Promjena kozmološke paradigme: ubrzani Svemir

Pavlovski, Krešimir

Source / Izvornik: **Matematičko fizički list, 2011, 246, 93 - 102**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:081165

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Promjena kozmološke paradigme: ubrzani Svemir

Krešimir Pavlovski[1]

Početak i kraj 20. stoljeća u kozmologiji je obilježen velikim otkrićima. Velika pak otkrića u početku najčešće još nemaju objašnjenje. Kada je Vesto Splipher 1913. godine objavio otkriće crvenog pomaka u spektrima spiralnih maglica, niti prava priroda spiralnih maglica još nije bila otkrivena. Na samom kraju stoljeća, a ujedno i milenija, 1998. godine, otkriće ubrzanog širenja Svemira promijenit će kozmološku paradigmu – umjesto gravitacijske sile Svemirom vlada tamna energija čije je porijeklo, unatoč intenzivnim istraživanjima proteklih desetak godina, još uvijek nepoznato.

Slika 1. Dobitnici Nobelove nagrade iz fizike za 2011. godinu, Saul Perlmutter (lijevo), Brian P. Schmidt (u sredini) i Adam G. Reiss (desno). Perlmutter (r. 1959. god.) je profesor astrofizike na University of Calfornia u Berkeleyu. Schmidt (r. 1967. god.) profesor je na Australian National University u Weston Creeku, a Riess (r. 1969. god.) je profesor astronomije i fizike na Johns Hopkins University i Space Telescope Science Institute u Baltimoreu.

Nobelova nagrada za fiziku u 2011. godini dodijeljena je astrofizičarima Saulu Perlmutteru, Adamu Riessu i Brianu Schmidtu za otkriće ubrzanog širenja Svemira. Saul Perlmutter je primio polovicu novčanog iznosa nagrade, dok drugu polovicu dijele Adam Riess i Brian Scmidt. Naime, Saul Perlmutter je na kalifornijskom sveučilištu u Berkeleyu vodio istraživačku grupu 'Supernova Cosmology Project', dok je Brian Schmidt na harvardskom sveučilištu vodio grupu 'High-Z Supernova Search' u kojoj je Adam Riess imao ključnu ulogu. Opažanja dalekih supernova koja su ove istraživačke grupe započela početkom 90-tih godina 20. stoljeća, pokazala su da je sjaj supernova oko 20% manji od očekivanog. Ako je sjaj supernova manji, znači da su udaljenije nego bi trebale biti – širenje Svemira se ne usporava, naprotiv, širenje je ubrzano, svakog trenutka zauzima sve veći i veći prostor, a sukladno tome se brzina širenja sve više i više povećava. Dva se puta u jednom stoljeću već mijenjala kozmološka paradigma: prvi put,

[1] Autor je redoviti profesor na Fizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, e-pošta: pavlovski@phy.hr

kada je Edwin Hubble 1929. godine otkrio širenje Svemira i kada se je moralo napustiti statički i vječni svemir kakvim ga je opisao Albert Einstein 1917. godine, i drugi put, otkrićem ovogodišnjih Nobelovaca 1998. godine koje je preokrenulo strelicu širenja, iz usporavanja do eventualnog ponovnog skupljanja, u neprestano, sve brže, širenje.

Potraga za standardnim svijećama

Određivanje udaljenosti do zvijezda i galaksija bilo je često, kroz povijest astronomskih istraživanja, uteg u napretku. Svemir je vrlo velik, zvijezde su vrlo daleko od našeg planeta, a onda, galaksije, višestruko udaljenije. Iz tog su razloga prve pouzdane udaljenosti do zvijezda izmjerene tek u prvoj polovici 19. stoljeća. Pokazalo se da su udaljenosti najbližih zvijezda u skali svjetlosnih godina.

Kada je Slipher otkrio crveni pomak spektralnih linija u spektrima spiralnih maglica, nije samo crveni pomak bio zagnotetka, već i priroda spiralnih maglica. Do 1917. godine Slipher je uspio prikupiti spektre desetak spiralnih maglica. Većina maglica imala je spektre sa crvenim pomakom, a tek ih je nekoliko, poput Andromedine, imalo plavi. Međutim, nedostajao je suštinski odgovor, što su spiralne maglice. Te iste godine će Einstein objaviti znameniti članak u kojem u jednadžbe polja (naprasno) uvodi dodatni član, kasnije nazvan kozmološka konstanta, kako bi spriječio rješenja koja vode u skupljanje ili širenje Svemira, i učinio ga postojanim i vječnim, kako su ga uostalom astronomi tog vremena i doživljavali.

