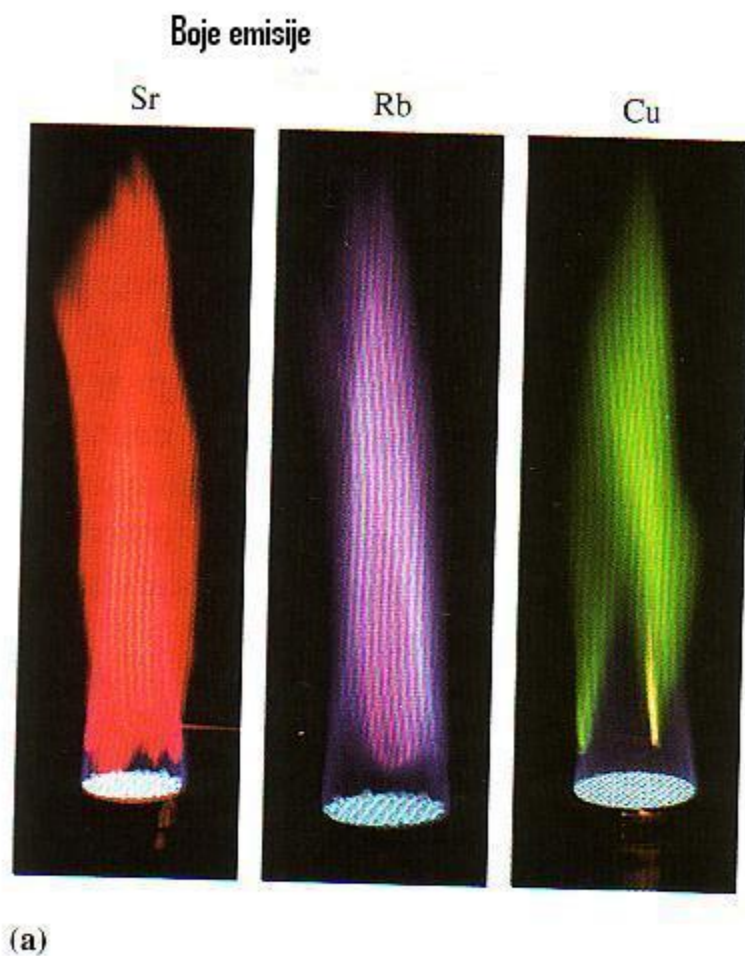
Prvi spoznajni obrati odnose se na naše razumijevanje same svjetlosti, na kojoj se temelji iskustvo o svemiru koje stječemo kao njegovi *promatrači*. Nije tome davno kako je Descartes ustvrdio da se svjetlost mora širiti trenutno, neizmjernom brzinom, jer bismo u suprotnom mogli gledati u prošlost! No upravo se na toj činjenici i na izmjerenoj *konačnoj vrijednosti brzine svjetlosti, c* , temelji današnje razumijevanje svemira. Pogled kroz teleskop je pogled upućen u prošlost! Flandrijskoj igrački, teleskopu, Galileo je nesvjesno namijenio ulogu prvog vremenskog stroja (Slika 3).



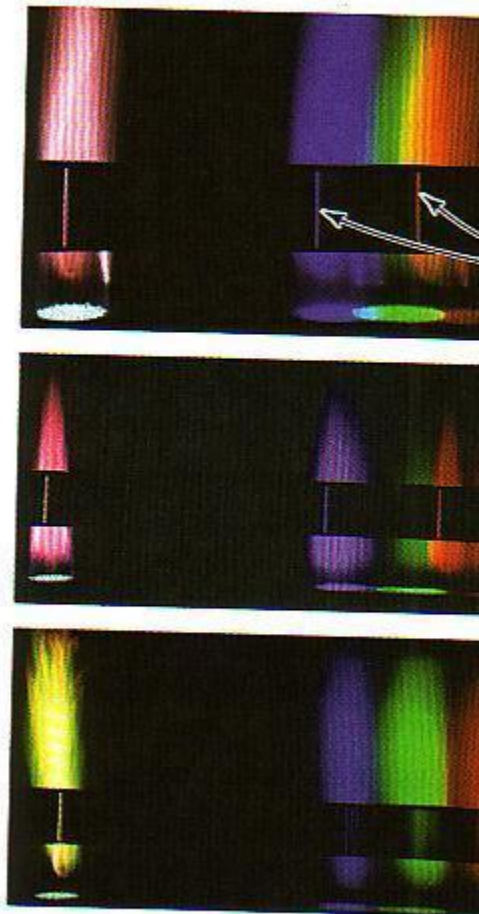


**Slika 3: Pogled kroz teleskop je pogled u prošlost.
Prikaz Galilejeve demonstracije teleskopskih opažanja
(freska Umberto Galeasi, Rim)**

Obrat se dogodio i u shvaćanju granica do kojih možemo doprijeti našim pogledom kroz svemir. On je vezan uz nastupanje ere spektroskopije u fizici. Riječ je o otkriću karakterističnih spektralnih linija koje emitiraju kemijski elementi i na taj način ostavljaju svoj potpis, ma gdje da se nalazili u svemiru. Na njezinom udaru odmah se našla tada poznata kategorička tvrdnja francuskog filozofa Augustea Comtea iz 1835. godine, prema kojoj sastav zvijezda (primjerice Sunca) spada među informacije koje će ostati izvan domašaja znanstvene provjere. Prisutnost natrija u Suncu bila je očigledna Gustavu Kirchhoffu nakon spoznaje da tamna spektralna linija, koju je Fraunhofer opazio u spektru Sunca, mora poticati od apsorpcije u natrijevim parama koje su prisutne u Sunčevoj atmosferi. Era spektroskopije otvorila je novi pogled u okolni svemir. Kirchhoffova spektralna analiza je pokazala da su *isti kemijski elementi prisutni i na nebu i na Zemlji* (Slika 4).



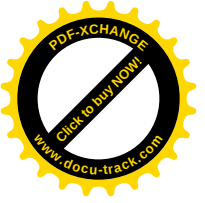
Spektralna analiza



(b)

Slika 4: Iste kemijske elemente naći ćemo i na nebu i na Zemlji. Spektralnu analizu ustanovio je G. Kirchoff (1860. god.)

Što se tiče unutrašnjosti Sunca, o njenom sastavu nećemo doznati izravno putem svjetlosti. Naime, sama svjetlost ne prodire u plazmu električki nabijenih čestica, tako da površina Sunca za nju predstavlja zid neprozirnosti. Danas sličan zid neprozirnosti nalazimo i u „vrlo udaljenom“ (dakle i mladom, *ranom svemiru* prikazanom na Sl. 1) koji je također u stanju vruće plazme nabijenih čestica. Moderna kozmologija nalazi načine da se premosti i taj zid neprozirnosti.



Razumijevanje same unutrašnjosti zvijezda, posebno *kompaktnih objekata* [1], zasebno je poglavlje koje obiluje obratima u razumijevanju opaženih činjenica. Neke od tih činjenica izgledale su tako apsurdnima da su sugerirale kako su zvijezde laboratorij u kojemu više ne vrijede zakoni kvantne mehanike.

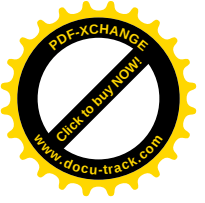
I.2 PREKRETNICA UNEŠENA EINSTEINOVIM RADOVIMA

iz 1905. i 1915. godine:

1905. prostor i vrijeme postaju relativni;

1915. prostor postaje dinamičkim.

U svojim radovima iz njegove «čudesne godine» Einstein se pozabavio abecedom izučavanja atomskog i subatomskog svijeta i to u vrijeme kad atomi još nisu bili opće prihvaćeni (što će promijeniti njegova analiza Brownovog gibanja). Iako ga uvođenje kvanata svjetlosti svrstava među utemeljitelje kvantne mehanike, krunu radova iz 1905. godine čini njegov zahvat u strukturu prostora i vremena. Uzalud je Lorentz gundao da je Einstein jednostavno pretpostavio ono što su drugi pokušavali dokazati. Einstein je taj koji se usudio izreći da se prostor i vrijeme miješaju, da Lorentzove transformacije nisu samo matematička vježba. One iskazuju matematički zapis ravnopravnosti svih promatrača na koje ne djeluju sile. Takvim zahtjevom ravnopravnosti on u stvari uvodi u fiziku princip simetrije (invarijantnosti) kao načelo koje će u daljnjem slijedu događaja igrati važnu ulogu. Relativistička invarijantnost kao princip simetrije specijalne relativnosti izriče da uz samu brzinu svjetlosti i svi zakoni prirode moraju biti isti u svim inercijalnim sustavima (sustavima u jednolikom gibanju). Einsteinova ekvivalentnost mase i energije također vodi do svima poznatog trijumfa. Na tragu Lorentzovog bavljenja elektromagnetskim porijeklom mase elektrona, Einstein zaključuje da masu možemo dobiti iz “bezmasene” energije. Iako je poznatiji po obratu, pretvorbi mase u energiju na kojoj se temelji energija zvijezda ili nuklearnih bombi, njega je zanimalo ovaj „manje praktični“ aspekt. U istom duhu današnja teorija temeljne jake sile, kvantna kromodinamika (QCD), objašnjava masu protona i neutrona, a time i prevladavajuću masu obične tvari: protoni i neutroni od kojih su građene atomske jezgre sadrže bezmasene gluone i gotovo bezmasene kvarkove, tako da je porijeklo mase obične tvari u „nevidljivoj energiji“ gluona (Slika 5).



Slika 5: Einsteinova ekvivalencija mase i energije doživljava trijumf u modernoj spoznaji da je porijeklo mase nukleona (protona i neutrona), a time i prevladavajuće „obične“ tvari, u nevidljivoj energiji zatočenoj u nukleonima

Einsteinov rad iz 1907. godine pokazuje da je za njega specijalna relativnost tek uvod u općenitiju teoriju. Godine napornog rada dovele su ga 1915. godine do „Opće relativnosti“, kojom će obuhvatiti silu gravitacije.