Sustavna opažanja zvijezda, naročito onih koje mijenjaju sjaj, izbacila su izvanredan rezultat. Promjenljive zvijezda tipa cefeida, nazvane tako prema δ Cephei koja ih predstavlja svojim svojstivma i bila je prva otkrivena, imaju naročito svojstvo: što je period svjetlosnih promjena cefeide veći, veći je njezin luminozitet. Otkrićem Henritte Leawitt koja je radila kao 'kalkulator' na harvardskoj sveučilišnoj zvjezdarnici, astronomi su dobili alat za mjerenje velikih udaljenosti. Cefeide su intrinsično sjajne zvijezde jer su divovi i superdivovi – što ih čini vidljivima i na velikim udaljenostima. Upravo će to iskoristiti Edwin Hubble u prijelomnom otkriću objavljenom na samom isteku 1924. godine, kada je tada najvećim teleskopom na svijetu na MtWilsonu u Kaliforniji, uspio razlučiti cefeide u tri bliske spiralne maglice (M31, spiralnoj maglici u Andromedi; M33, spiralnoj maglici u Trokutu i NGC 6822, nepravilnoj maglici u Strijelcu). Udaljenosti koje je iz njihovih perioda i sjaja izračunao daleko su nadmašivale veličinu Mliječnog puta. Hubble je definitivno otkrio da su spiralne maglice galaksije poput naše galaksije. Poimanje Svemira iz temelja se je promijenilo, osnovnu građu Svemira čine galaksije, dok zvijezde čine građu galaksija. Slipherov crveni pomak je Hubbleovim otkrićem galaksija iznenada dobio novi smisao. Sam Hubble učinit će sljedeći ključni korak: povezati udaljenost galaksija i crveni pomak. Crveni pomak, pomak spektralnih linija u odnosu na njihove laboratorijske valne duljine, znači da se galaksija udaljava od nas. Hubbleov dijagram pokazao je da je brzina udaljavanja to veća što je galaksija udaljenija. Galaksije ne bježe od nas, niti mi imamo ikakav središnji ili privilegirani položaj u Svemiru. Hubbleov se dijagram može shvatiti u smislu širenja Svemira koji sa sobom odvlači galaksije, geometrijski lako se vidi da će udaljenija galaksija imati i veću brzinu bijega. Širenje će se isto tako vidjeti i s bilo koje druge galaksije ili položaja u Svemiru. Hubble je otkriće objavio 1929. godine.

Sa svjetlosnom moći najvećih teleskopa na tlu, ili prostornim razlučivanjem Hubble Space Telescope, moglo se dosegnuti do cefeida u jatu galaksija u zviježđu Djevice što se nalazi na udaljenosti od 15 Mpc (oko 50 miljuna svjetlosnih godina, sg). U

razmjerima vidljivog Svemira to je tek sam početak, i kozmološki efekti još se ne naziru. Potraga za kritičnom gustoćom i faktorom decelaracije pokazala je da se kozmološki modeli znatnije razlikuju tek na crvenom pomaku $z \sim 1$.

Hubbleov zakon i kozmološki crveni pomak

(Ovaj okvir zahtijeva poznavanje naprednije matematike, sam tekst je moguće pratiti i bez njegovog potpunog razumijevanja.)

Zbog širenja Svemira, valne se duljine fotona također povećavaju razmjerno povećanju kozmičkih udaljenosti. Ako u trenutku emitiranja, t_1, zračenje ima valnu duljinu λ_1, a detektirano zračenje u trenutku t_2 valnu duljinu λ_2 tada je promjena veličine Svemira,

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{R(t_2)}{R(t_1)}. \tag{1}$$

Uzet ćemo vrijeme t_2 kao referentno vrijeme t_0 (za koje je $R = 1$), tako da prethodna jednadžba dobiva novi oblik,

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{1}{R(t)}. \tag{2}$$

Definiramo crveni pomak, z, kao

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \tag{3}$$

gdje je $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda$, tako da je $\lambda_0/\lambda = 1 + z$. To u sljedu daje

$$1 + z = \frac{1}{R(t)}. \tag{4}$$

Primijetimo, obzirom da je zračenje emitirano prije referentne epohe, $R(t) < 1$, tako da je u tom slučaju $z > 0$.

Izvedimo sada približan izraz za crveni pomak zračenja emitiranog u trenutku Δt u bliskoj prošlosti, dakle za $\Delta t \ll t_O$. Koristeći Taylorov razvoj, imat ćemo

$$1/R(t_0 - \Delta t) \simeq R(t_0) + \delta t\, \dot{R}(t_0) \simeq 1 + \Delta t\, \dot{R}(t_0). \tag{5}$$

Povežimo sada jedn. (5) s jedn. (4) koja izražava crveni pomak s faktorom skale. Dobivamo

$$1 + z \simeq 1 + \Delta t\, \dot{R}(t_0). \tag{6}$$

Brzinu promjene faktora skale u trenutku $t = t_0$ izrazit ćemo veličinom $H_0 = \dot{R}(t_0)$, tako da dobivamo izraz

$$z \simeq H_0\, \Delta t. \tag{7}$$

Ako je fotonu trebalo Δt da stigne do nas, morao je biti emitiran s udaljenosti $d = c\,\Delta t$. Jedn. (7) tako možemo prepisati u novom obliku,

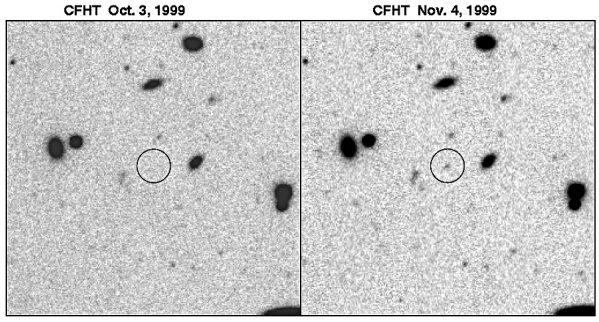
$$cz \simeq H_0\, d \tag{8}$$

što je rezultat koji je iz opažanja galaksija dobio Edwin Hubble: što je galaksija udaljenija, njezin je crveni pomak veći. Izraz (7) naziva se Hubbleov zakon.

Treba naglasiti, da do crvenog pomaka u spektru daleke galaksije dolazi zbog širenja prostora, a ne Dopplerovog efekta zbog gibanja galaksije kroz prostor. Dakle, govorimo o kozmološkom crvenom pomaku a ne Dopplerovom efektu.

Na tako velikim udaljenostima nema mnogo mogućnosti za postavljanje mjerne markice. U bljesku supernova sadržana je ogromna energija, gotovo ukupna potencijalna

energija zvijezde. Supernova u kratkom vremenskom trajanju oslobađa energiju jednaku energiji zračenja 20 milijardi zvijezda poput Sunca! U maksimumu sjaj je supernova gotovo jednak sjaju cijele galaksije. Zbog toga se mogu vidjeti na kozmološkim udaljenostima – jedino je potrebno utvrditi mogu li poslužiti kao standarne svijeće.



Slika 2. Supernova SN 1999fv (nazvana "Dudley DoRight", prema popularnom junaku iz stripova) jedna je od najudaljenijih otkrivenih supernova. Nalazila se na udaljenosti od 8 milijardi svjetlosnih godina ($z = 1.23$) i udaljavala se od nas brzinom od 80% brzine svjetlosti.

Do zvjezdanog kolapsa može doći na dva načina. Jedan je konačni stadij razvoja zvijezde velike mase, barem desetak masa Sunca. Zvijezda održava mehaničku (hidrostatsku) ravnotežu zahvaljujući oslobađanju energije u termonuklearnim reakcijama. Fuzijski se procesi događaju tek u središnjici, manjem, središnjem dijelu zvijezde (jezgri zvijezde), gdje je dovoljno visok tlak, a onda i temperatura. Jezgra atoma željeza ima najveću energiju vezanja po nukleonu – zbog strukture atomskih jezgri, energija se oslobađa prilikom stvaranja sve težih elemenata, ali samo do atoma željeza. Trenutak stvaranja jezgri atoma željeza, za zvijezdu ujedno znači i kraj razvoja jer nakon toga gubi svoj glavni izvor energije. Zbog toga će doći do kataklizmičkog poremećaja ravnoteže, kolapsa željezne središnjice gotovo u slobodnom padu, te nastanku udarnog vala koji će razoriti vanjski dio zvijezde. Eventualno, tlak degeneriranog plina neutrona može zaustaviti kolaps središnjice te će nastati neutronska zvijezda. U još snažnijem gravitacijskom kolapsu zvijezda vrlo velikih masa može nastati crna rupa. Upravo iz razloga što kolaps središnjice ovisi o masi, oslobođena energija (bljesak) supernove bit će različit, i supernove tipa II nisu pouzdane standardne svijeće. Supernove tipa Ia, čiji spektar karakterizira potpuni nedostatak vodikovih linija, imaju drugačiji mehanizam okidanja eksplozije. Tijekom razvoja zvijezda u dvojnom sustavu može doći do prijenosa tvari na komponentu koja je bijeli patuljak. Bijeli patuljak je u početnoj fazi razvoja bio komponenta s većom masom od svog pratioca i zbog toga je ranije dosegao fazu degenerirane zvijezde. Subrahmyan Chadrasekhar je 1932. godine dokazao da zvijezde ispod strogo određene mase (od tada poznate kao Chadrasekharova granica) završavaju svoj razvoj kao stabilne zvijezde u kojima ravnotežu gravitacijskoj sili održava tlak degeneriranog elektronskog plina (elektroni su fermioni i moraju zadovoljiti Paulijev princip isključenja). Bijeli patuljci izgubili su važno svojstvo zvijezda: u njihovim središnjicama više nema termonuklearnih reakcija. Ukoliko se dodatna tvar gomila na površini bijelog patuljka, u jednom će tenutku njegova masa dosegnuti kritičnu Chadrasekharovu granicu. Pokretanje fuzije u vodikovom omotaču svježe pristiglog materijala, pokrenut će termonuklearni proces u ugljiku (bijeli patuljci sadrže ugljik i kisik iz ranijih procesa dok je zvijezda još mogla održavati gorenje helija u svojoj središnjici). Reakcije se naglo i nezaustavljivo šire cijelom zvijezdom koju taj proces