Postavljanjem opće teorije relativnosti (za detalje vidjeti prethodno predavanje dr. Bilića) on ujedno postavlja i teoriju samog prostora-vremena. U njoj se gravitacija svodi na geometriju odn. „zakrivljenost“ prostora (lijeva strana njegove jednačbe), koju određuje sva „tvar“ koja gravitira (desna strana njegove jednačbe):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G_N T_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} \Lambda$$

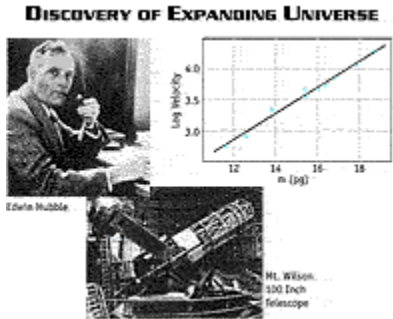
Iskazani tenzorski zapis koji on preuzima od svog bivšeg učitelja iz Züricha, Hermanna Minkowskog, obuhvaća deset nelinearnih diferencijalnih jednačbi, koje se zbog simetrije tenzora svode na samo šest.



Slika 6: Einsteinovo kozmičko naslijeđe: prostor je dinamički (zakrivljen, svijen,...), a svemir je shvatljiv

Budući da je gravitacija dominantna sila koja pokreće svemir, na Einsteinovoj općoj relativnosti mora se temeljiti i kozmologija. Einstein stoga promiče svoje jednačbe u kozmološke jednačbe koje bi trebale opisivati i sam svemir. On ih je čak i modificirao “lambda članom” da bi opisao *statički* svemir, na kakav su ukazivala promatranja u vrijeme postavljanja kozmološke jednačbe, 1919. godine. U današnjem zapisu „kozмолоški“ (lambda) član naći ćemo na desnoj strani jednačbe, kako bi zastupao tzv. tamnu energiju, koju ćemo detaljnije razmotriti nešto kasnije.

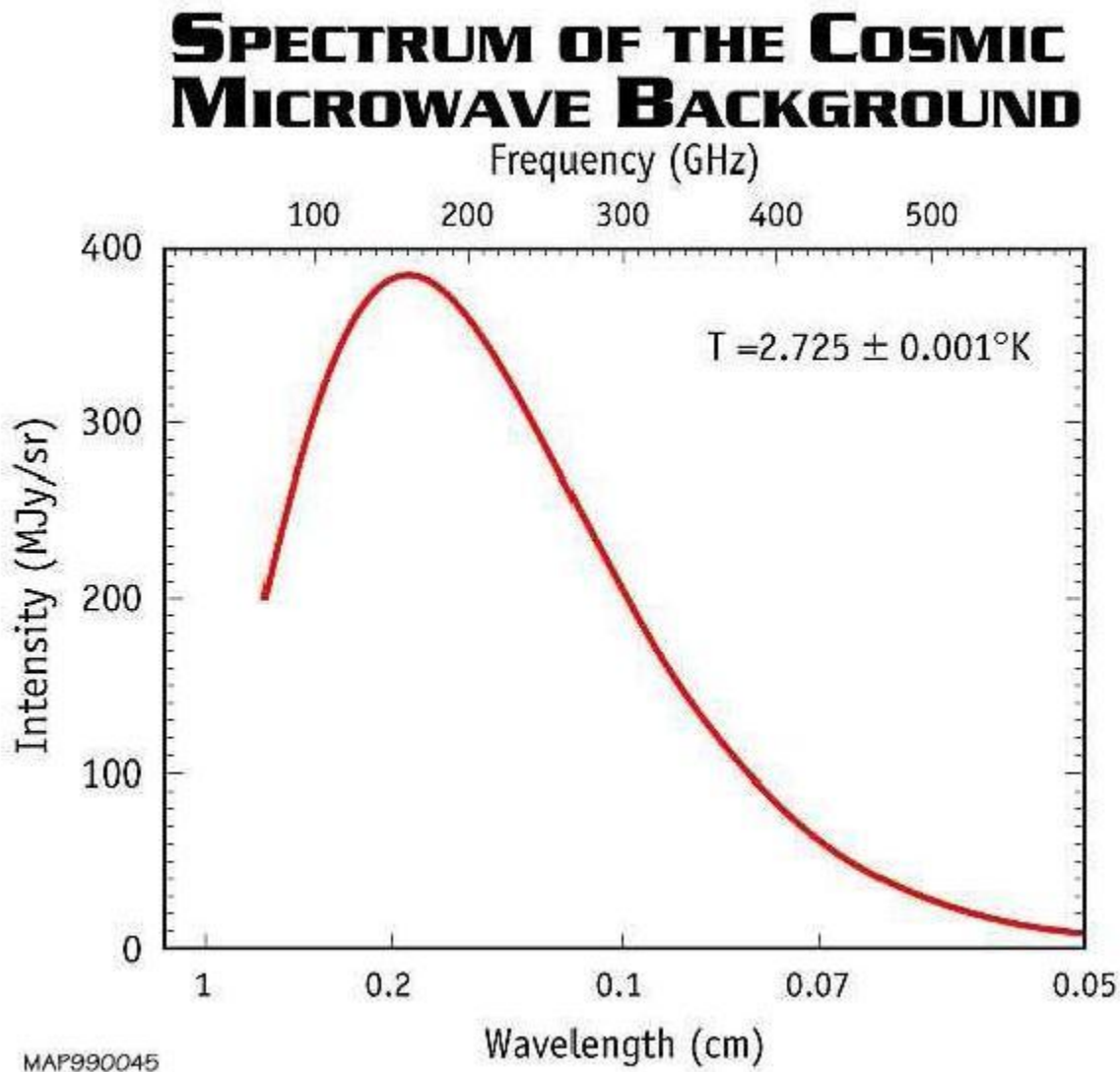
Ipak, nakon što Edwin Hubble ustanovljava svemir u *širenju* (Slika 7), Einstein uvođenje lambda člana naziva svojom najvećom pogreškom (propustio je predvidjeti širenje svemira). Hubbleov parametar širenja nalazi se često pod nazivom „prvog kozmološkog parametra“.



Slika 7: Na parametar širenja svemira, Hubbleovu konstantu, zaključilo se na temelju poznavanja udaljenosti galaktika i na temelju mjerenja njihovih „Dopplerovih“ crvenih pomaka od strane Vestoa Sliphera i drugih astronoma

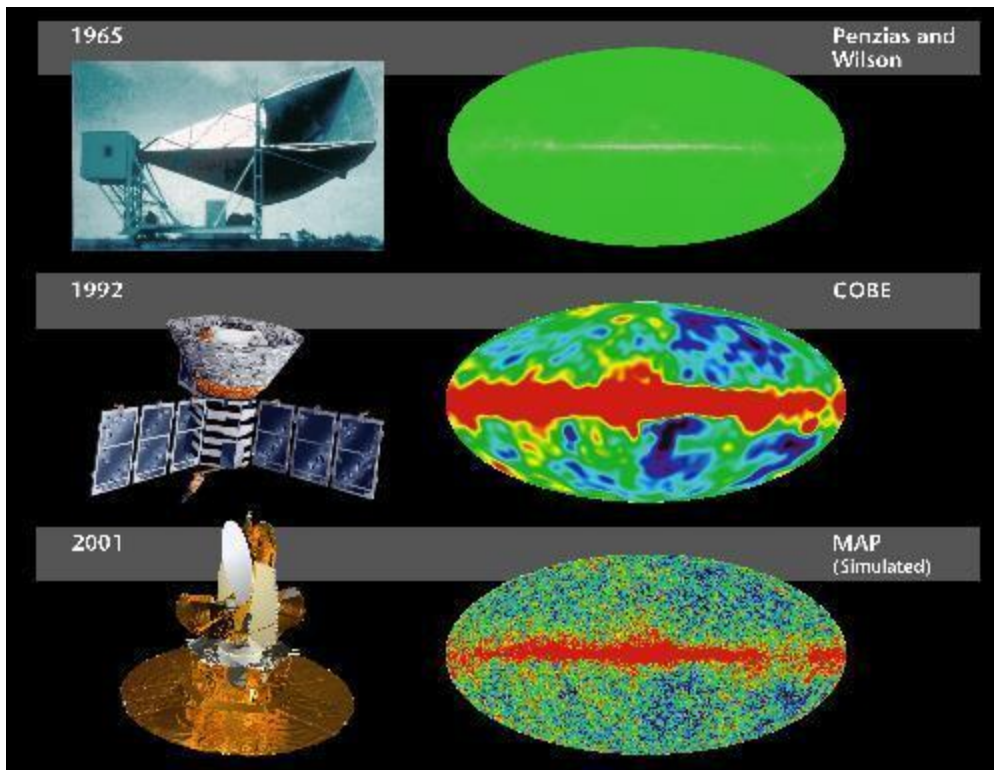
II POTVRDE SVEMIRA VELIKOG PRASKA

O svemiru govorimo kao svemiru „Velikog praska“ nakon neočekivanog otkrića A. Penziasa i R. Wilsona iz 1965. godine. Riječ je o otkriću signala u mikrovalnom području, koji do nas dolazi podjednako iz svih smjerova neba. Tim je otkrićem potvrđeno već zaboravljeno predviđanje Georga Gamowa iz 1948. godine, da se svemir nalazi u stanju koje podsjeća na stanje nakon eksplozije. Opaženo mikrovalno pozadinsko zračenje pokazivalo je spektar crnog tijela temperature 3.5 K, blizu Gamowljevog predviđanja od 5K. Slaganje izmjerene spektra s onim crnog tijela, potvrđeno satelitskim mjerenjima COBE (1992) i posebice WMAP mjerenjem (prikazanim na Sl. 8), govori da je svemir u prošlosti bio u termičkoj ravnoteži.