nepovratno raznese. Oslobođena energija je veća nego kod supernova tipa II, što supernove tipa Ia čini još atraktivnijim odabirom za standardne svijeće. Još važnije, maksimum sjaja fino je podešen jer je eksplozija (oslobođena energija) određena identičnom masom. Mnogo je opažačkih napora uloženo u kalibraciju supernova tipa Ia kao standardnih svijeća prije nego se pomoću njih mogla odrediti povijest, a onda i budućnost Svemira.

Dinosaurusi, Nemesis i supernove

Berkeley je vjerojatno najpoznatiji američki gradić. Sjedište je jednog od niza kalifornijskih sveučilišta, a proslavio ga je Lawrence Berkely Laboratory (LBL), ranije poznat kao Lawrence Radiation Laboratory, centar za akceleratorsku fiziku. Ubrzavajući atomske jezgre na energije više milijardi elektronvolti, ovdje je fuzijskim nuklearnim reakcijama stvoren niz teških elemenata koji u prirodi ne postoje jer se vrlo brzo raspadaju u manje, stabilne jezgre. Tako su u periodičnu tablicu elemenata ušli berkelium i kalifornium.

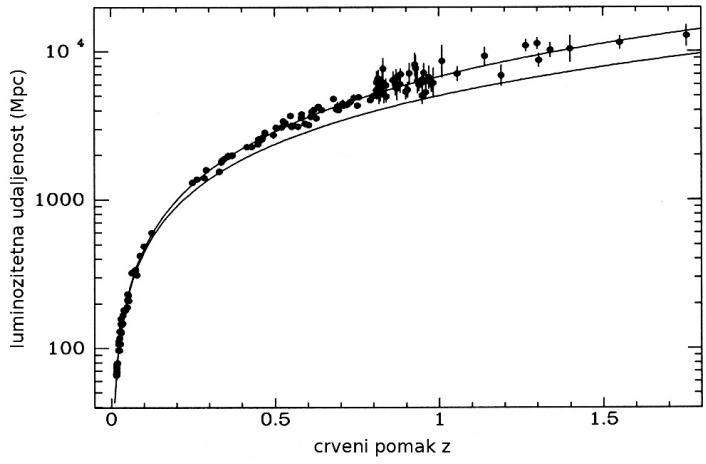
Daljnji razvoj fizike visokih energija i gradnja sve većih i složenijih akceleratora čestica, nije se dogodio u Berkeleyu, već na drugim mjestima kao Stanford Linear Ačelarator Center, Fermi National Accelarator Laboratory blizu Chicaga, CERN-u kraj Geneve ili drugdje. U novim se uvjetima LBL vremenom odmiče od eksperimentalne čestične fizike, a sticajem okolonosti jedno od novih područja istraživanja bit će astrofizika. Poznati fizičar Luis Alvarez koji je u pionirskom periodu surađivao s Ernestom Lawrenceom u gradnji akceleratora, zainteresirao se za cijeli niz astronomskih problema.

Oko 1980. godine Alvarez s timom geologa i geokemičara istražuje uvjete koji su pred nekih 65 milijuna godina doveli do izumiranja dinosaura. Njihova je pretpostavka udar u Zemlju kometa ili asteroida veličine desetak kilometara što je podiglo prašinu i prouzročilo tamu u dugom periodu. Unatoč velikom skepticizmu u znanstvenim krugovima, veliki krater na poluotoku Yucatan iz istog vremena kada su sa Zemlje iščezli dinosauri, velik je prilog u Alvarezovoj teoriji. Richard Muller, fizičar u Alverezovoj grupi, smiono je otišao još dalje, pretpostavivši da Sunce ima pratioca. Muller ga je nazvao 'Nemesis', crvenog patuljka u jako ekscentričnoj putanji oko mnogo masivnijeg Sunca.

Gravitacijska sila Nemesisa, u njegovom prolasku perihelom, još uvijek stotinjak puta dalje od posljednjih planetarnih orbita, može poremetiti putanje kometa u Oortovom oblaku. Tako preusmjereni kometi, poput kometarnog roja, padaju prema Suncu, a poneki se na tom putu mogu sudariti sa Zemljom. Prema Mulleru to se događa periodično, svakih 26 milijuna godina. Muller se nije zadovoljio samo potragom za geološkim ili geokemijskim dokazima periodičnih udara na Zemlju već je osmislio potragu za Nemesisom. Nakon Sunca to bi bila najbliža zvijezda, koju zbog svog vrlo slabog sjaja astronomi nisu još otkrili. Muller je sa suradnicima osmislio potpuno robotički teleskop koji ne samo da je automatizirano mogao snimati unaprijed zadana područja neba nego je softwarski potpuno impersonalno analizirao prikupljene snimke. Robotički je teleskop bio postavljen na Leuschner Observatory na kampusu Sveučilišta u Berkeleyu. Robotička potraga za Nemesisom imala je slab napredak, Nemesis nije nikada pronađen, a robotički je teleskop u međuvremenu dobio novu namjenu. Muller je uočio da bi teleskop bio učinkovitiji u potrazi za supernovama u dalekim galaksijama. S malim preuređenjem softwarea teleskop je mogao po unaprijed pripremljenom planu

snimati galaksiju po galaksiju, dan za danom, tjedan za tjednom, a onda ih međusobno uspoređivati tražeći uljeza na snimci. Svaki novi objekt koji bi se pojavio, lako bi se trebao detektirati u razlici snimaka iz dvaju ili više opažanja. Uostalom, to je postupak kojim su se služili astronomi, samo ne na potpuno automatizirani način na robotičkom teleskopu. Sredinom 80-tih godina Mullerova je grupa na LBL u suradnji s astronomima iz Berkleya imala već prve rezultate. U tom trenutku u Mullerovu grupu ulazi Saul Perlmutter.

Permutter je diplomirao fiziku na Harvardu. Na doktorski studij u Berkely doveo ga je interes za eksperimentalnom fizikom i to u području fizike čestica. Ne želeći sudjelovati u velikim projektima koji su uključivali više desetaka, pa i stotina istraživača, činilo mu se da astrofizika pruža dovoljno zanimljivih projekata od fundamentalnog značaja, naročito u području visokih energija. Impresioniran zamislima Richarda Mullera i suradnika, Perlmutter se pridružuje projektu. Perlmutter ubrzo radi na doktorskoj disertaciji pod vodstvom Mullera dalje razvijajući tehniku robotskog teleskopa u potrazi za hipotetičkom zvijezdom Nemesis. Inspiriran mogućnostima automatskih pregleda neba, ostaje u Mullerovoj grupi u Berkleyu i kao postdoktorski suradnik, kada preusmjerava projekt prema potrazi za supernovama i postaje još jedan od fizičara koji su prešli u astrofizička istraživanja.



Slika 3. Hubbleov dijagram do crvenog pomaka $z \approx 1.7$ (Svemir je tada bio 2.7 puta manji nego danas), dobiven iz opažanja supernova tipa Ia. Na apscisi je crveni pomak zamijenio brzinu, a na ordinati je prikazana luminozitetna udaljenost do tih standardnih svijeća. Gornja i donja krivulja prikazuju predviđanja dva kozmološka modela: $\Omega_{\mathrm{M}} = 0.3$ i $\Omega_{\Lambda} = 0.7$ (gornja krivulja), te $\Omega_{\mathrm{M}} = 1$ i $\Omega_{\Lambda} = 0$ (donja krivulja). Podaci podupiru gornju krivulju – kozmologiju kojom dominira tamna energija. Rezultati istraživanja Nobelovaca Perlmuttera, Schmidta, Adamsa i suradnika iz 1988. i 1989. godine dosegla su crveni pomak $z \sim 1$. Supernove otkrivene na još većim udaljeostima rezultat su nastavka istraživanja i definitivno podupiru njihov model.

Do kraja 80-tih godina, automatiziranom potragom za supernovama LBL grupa je otkrila preko dvadesetak supernova. Sve su to bile supernove u galaksijama bliskih Mliječnom Putu, do udaljenosti od nekoliko stotina milijuna parseca (Mpc). Da bi

se uhvatilo supernove u dalekim galaksijama, na kozmološkim udaljenostima, bio je potreban ili veći teleskop ili osjetljiviji detektor. Nekako u to vrijeme astronomi počinju primjenjivati CCD poluvodičke detektore koji će zahvaljujući svojoj osjetljivosti i linearnosti uskoro revolucionizirati opažačku astronomiju. Perlmutter i suradnici tada će značajno redizajnirati svoj uređaj i usmjeriti ga za potragom supernova od kozmološkog značaja kojima bi se mogla vrlo točno odrediti Hubbleova konstanta (H) i prosječna gustoća tvari u Svemiru (Ω). Otuda i ime grupe 'Supernova Cosmology Project' (umjesto prvotne namjene 'Omega Project').