Slika 8: Spektar pozadinskog zračenja je najsavršeniji ikad izmjereni spektar crnog tijela. Pogreške mjerenja daleko su unutar debljine crte teorijske krivulje savršenog crnog tijela

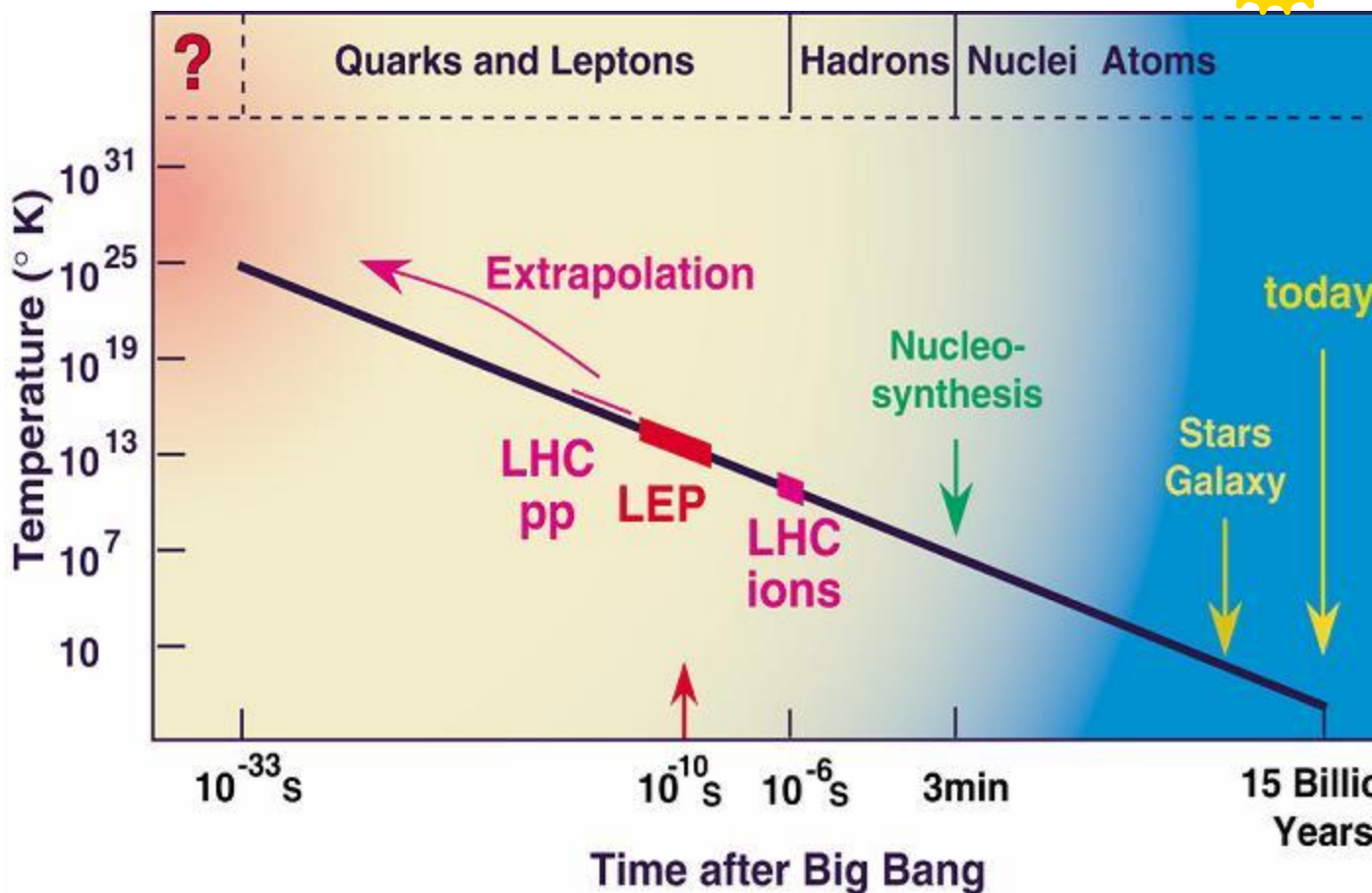
Sve preciznija mjerenja pozadinskog zračenja (ilustrirana na Sl. 9) vodila su na sve preciznije vrijednosti temperature tog zračenja (one iskazane na Sl. 8), ali i na mjerenje malih anizotropija koje će postati važnim izvorom novih informacija o svojstvima i sastavu svemira.



Slika 9: Usporedni prikaz mjerenja neba u mikrovalnom području pokazuje doseg u mjerenju malih mreškanja, temperaturnih varijacija izraženih mikrokelfvinima

Spomenimo još jednu potvrdu vrućeg Velikog praska (uz one koje dolaze od samog širenja svemira i od mjerenja pozadinskog zračenja). Naime, Gamow je predvidio da su u takvom ranom svemiru ostvareni uvjeti nuklearnog reaktora koji omogućuje *prvotnu nukleosintezu*, stapanje protona i neutrona u jezgre atoma lakih elemenata. Tako bi se do treće minute po stvaranju svemira proizvelo 25% jezgri helija u odnosu na protone, jezgre vodika. Kasnija potvrda predviđenih omjera helija i litija dovest će do općeg prihvaćanja modela svemira vrućeg Velikog praska.

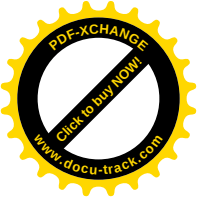
Da bi se dobio uvid u zbivanja u svemiru mlađem od 3 minute, bio je potreban napredak u poznavanju procesa fizike elementarnih čestica, koji dominiraju u tim još vrućijim fazama svemira. Slika 10 nam pokazuje kako modernim akcelerskim pokusima istražujemo još raniji i još vrućiji svemir.



Slika 10: Eru koja prethodi prvotnoj nukleosintezi istražuju moderni akceleratorski pokusi na CERNu u Genevi

II.1 UBRZIVAČI I SUDARIVAČI ELEMENTARNIH ČESTICA kao vremenski strojevi novijeg doba

Pokusi na modernim ubrzivačima čestica dovode na fizikalnu scenu čestice iščezle u prvim trenucima svemira. Primjerice, t-kvark koji je zadnji put „viđen“ pri samom početku svemira, ožvljen je prije deset godina na Fermilabu, pri sudarima protona i antiprotona. Nesvakidašnje čestice koje smo počeli proizvoditi na ubrzivačima elementarnih čestica naći ćemo i u *ranom svemiru*, u odgovarajućim epohama u kojima postoje sudari takvih čestica. Te epohe sudara karakterizirane su brzinama reakcija koje daleko premašuju brzinu ekspanzije samog svemira. Sve dok temperatura svemira

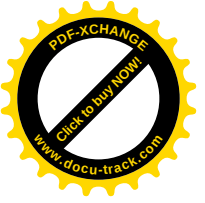


znatno premašuje ekvivalentnu masu neke čestice (deset tisuća kelvina odgovara jednom elektron-voltu), ta je čestica aktivni sudionik uspostavljanja termičke ravnoteže svemira, na kakvu ukazuje spektar pozadinskog mikrovalnog zračenja. Pri elastičnim raspršenjima čestice uspostavljaju **kinetičku** ravnotežu, a putem neelastičnih raspršenja u kojima se mijenja broj čestica stvara se **kemijska** ravnoteža. Prijelaze u eru bez sudara bilježimo kao značajne „trenutke“ u povijesti svemira, prema kojima sinkroniziramo kozmičke satove, kao što je učinjeno na Sl. 1. Što se pri tim prijelazima događa s termičkom distribucijom, ovisi o tipu ravnoteže. Pri *odvezivanju* od kinetičke ravnoteže mikrovalno pozadinsko zračenje čuva termički karakter spektra. S druge strane, prvotna nukleosinteza se *zamrzne* na sintezi najlakših jezgri (koje ostaju kao reliktna gustoća H, He, Li). U svemiru je ostavljena zaliha energije za kasniju fuziju koja će se nastaviti u zvijezdama. Problem „toplinske smrti“ postavljen u 19. st. riješila je moderna kozmologija (mi živimo na račun nuklearne energije uskladištene u svemiru kad je bio star tri minute).

Uočimo da teorija Velikog praska ne opisuje sam Veliki prasak, nego širenje i hlađenje svemira nakon njega. Uz opisano formiranja elemenata to uključuje i opis nastajanja struktura u svemiru. Pri tome nije objašnjen ni uzrok ekspanzije niti **bariogeneza** (kako dolazi do tvari koju opažamo u svemiru). Uz ovaj posljednji problem vezan je obrat koji opaža A.D. Dolgov [4], kako isto znanje može voditi na suprotne zaključke. On iznosi primjer eksperimentalne činjenice barionske asimetrije svemira na temelju koje danas zaključujemo: „mi postojimo, dakle barioni nisu očuvani“. Prije pola stoljeća zaključili bismo: „mi postojimo, dakle barioni su očuvani“. Dok smo ranije bili zaokupljeni našim trajanjem („dijamanti su vječni“), danas naša ambicija usredotočena na objašnjenje kako je uopće moglo doći do stvaranja tvari od koje smo građeni. To upućuje na ulogu postavljanja teorije pomoću koje ćemo interpretirati vrlo jasne eksperimentalne činjenice.

Današnji teorijski okvir unutar kojega interpretiramo rezultate su znanja na kojima se temelji standardni model čestica i sila i standardni kozmološki model. Napredak u kozmičkim mjerenjima postignut u prethodnom desetljeću doveo je do revolucije u kozmologiji. On je prije svega omogućio da se riješe neki temeljni problemi koji se pojavljuju u standardnom modelu Velikog praska i ukazuju na to da ćemo taj model morati dopuniti tzv. inflacijom.

III INFLATORNI

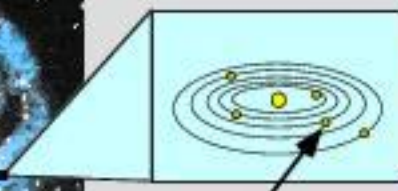


SVEMIR

Zamisao da bi svemir pri svojem samom začetku mogao proći kroz ubrzanu (eksponencijalnu) ekspanziju temelji se na mogućnosti da na tim visokim energijama postoje oblici tvari koji bi vodili na odbojnu gravitaciju.

U svjetlu takve „inflatorne“ faze u ranom svemiru, scenarij Velikog praska sa Sl. 1 modificira se na način prikazan na Sl. 11.