Uspjeh danskih astronoma i promjena strategije

U kolovozu 1988. godine, konačno, prvo veliko otkriće, detektirana je supernova tipa Ia u galaksiji na udaljenosti $z = 0.31$. Međutim, otkriće je došlo s La Palme, na Kanarskim otocima, a ne iz Kalifornije. Grupa danskih, australskih i britanskih astronoma, koristeći relativno mali teleskop opremljen CCD detektorom nakon dvogodišnje sustavne potrage bilježi prvi veliki rezultat. Iako uspjeh, istraživači ga doživljavaju kao neuspjeh iz prilično jednostavnog razloga: već jednostavna procjena pokazuje da bi s učestalosti supernova tipa Ia, 2-3 supernove u tisuću godina, za određivanje omege trebalo pratiti barem tisuću galaksija u tijeku nekoliko godina – njihova potraga dala je tek jednu supernovu tipa Ia u dvije godine što znači da bi za projekt bilo potrebno nekoliko desetljeća. Možda čak i ne bi odustali od daljnje potrage da iste godine njihov prijedlog projekta potrage za supernovama na Hubble Space Telescope nije bio odbijen. Iako su danski astronomi učinili prijelomno otkriće pokazavši da je otkriće supernova na kozmološkim udaljenostima izvedivo, na kraju projekt ostaje isključivo američka stvar.

Perlmutter i suradnici bili su svjesni da samo promjena opažačke strategije može dati rezultat u razumnom vremenu. Kao prvo, potreban je veći teleskop na boljem položaju. Ubrzo, u suradnji s britanskim kolegama, Supernova Cosmology Project ima odličan rezultat, supernovu na $z = 0.458$ otkrivenu na 4-m William Herscehl Telescope na La Palmi. I kao drugo, još važnije, Saul Perlmutter uvodi novi slijed opažanja: prva serija snimaka dubokog polja s tisućama galaksija prije Mjesečeve prve četvrti, te druga serija snimaka poslije posljednje četvrti, tri tjedna kasnije. Zahvaljujući sve snažnijim računalima, slike je bilo moguće procesirati u nekoliko sati. Tako je još uvijek ostalo tjedan dana 'tamnih' noći za dodatna opažanja otkrivenih supernova, prije svega za spektroskopska opažanja koja su omogućavala karakterizaciju i određivanje crvenog pomaka. Ostalo je još jedino uvjeriti programske odbore na velikim teleskopima da je postupak izvediv. Problem je što se tradicionalno teleskopsko vrijeme dijeli na temelju znanstvenih prijedloga, barem pola godine ranije. U slučaju supernova, opažačko vrijeme na velikom bi se teleskopu dodijelilo za opažanje supernova koje još uopće nisu niti otkrivene. Astronomi su bili vrlo skeptični da će Perlmutter uspjeti promijeniti uvriježen način dodjele teleskopskog vremena jer je ionako većina velikih teleskopa pretrpana zahtjevima.

Otkriće Mark Phillipsa vjerojatno je bilo presudno u promjeni paradigme dodjele teleskopskog vremena kako ga je obrazlagao Saul Perlmutter. Phillips je 1993. godine objavio rezultate svojih istraživanja supernova Ia kao standardnih svijeća, pokazavši izvan svake sumnje da se radi o pouzdanim standardnim svijećama. Također je otkrio vezu između njihovog maksimalnog sjaja i brzine opadanja sjaja: sjaj sjajnijih supernova opada sporije od supernova manjeg sjaja. Perlmutter je odmah uočio važnost 'faktora rastezanja', kao što je jedna druga grupa istraživača također ozbiljno shvatila Phillipsov uvjerljiv dokaz da se supernovama tipa Ia pouzdano mogu mjeriti kozmološke udaljenosti.

Druga se grupa nalazila na drugoj, istočnoj, američkoj strani, na harvardskom sveučilištu. Rober Kirschner, profesor astronomije, baš kao i Perlmutter bio je harvardski diplomac i kalifornijski doktorant, samo nešto stariji. Zanimanje Kirschnera za supernove potječe iz neposrednog utjecaja Fritza Zwickya – Kirchner je imao kabinet do Zwickyjevog, u podrumu zgrade. Zwicky je bio od one vrste istraživača koji bi svakog jutra imalu novu teoriju. Neke, koliko god bile 'otkvačene' i daleko ispred vremena pokazale su se točnima – Zwicky je prvi koji je predvidio postojanje tamne tvari u svemiru. Zwicky je također prvi prepoznao važnost supernova, što više, uočio je njihovu razliku prema novama, i dao objašnjenje koje se u glavnim crtama, pokazalo točnim. Nakon Phillipsovog članka, Kirschner se sa svojim (mladim) suradnicima okreće supernovama tipa Ia. Kirchner početkom 1994. godine započinje projekt i vodstvo povjerava Brianu Schmidtu koji je pod njegovim vodstvom upravo doktorirao proučavanjem supernova tipa II i mogućnosti da ih se iskoristi za mjerenje udaljenosti. Schmidt okuplja Kirschnerove studente, Petera Garnavicha koji je također upravo obranio doktorsku disertaciju, Adama Reissa, koji stiže na doktorski studij iz Berkeleya, i druge. Kasnije će u harvardsku grupu, koja će se zvati 'High-Z Supernova Project', preći jedan od najboljih poznavatelja supernova, Alex Fillipenko. Prijelaz Fillipenka u harvardsku kolaboraciju je utoliko zanimljivo što je on prvo započeo suradnju s Perlmutterom u Berkeleyu, gdje je profesor u astronomskom odsjeku. Na kraju će Fillipenko biti jedini autor koji se pojavljuje u oba najutjecajnija članka ovih grupa za koje su vodeći autori nagrađeni Nobelovom nagradom.