History of the Universe



VACUUM
DOMINATES

Presence

Temperature Age
2,7 K 15 Billion years

first Supernovae

5 K 5 Billion years

Genesis of Stars
and Galaxies

11 K 1 Billion years

MATTER DOMINATED ERA

UNIVERSE BECOMES
TRANSPARENT

Radiation
decouples
from Matter Formation
of Atoms

1,000 K 300,000 years

Nucleosynthesis
of Helium

Positrons
disappear

10^{10} K 1 sec

Formation of
Protons and Neutrons

Antiquarks
disappear

10^{15} K 10^{-10} sec

ELECTROWEAK
PERIOD

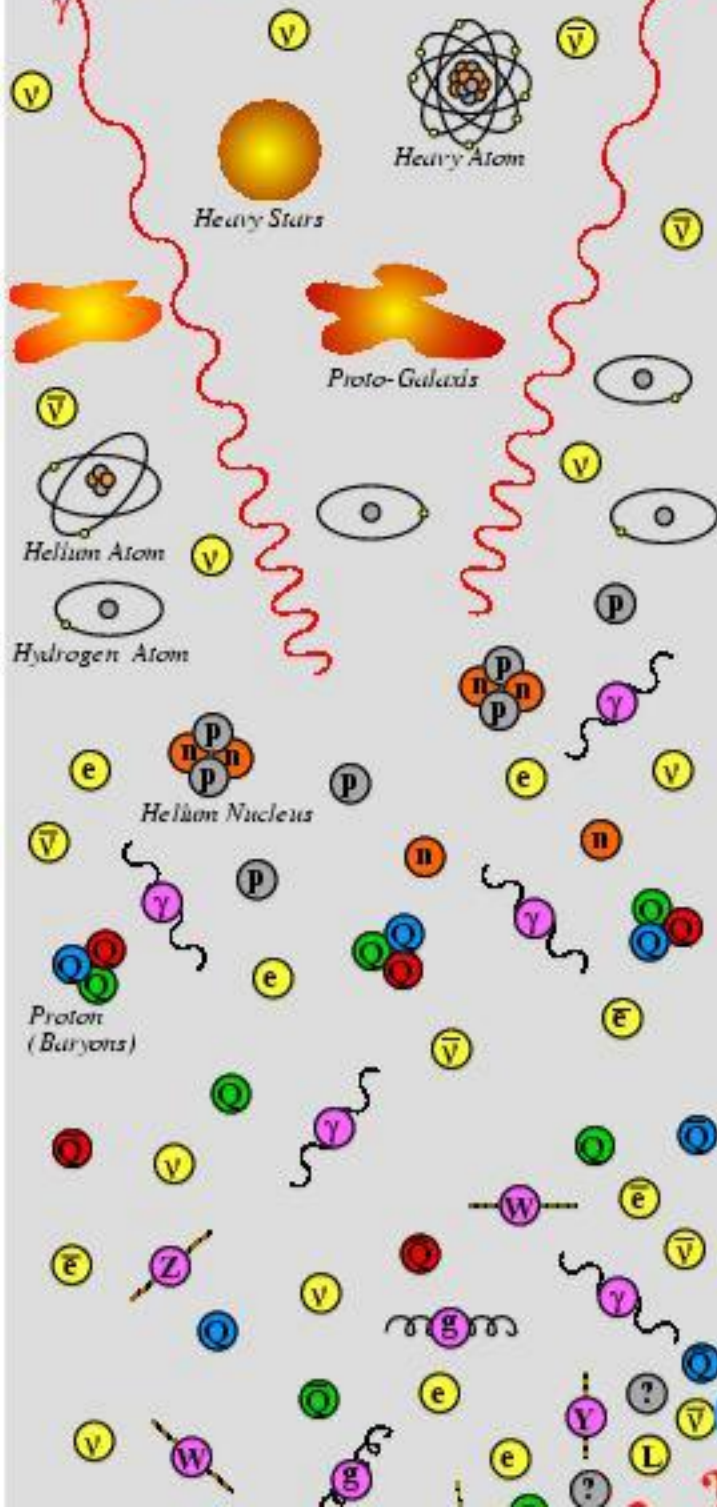
Asymmetry $Q - \bar{Q}$ $L - \bar{L}$

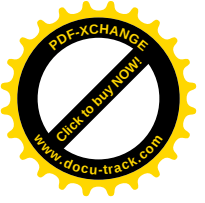
10^{27} K 10^{-34} sec

Inflation

VACUUM
DOMINATES

10^{31} K 10^{-43} sec





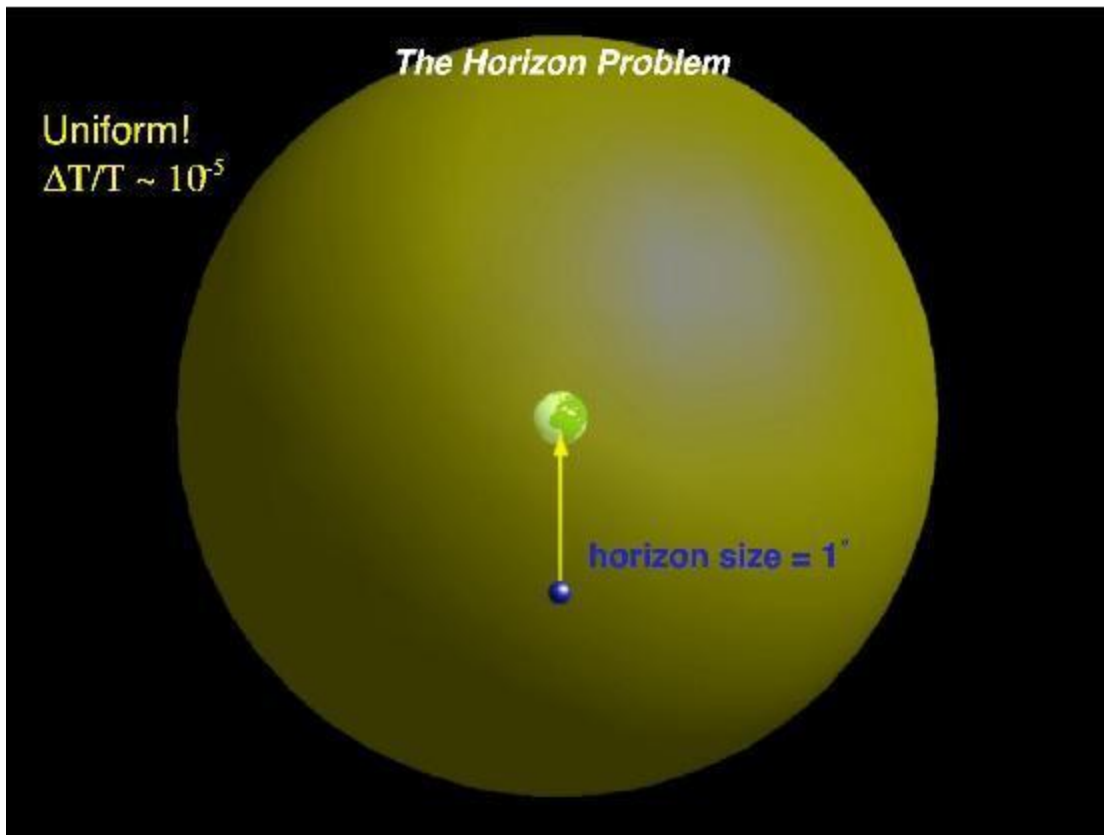
Slika 11: Veliki prasak praćen vakuumom dominiranom erom inflacije

Eksponencijalna ekspanzija je rezultat gravitacijske repulzije, pri čemu se dimenzije svemira podvostručuju svakih 10^{-37} sekundi. Pri tome se moraju događati naizgled nevjerovatne stvari: pri ekspanziji se tvar sa svojstvom odbojne gravitacije ne razrijeđuje, pa stvaranje sve više i više takve tvari upućuje na neočuvanje energije. No uzme li se u obzir negativna energija gravitacijskog polja, ukupna je energija svemira očuvana (najvjerovatnije ostaje nula). Da bi se inflacija zaustavila, tvar koja je pogoni trebala bi biti nestabilna, poput radioaktivne tvari koja traje oko 10^{-35} sekundi. To je vrijeme dovoljno da svemir manji od dimenzija protona naraste do veličine centimetra. Pri kraju te inflatorne faze dolazi do ere „bariogeneze“, stvaranja obične (barionske) tvari na čijim ostacima se temelji i naše postojanje. Prvi kandidat za pogonitelja inflacije je tzv. kvantni šum, energija vakuuma koja se pojavljuje na račun kvantno mehaničkih relacija neodređenosti i koja ima svojstvo negativnog tlaka.

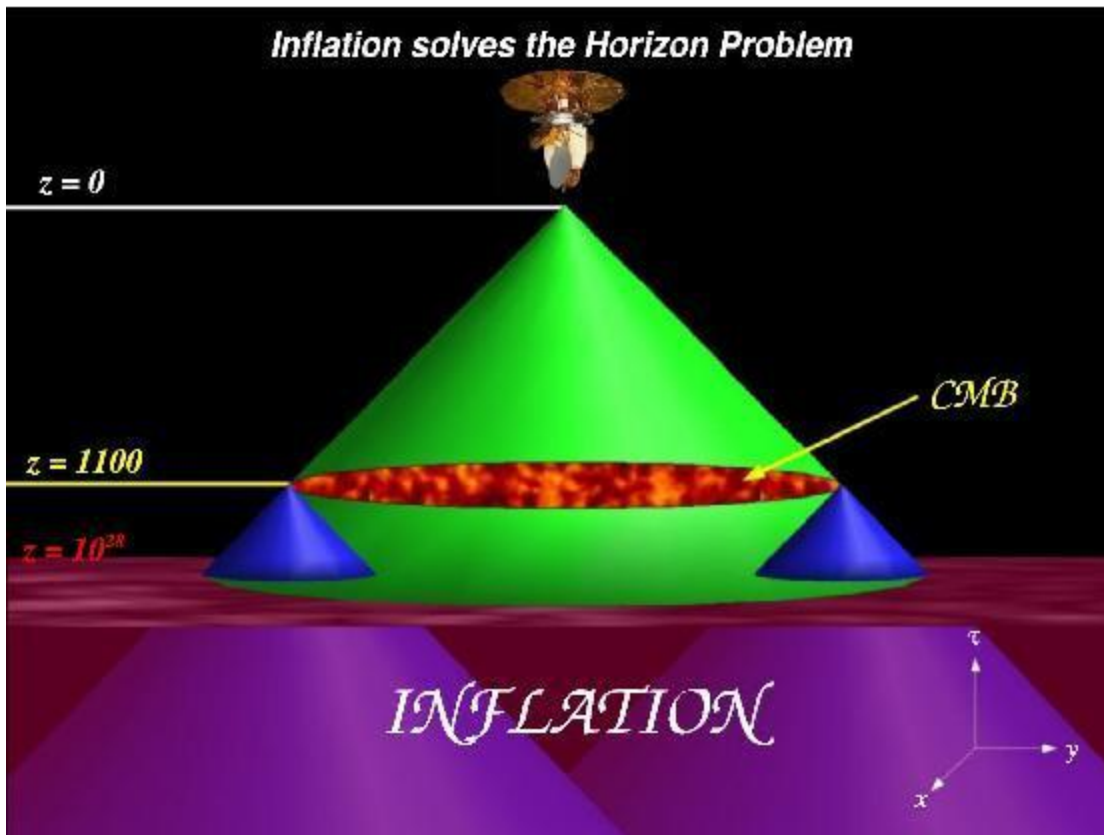
III.1 MODEL KOZMIČKOG SUGLASJA

Budući da inflatorna slika rješava probleme običnog Velikog praska (probleme homogenosti i „ravnosti“ svemira), sama ta rješenja nameću se kao evidencija za inflatorni svemir.