Pored organizacijske uloge, Scmidt je na sebe preuzeo zadatak oblikovanja i unapređenja softwarea kojim će se pretraživati snimci i detektirati supernove. To je ujedno i ključni zadatak u cijelom projektu jer se mora obaviti vrlo brzo i pouzdano kako bi se supernove još stiglo opažati i prikupiti podatke o njihovim svjetlosnim promjenama i spektroskopskim karakteristikama.

Iz obiteljskih se razloga Brian Schmidt uskoro seli u Australiju, i dobiva posao na Mount Strmlo Observatory blizu Canberre. Ne trebate zaboraviti da je 1995. godine internet bio vrlo spor i spuštanje samo jednog snimka iz Čilea do Australije trajalo je punih 48 sati – prava noćna mora za Briana Schmidta. Unatoč tome, harvardska je grupa relativno brzo sustigla kalifornijsku jer nije morala raditi iz temelja, Perlmutterovu su strategiju iskoristili Brian Schmidt i suradnici. Štoviše, grupa ubrzo prelazi u prednost jer Adam Reiss uspjeva razviti novi način interpretacije svjetlosnih krivulja supernova.

Adam Reiss diplomirao je fiziku na MIT-u 1992. godine i činilo mu se potpuno prirodnim spustiti niz rijeku Charles koja dijeli Cambridge od Bostona i nastaviti doktorski studij na Harvardu. Iako bez mnogo predznanja, upisao je doktorski studij astrofizike. U drugom semestru kada se od doktorskih studenata očekuje prijava teme, obratio se Irwinu Shapiru, tada voditelju astrofizičkog studija. Reiss se prisjeća Shapirovih riječi: ako se on (Reiss) odluči raditi kod njega, on (Shapiro) je toliko zauzet da neće moći provjeriti njegove rezultate, tako da će biti najbolje da su ispravni. Reiss se radije odlučio za Kirchnera koji je ponudio cijeli niz tema o supernovama. Reiss je s Kirchnerom krenuo od Phillipsovog članka. Ubrzo će statističkim metodama značajno poboljšati analizu oblika svjetlosnih krivulja supernova. Iz detalja svjetlosnih promjena mogao je precizno odrediti maksimalni sjaj što je u konačnici dalo udaljenosti do supernova s velikom točnosti. Rezultati su objavljeni 1996. godine – više nije bilo nikakve dvojbe da su supernove tipa Ia vrlo pouzdane standardne svijeće.

Friedmannova jednadžba i modeli Svemira

(Ovaj okvir zahtijeva poznavanje naprednije matematike, sam tekst je moguće pratiti i bez njegovog potpunog razumijevanja.)

Ruski fizičar Alexander Friedmann našao je 1922. godine dinamičko rješenje Einstenovih jednadžbi polja. Einsten je u svom rješenju naprasno dodao član koji djeluje kao odbojna sila i ima protudjelovanje na konvencionalu privlačnu gravitacijsku silu. Član je nazvan kozmološka konstanta. Iako dugo vremena napuštena u teorijskim kozmološkim sitraživanjima, rezultati opažanja dalekih supernova pokazala su da se Svemir širi ubrzano. Einstenova kozmološka konstanta se u jednadžbama može pojaviti npr. ako postoji tamna energija.

Friedmannove jednadžbe raspisane u Friedmann-Robertson-Walkerovoj metrici s dodatkom kozmološke konstante Λ glase:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} \qquad i \tag{9}$$

$$\frac{\ddot{R}}{R}^2 = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho c^2 + 3P) + \frac{\Lambda}{3} \tag{10}$$

gdje je ρ gustoća Svemira, P tlak plina, a k zakrivljenost Svemira. Brzina svjetlosti c i G su konstanta gravitacije. Treća jednadžba ostaje nepromjenjena:

$$\dot{\rho}\, c^2 = -3\frac{\dot{R}}{R}(\rho c^2 + P). \tag{11}$$

Iz jedn. (10) očigledno je da će dovoljno pozitivna vrijednost Λ učiniti $\ddot{R}$ pozitivnim, tj. dovesti do ubrzanog širenja Svemira, nasuprot usporavanja širenja koje bi bilo u slučaju da nema Λ. Iz jednadžbe (9) vidimo da kozmološka konstanta efektivno predstavlja dodatnu gustoću energije:

$$\epsilon_\Lambda = \frac{c^2}{8\pi G}\Lambda. \tag{12}$$

Međutim, iz gornje jednadžbe proizlazi važna posljedica: ako je Λ konstantna, onda će i ϵ_Λ, gustoća energije, također biti konstantna, a ne opadati kada R raste s vremenom (razlog za ovu naizgled proturječnu posljedicu je negativni tlak vakuuma). Prema tome će, nakon što R naraste dovoljno velikim, Λ postati dominantan član na desnoj strani jedn. (9):