Homogenost svemira na velikim skalama, najpreciznije je mjerena putem već spominjanog pozadinskog mikrovalnog zračenja, oslobođenog kad je svemir star 400 000 godina (na crvenom pomaku $z=1100$). Bez inflacije prijenos energije i informacije trebao bi se odvijati stotruko brže od širenja svjetlosti, što vodi na problem horizonta (Sl. 12). U inflatornom svemiru taj je problem izbjegnuto (Sl. 13).



Slika 12: Jednolika slika neba trebala bi rezultirati iz mnoštva u prošlosti kauzalno nepovezanih područja, što predstavlja „problem horizonta“



Slika 13: Inflacija omogućava da je cijelo nebo u prošlosti kauzalno povezano

Problem ravnosti odnosi se na vrijednost omjera Ω , stvarne gustoće tvari i kritične gustoće (Sl. 14), koja odgovara ravnom (nezakrivljenom) svemiru.

$$\Omega_{\text{Total}} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1.02 \pm 0.02$$

$$\Omega_m = 0.27 \pm 0.02$$

$$\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$$

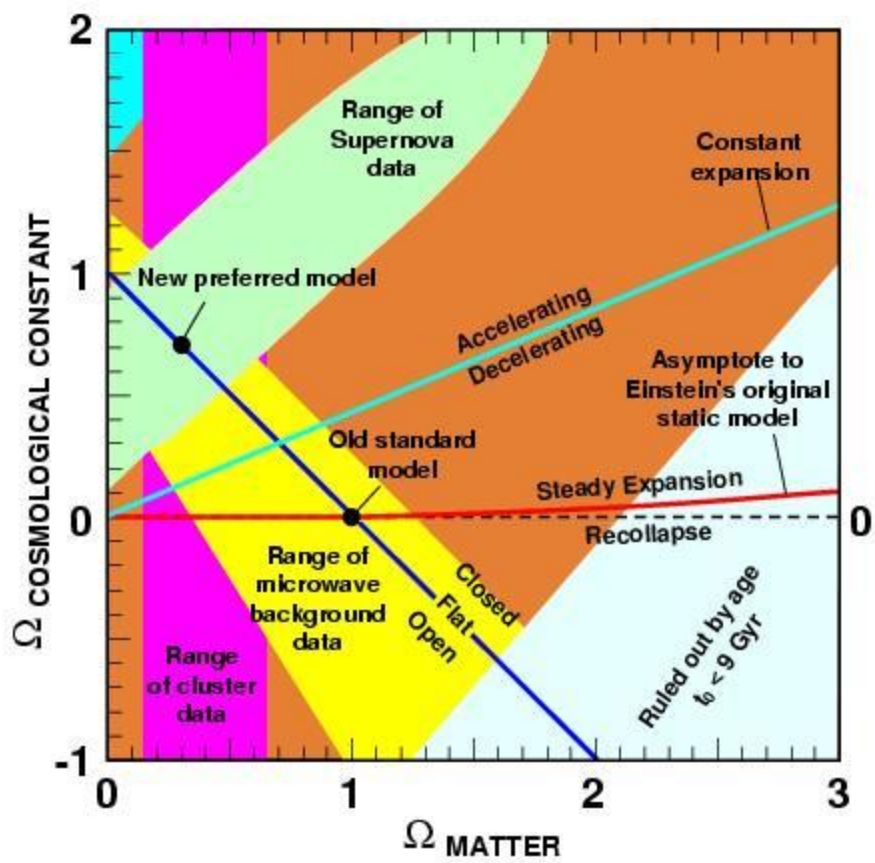
$$\Omega_b = 0.046 \pm 0.001$$

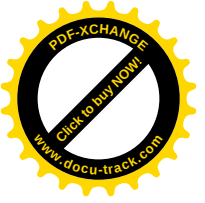
$$\Omega_v < 0.0076$$

$$\begin{aligned} \rho_c &= \frac{3H_0^2}{8\pi G} \\ &\approx 1.19 h^2 \text{ GeVc}^{-2} \text{m}^{-3} \\ \Omega_x &= \frac{\rho}{\rho_c} \end{aligned}$$

Slika 14: Definicija parametra otvorenosti odn. zatvorenosti svemira Ω i udjeli kozmološke konstante (Λ) i tvari (m) – bariona (b) i neutrina (v)

Inflacija objašnjava brzo dovođenje „omege“ na jedinicu s bilo koje početne vrijednosti. Zadnje mjerenje satelita WMAP daje vrijednost $\Omega = 1.02 \pm 0.02$ i u kombinaciji s ostalim opažanjima ukazuje na postojanje **tamne energije** (Sl. 15), kao sastojka svemira koji pogoni inflaciju u posljednjih pet milijardi godina. Svemir je danas u fazi ubrzane ekspanzije koja se još naziva i „malom inflacijom“.

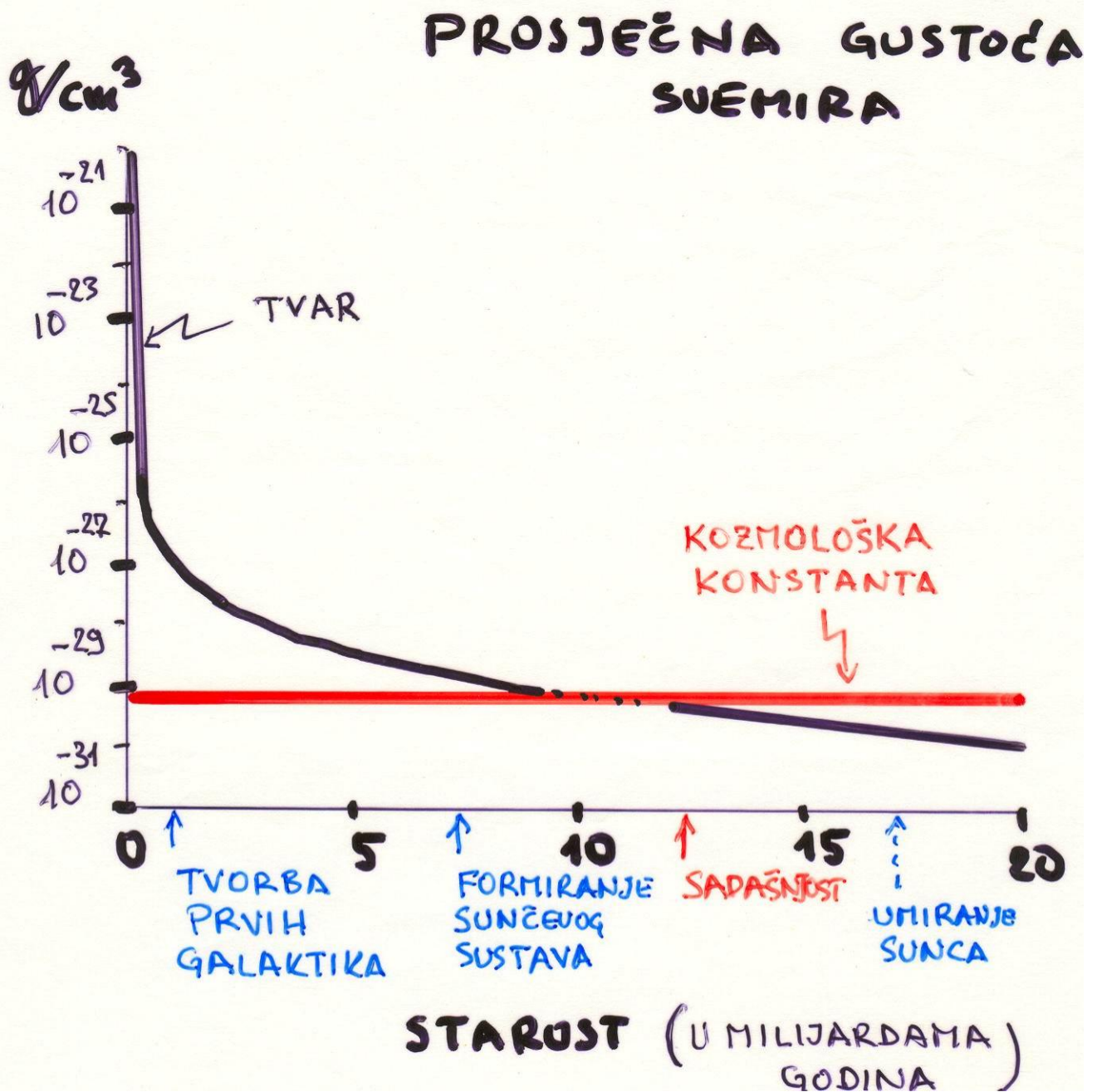




Slika 15: Kombinirana mjerenja ukazuju na „malu inflaciju“, svemir u ubrzanom širenju