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = H^2 \simeq \frac{\Lambda}{3}. \tag{13}$$

Proizlazi eksponencijalno, ubrzano širenje Svemira:

$$R(t) = e^{(\Lambda/3)^{1/2}}\, t = e^{H\,t}. \tag{14}$$

Kad bi Λ ostala dominantna, ova bi faza trajala zauvijek. Nasuprot Svemiru bez kozmološke konstante, kod kojeg sve veći volumen postaje vidljiv kako vrijeme odmiče, u ubrzavajućem širenju Svemira postoji određena granica iza koje nas svjetlost dalekih galaksija više neće moći dosegnuti. Štoviše, galaksije unutar horizonta imat će sve veći i veći crveni pomak, te će na taj način iščezavati kako će se crveni pomak povećavati u beskonačnost.

Opažanja supernova i mikrovalnog pozadinskog zraenja za najrelevantniji model realnog Svemira daju onaj s kozmološkom konstantom različitom od nule i ravnim prostorom. U tom slučaju $k = 0$ te se iz Friedmannove prve jednadžbe (9) može pokazati da u bilo koje vrijeme mora vrijediti:

$$\Omega_{\rm M} + \Omega_\Lambda = 1. \tag{15}$$

U gornjoj je jednadžbi $\Omega_{\rm M} = \rho/\rho_c$, a $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2$.

Otkriće ubrzanog širenja Svemira

Ubrzo nakon obrane doktorske disertacije Reissu stiže poziv Saula Perlmuttera iz Supernova Cosmology Projecta. Reiss odlazi u Berkley, ali umjesto Perlmutterovoj grupi, pridružuje se Alexu Filippenku, profesoru u odsjeku za astronomiju. Filippenko je napustio Perlmutterovu grupu koja je za njegov ukus bila isuviše formalno organizirana i pridružio se Schmidtovoj harvardskoj grupi koja je više bila skupina individualaca. S članovima razbacanim po svijetu i s dva gotovo najvažnija člana u Berkeleyu, dogodilo se da su dvije istraživačke grupe gotovo u susjedstvu. Rivalstvo je gotovo doseglo vrhunac i rušenjem stare kozmološke paradigme koje će se ubrzo dogoditi, Berkeley će se još jednom naći u središtu vijesti.

Sredinom 1997. godine Saul Perlmutter se odlučio na objavu prvih rezultata. Sa samo sedam supernova na kozmološkim udaljenostima, rezultati će zaprepastiti kozmologe – činilo se da je $\Omega_{\mathrm{M}} \sim 1$, što je značilo da kozmološka konstanta blizu 0. Ipak, svima je bilo jasno da iz tako malog uzorka rezultati nisu vjerodostojni. Novi će pak rezultati biti još iznenađujući.

U siječnju 1998. godine, Supernova cosmology Project objavljuje svoje nove rezultate na sastanku Američkog astronomskog društva u Washingtonu, D.C. Perlmutter je sada mnogo obazriviji u interpretaciji jer su sistematske pogreške i dalje prilično velike. Zato se vijest koju je objavio Alex Fillipenko na sastanku astrofizičara južne Kalifornije u veljači da se kozmološka konstanta ne može više smatrati jednakom nuli brzo proširila i dobila izvanredno veliki publicitet. Uskoro će slijediti definitivne publikacije, Reiss i suradnici iz *High-Z Supernova Project* objavljuju svoj rad u *Astronomical Journal* 1998. godine, Perlmutter i suradnici iz *Supernova Cosmology Project* svoj rad u *Astrophysical Journal* 1999. godine. Reiss u uzorku ima samo 16 supernova, Perlmutterov je uzorak više nego dvostruko veći (42 supernove). Zaključak oba projekta bio je isti: širenje Svemira je ubrzano, gustoća energije vakuuma je veće od gustoće energije tvari (barionske i tamne), za Svemir koji je ravan, a to čvrsto pokazuju mjerenja kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja, $\Omega_{\Lambda} \simeq 0.7, \Omega_{\mathrm{M}} \simeq 0.3$.

Epilog

Opažačka istraživanja dalekih supernova koja su gotovo u natjecateljskom duhu vodila dva istraživačka tima predvođena astrofizičarima Saulom Perlmutterom s jedne i Brianom Schmidtom s druge strane, uz ključnu ulogu Adama Reissa, dovela su do otkrića ubrzanog širenja Svemira. Njihovo otkriće otvara nova velika pitanja u kozmologiji, prije svega porijekla tamne energije – nesklad sa standardnim modelom u fizici čestica toliko je velik da se ne očekuje pronalaženje brzog rješenja ovog problema.

Albert Einstein je jednom izjavio da mu je od svega najmanje shvatljivo da se Svemir uopće može shvatiti. Možda je znao nešto više, nešto što još dugo nećemo dokučiti.