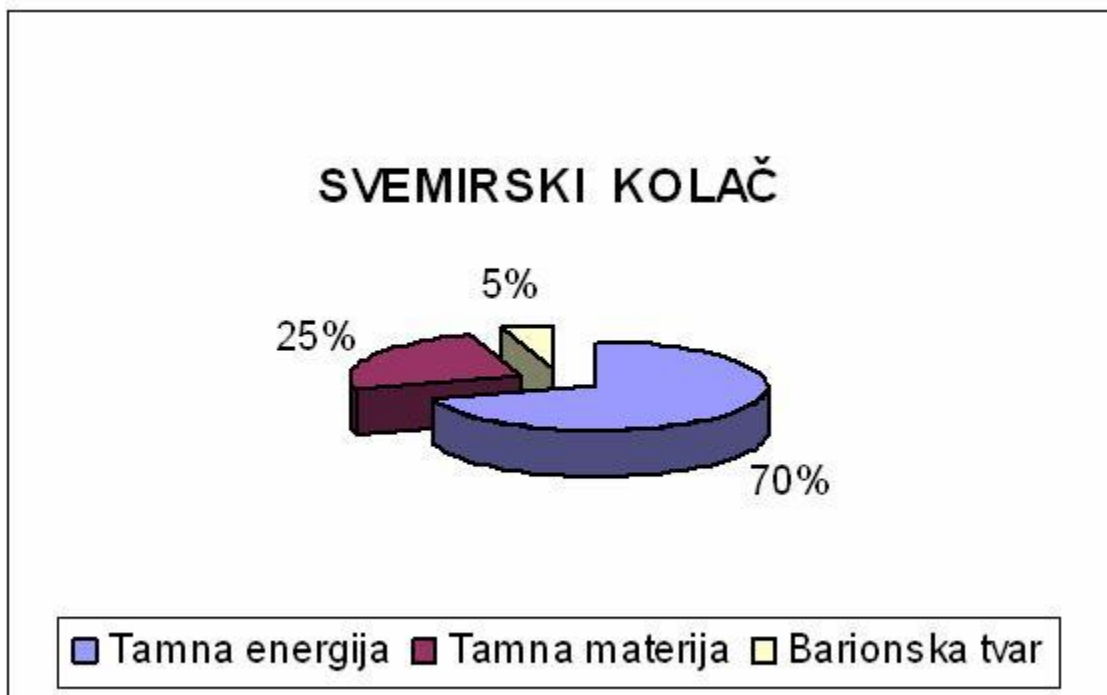
Situaciju u kojoj zatičemo svemir: izjednačavanje, a zatim prevladavanje tamne energije nad tvari, naziva se „kozmičkom ko incidencijom“(Sl. 16).

ERA KOZMIČKE KOINCIDENCIJE



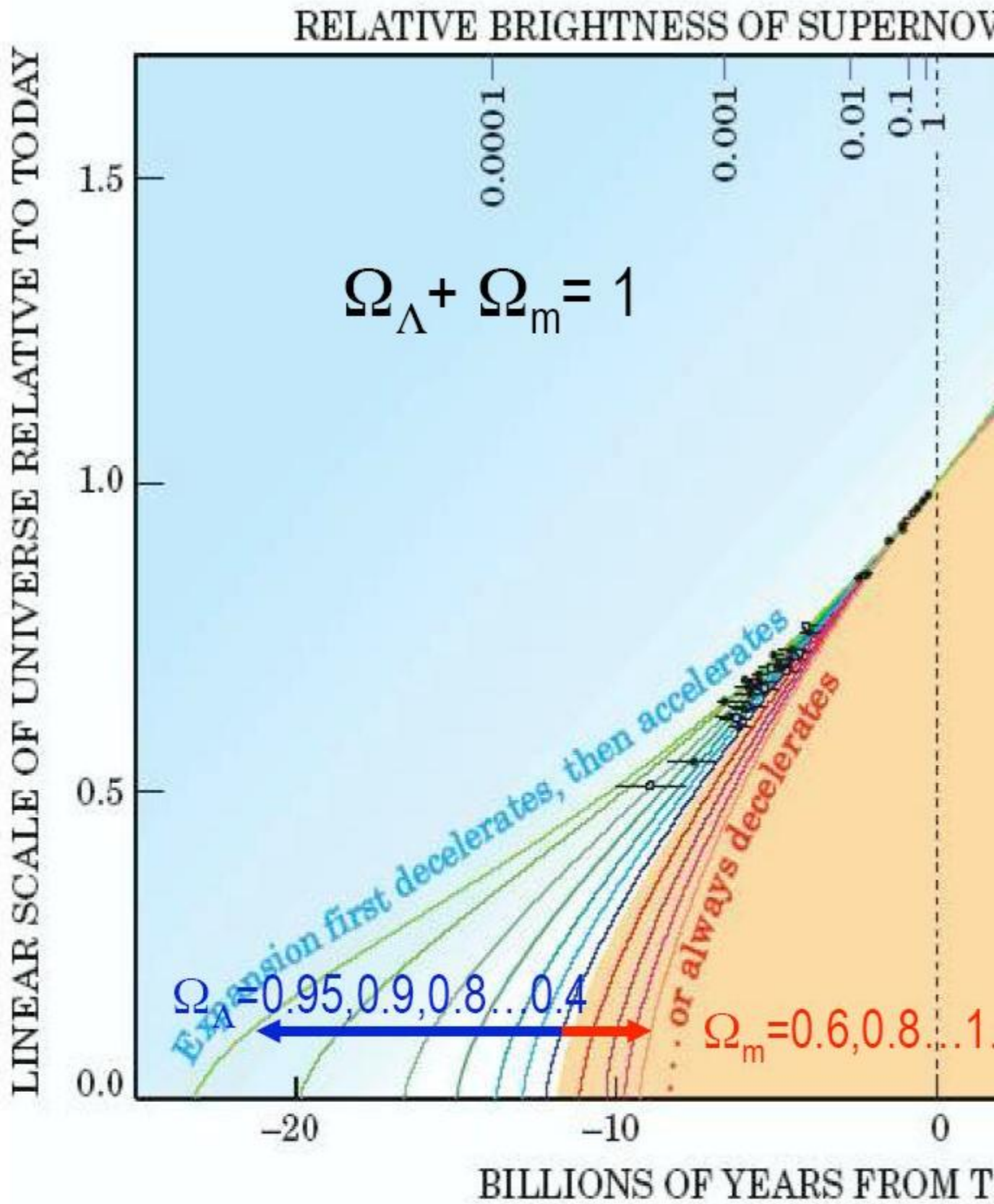
Slika 16: Kozmička koincidencija obilježava kozmički trenutak u kojemu su se susrele vrijednosti gustoće tvari i gustoće tamne energije

Nakon početnog problema s kozmološkom konstantom, da je njena vrijednost za 120 redova veličine manja od očekivane, pojavio se drugi problem: njezina mala, ali neiščezavajuća izmjerena vrijednost. Pri tome ona još uvijek sačinjava otprilike 70% svemirskog inventara (Sl. 17). U ostatku nalazimo samo 5% obične, barionske tvari, a 25 % otpada na tamnu materiju. Dakle, moramo priznati da nam je **preko 95% sastava svemira nepoznato**.



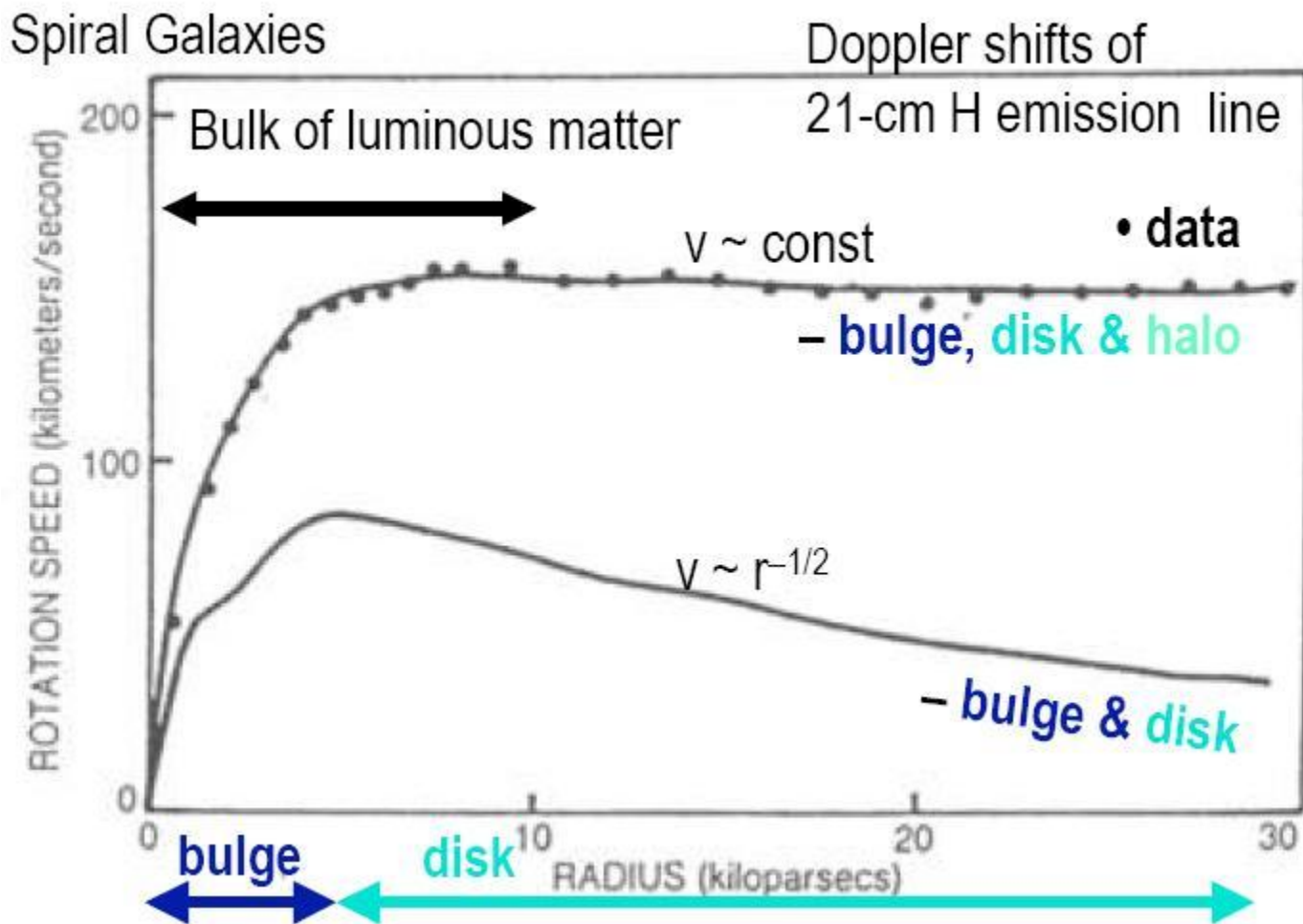
Slika 17: Kozmički kolač čijih 95% sastojaka nam je nepoznanica

Kozmički sklad (suglasje raspoloživih mjerenja, Sl. 18) zahtijeva da nebarionska tamna tvar bude pretežno nerelativistička (hladna) – CDM (od engl. Cold Dark Matter), u što se ne uklapaju neutrini kao lake čestice. K tome treba pridodati prevladavajuću tamnu tvar (član Λ), pa ukupno imamo Λ CDM.



Slika 18: Model kozmičkog suglasja, tzv. Λ CDM. Prikazana je kozmička evolucija, crveni pomak u odnosu na vrijeme

Fizika elementarnih čestica nudi čestične kandidate za nebarionsku tvar (primjerice, supersimetrične čestice, za kojima se još uvijek traga na sudarivačima čestica). Moguće je da takva tamna tvar formira i svoja vlastita astronomska tijela. Naznake za tamnu tvar postoje u galaktičkim haloima i okolini galaktičkih jata, na temelju „rotacijskih krivulja“ (Sl. 19) i „Einsteinovih prstenova“ (Sl. 20).

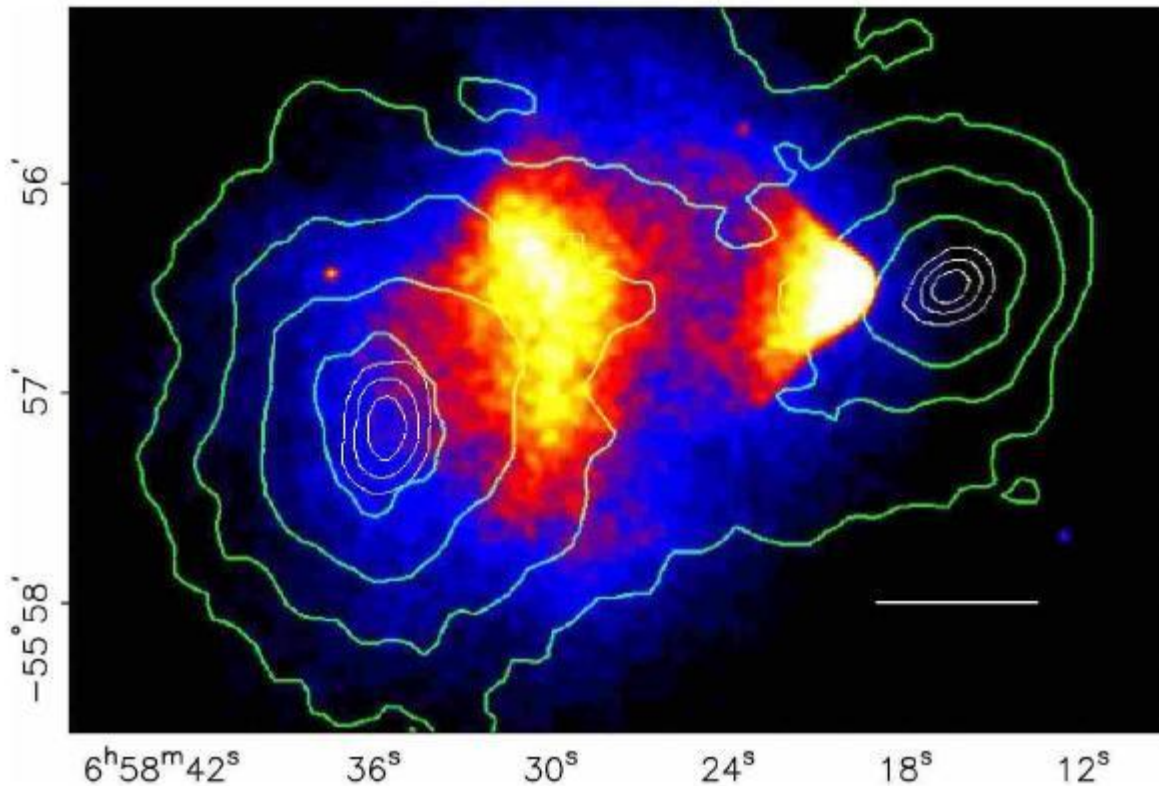


Slika 19: Rotacijske krivulje spiralnih galaktika ukazuju na potrebu postojanja nevidljive tvari u galaktičkim haloima



Slika 20: Jako gravitacijsko fokusiranje snimljeno Hubbleovim svemirskim teleskopom. Tamna tvar djeluje kao gravitacijska leća koja stvori karakteristični prsten

Nevidljiva tvar se može izučavati i pri sudaru galaktičkih jata, kako je to prikazano na Sl. 21.



Slika 21: Slika Chandra satelita u području X-zračenja, preuzeta iz D. Clowe et al., astro-ph/0608407

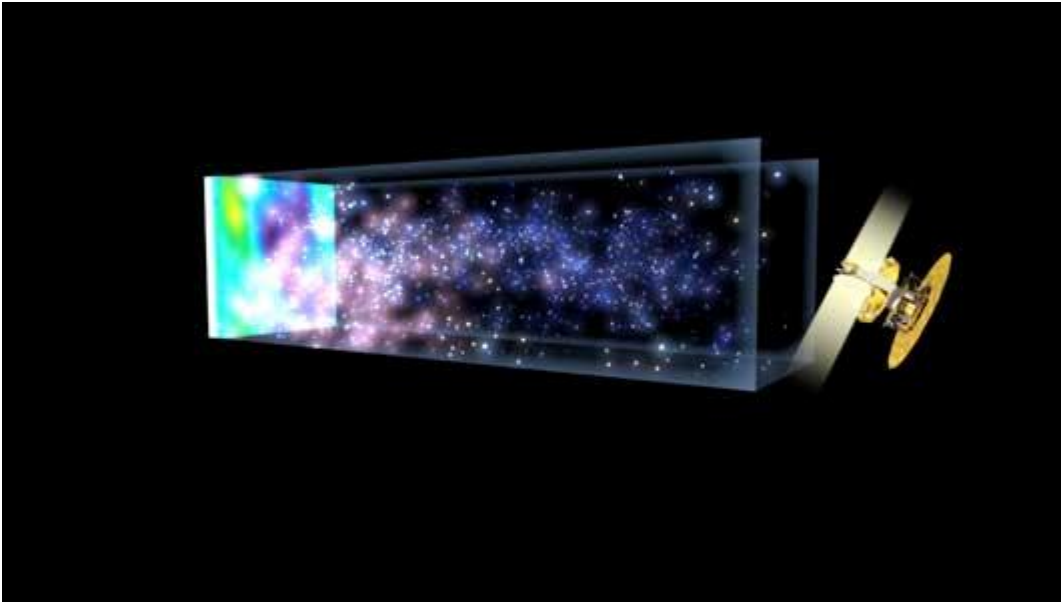
Nedavna analiza na temelju slabog fokusiranja opažanog Hubbleovim teleskopom i opažanja Chandra opservatorijem, zaključuje na nepodudaranje središta ukupne mase i središta barionske mase. Ukoliko ti rezultati budu potvrđeni pokazat će se dalekovidnost umjetničke vizije neba s tamnom tvari prikazane na Sl. 22.



Slika 22: „Zvjezdano nebo“ Van Gogha kao umjetnikov doživljaj nevidljive tvari

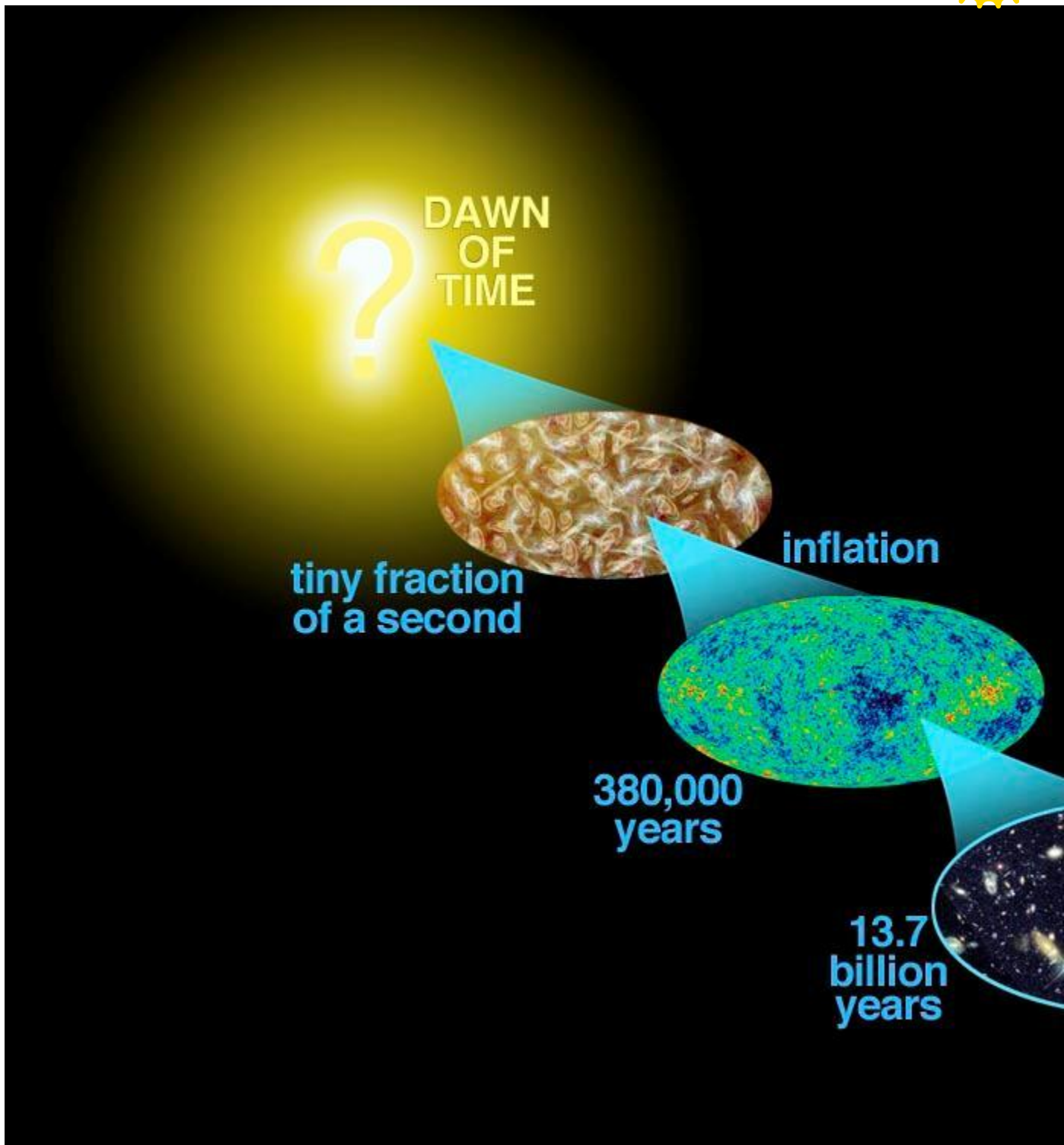
III.2 PITANJE PORIJEKLA STRUKTURA NA NAJVEĆOJ SKALI

Inflacija neočekivano nudi odgovor i na (sve do nje) otvoreno pitanje porijekla opaženih struktura obične tvari. Potrebne nehomogenosti oko kojih se mogu formirati strukture inflacija pridjeljuje kvantnim fluktuacijama na samom početku svemira (Sl. 23).



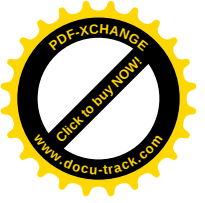
Sl 23: WMAP satelitsko mjerenje bilježi već spomenuto mrežkanje pozadinskog zračenja, anizotropiju na razini jednog dijela u sto tisuća

Inflacija donosi te mikroskopske fluktuacije na makroskopske dimenzije svemira, kao sjeme nakupljanja makroskopske tvari (Sl. 24). Da bismo razumjeli “najveće”, moramo poznavati “najmanje”. No zašto su anizotropije baš reda 10^{-5} ostaje neodgovorenim pitanjem.



Slika 24: Astronomski svijet kao preslika kvantnog svijeta ranog svemira

III.3 ANTROPIČKI ZAHTJEVI I MNOŠTVO SVEMIRA



Analiza koju je učinio Martin Rees [5] pokazuje da svemir u kakvome se nalazimo nije zamisliv bez fino odabrane vrijednosti anizotropije. Ona je za naš svemir iskazana parametrom Q

n amplituda fluktuacije, $Q=10^{-5}$;

Tamna energija je ustanovljena kao glavni sastojak našeg svemira. U prošlosti je ona bila još značajnija, kao pogonitelj inflacije. Interpretira li se tamna energija kao energija kvantnog vakuuma, njezina izmjerena vrijednost je danas iznenađujuće mala,

n kozmološka konstanta, $\Lambda = (2 \cdot 10^{-3} \text{ eV})^4$;

Opažena barionska tvar ostatak je tvari koja nije izanihilirala u ranom svemiru. Mali višak materije u odnosu na antimateriju daje u današnjem svemiru barem 10^{79} bariona, ili

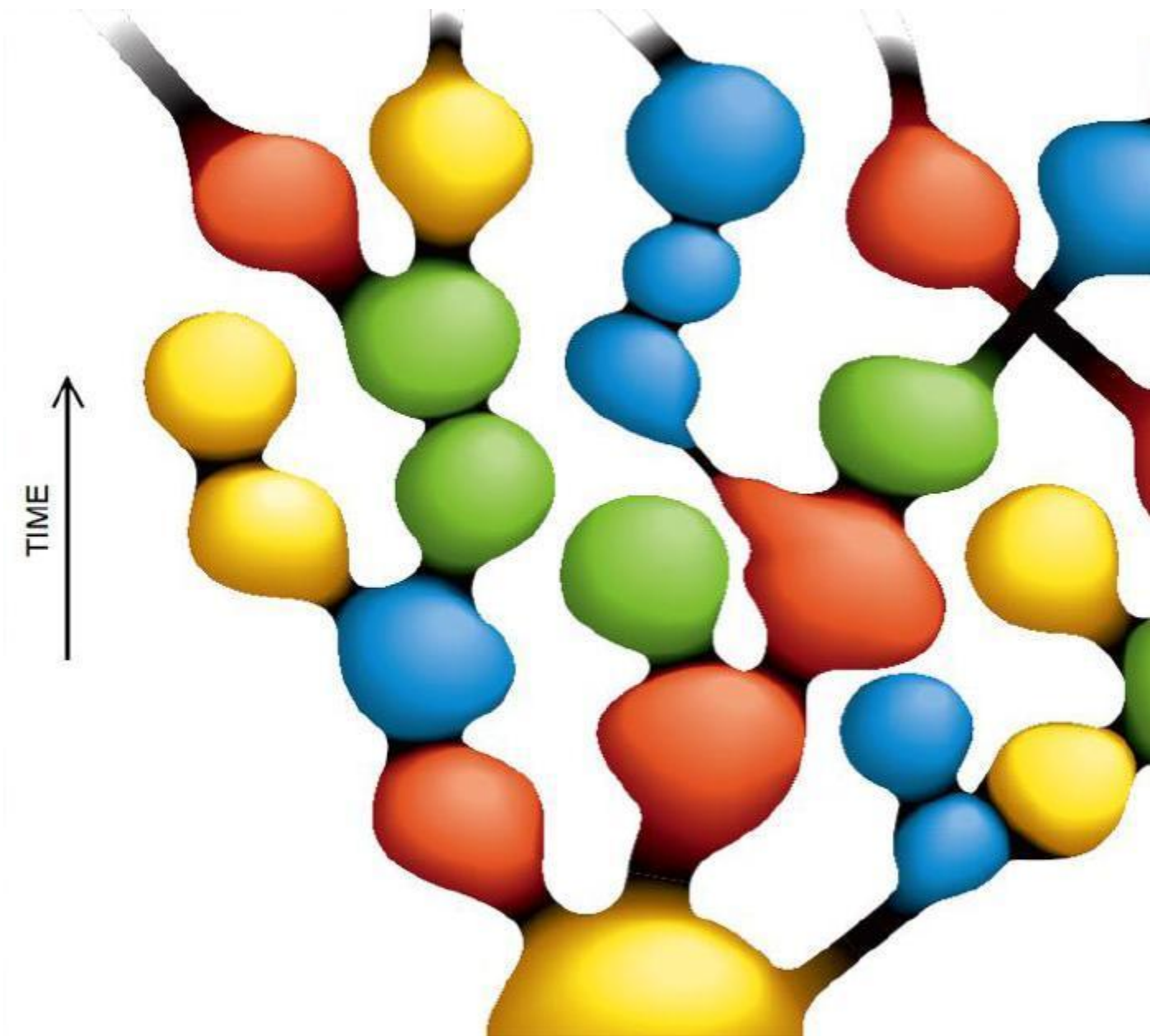
n omjer: broj bariona/broj fotona = 10^{-9} ;

Iako potpuna nepoznanica, u svemiru je prisutna i važna tamna tvar:

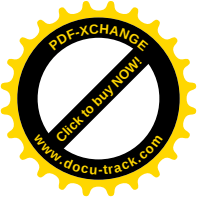
n omjer bariona prema tamnoj tvari, $\Omega_b / \Omega_{DM} = 0.2$.

Svi ovi uvjeti moraju biti ispunjeni da bi bila riječ o svemiru u kojemu ima dovoljno složenosti (kompleksnosti) da bi se mogla razviti neka vrsta života. Njima se moraju pridodati i specijalne vrijednosti temeljnih konstanti standardnog čestičnog modela. Čitav taj skup nevjerojatnih koincidencija upućuje na **antropičko rješenje** [5] za „biofiličnost“ (gostoljubivost) svemira: svemir ima sva ta svojstva da bi omogućio pojavu života koji evoluirao do znanstvenika koji postavljaju takva pitanja! Po Stevenu Weinbergu došli smo do prekretnice, kad znanost, koja se tradicionalno bavi otkrićima o prirodi, dolazi do otkrića o samoj sebi [6]. Svemir u kojem obitavamo, u matematičkom žargonu je „mjere nula“, jedan od beskonačno njih. Takva ideja **mnoštva svemira** (engl. „**multiverse**“) dobila je dodatni poticaj nakon otkrića velikog broja rješenja (posebice vakuuma) koje nude teorije struna – nešto što je Susskind nazvao krajobrazom struna (engl. „string landscape“) [7]. Tih vakuuma po zadnjim proračunima može biti 10^{500} , a na svakom od njih može postojati drugačije populirani svemir (s različitim konstantama prirode). Jedan scenarij za takvo mnoštvo svemira ponudio je A. Linde [8] u svojoj teoriji kaotične inflacije, ilustrirane na Sl.

25. Čitava klasa takvih teorija sučeljava se danas s antropičkim razmatranjima. Pri tome je temeljna činjenica da je i najmanja promjena jednog u mnoštvu parametara za nas „smrtonosna“ [9]. Na čitavoj fronti tih novih izučavanja produbljuje se uvid u povezanost našeg postojanja i temeljnih zakona fizike.



Slika 25: Inflatorni svemir koji se sam reproducira, bez kraja (ilustracija A. Lindea)



- [1] Ivica Picek, „Quantum Physics and Astrophysics“, Hundred Years of Quantum Theory, Ed. D. Tadić, HAZU, Zagreb 2002.
- [2] Frank Wilczek, „Enlightenment, Knowledge, Ignorance, Temptation“, arXiv:hep-ph/0512187
- [3] Ivica Picek, „Elementarne čestice – iskrenje u svemiru tamne tvari“, Školska knjiga, Zagreb 1997.
- [4] A. D. Dolgov, „CP violation in cosmology ”, arXiv:hep-ph/0511213
- [5] S. Weinberg, „Dreams of a Final Theory“, Phantleon, N.Y. 1992, hrv. izdanje(U potrazi za konačnom teorijom) IZVORI, Zagreb 1997.
- [6] S. Weinberg, „Living in the Multiverse”, arXiv:hep-th/0511037
- [7] L. Susskind, „The Antropic Landscape of String Theory“, arXiv:hep-th/0302219
- [8] A. D. Linde, Phys. Lett. 129B (1983) 177
- [9] M. Tegmark et. al., „Dimensionless constants, cosmology and other dark matters“, arXiv:astro-ph/0511774