

Sprengistjarnan SN1987A

Einar H. Guðmundsson, Raunvísindastofnun Háskólans

Inngangur

Klukkan rúmlega hálf átta að morgni mánudagsins 23. febrúar 1987 að íslenskum tíma skall á jörðina öflug hrina fiseinda frá fjarlægri sprengistjörnu. Á um það bil tíu sekúndum flæddu 10^{28} fiseindir gegnum jörðina og héldu áfram ferð sinni eins og ekkert hefði í skorist. Örlítill hluti þeirra náði þó að víxlverka við jarðneskar eindir og í nokkrum tilfellum sáust merki um slík ferli í sérhönnuðum mælitækjum öreindafræðinga.

Fyrir okkur jarðarbúa markar þessi sérstæði atburður nokkur tímamót, þar sem þetta er í fyrsta sinn í sögunni, sem fiseindageislun hefur mælst frá uppsprettu utan sólkerfisins. Sumir hafa jafnvel tekið svo sterkt til orða, að þennan morgun hafi ný grein stjarnvísindanna, fiseindastjörnufræðin, séð dagsins ljós í fyrsta sinn.¹

Bæði tímalengd fiseindablossans og orka þeirra fiseinda sem mælingarnar náðu til er í fullu samræmi við þá mynd af stjörnusprengingum sem stjarn-eðlisfræðingar hafa verið að setja saman á undanförmum áratugum: Orsök hamfara af þessu tagi er talin vera sú að samþjappaður kjarni risastjörnu hrynur saman undan eigin þunga og verður að nifteindastjörnu. Við þyngdarhrunið myndast mikill fjöldi orkumikilla fiseinda, sem bera burtu svo til alla bindiorku stjörnukjarnans, en jafnframt myndast öflug höggbylgja er þeytir yfirborðslögum risastjörnunnar út í geiminn með miklum gauragangi.²

¹Um þetta atriði má þó deila, því að í fjölda ára hafa verið í gangi mikilvægar mælingar á fiseindaútgeislun sólarinnar, og hafa þær meðal annars leitt í ljós hið svokallaða "fiseindavandamál" ("the solar neutrino problem", sjá t.d. Bahcall og fél. (1988)).

²Þessi lýsing á við um sprengistjörnur af svokallaðri gerð II (Type II), en nýja sprengistjarnan telst einmitt vera í þeim flokki. Stjörnusprengingar af gerð I verða væntanlega þegar hvítur dvergur í þéttstæðu tvístirni hrynur saman undan eigin þunga og springur síðan í tætlur. Sjá t.d. grein Helfands (1987). Gott og ítarlegt almennt yfirlit um sprengistjörnur er að finna í greinum eftir Trimble frá 1982 og 1983.

Hér á eftir verður fjallað nánar um nokkra þætti þessarar sögu sem og ýmis önnur atriði í tengslum við nýju sprengistjörmunu. Það er ekki ætlunin að kafa djúpt í smáatriði heldur verður fyrst og fremst leitast við að gefa stutt yfirlit um þetta áhugaverða efni. Af þeim sökum verður óspart vitnað í aðrar rit-smíðar, sem menn geta leitað til um nánari upplýsingar og fróðleik, ef á þarf að halda.

Uppgötvunin³

Það kom í hlut kanadíska stjörnufræðingsins Ians Sheltons við stjörnuathugunarstöðina í Las Campanas í Chile að uppgötva nýju sprengistjörmunu um það bil tuttugu klukkustundum eftir að fiseindapúlsinn hafði farið í gegnum jörðina. Stjarnan, sem var í næsta nágrenni ljómþokunnar miklu, 30 Doradus (eða Tarantula) í Stóra Magellanskýinu, hafði þá náð fimmta birtustigi. Aðrir stjörnuskoðarar komu einnig auga á stjörmunu um svipað leyti, og einn þeirra hafði jafnvel tekið mynd sem sýnir hana á sjötta birtustigi þremur klukkustundum eftir fiseindablossann. Myndatökumaðurinn hafði þó ekki tekið eftir neinu óvenjulegu, enda var ekki við því að búast vegna þess hversu dauf stjarnan var. Myndina framkallaði hann ekki fyrir en löngu seinna og missti þannig af uppgötvun aldarinnar. Í samræmi við alþjóðlegt samkomulag um nafngiftir á stjarnfræðilegum fyrirbærum fékk nýja sprengistjarnan strax nafnið SN1987A.⁴

Fréttir af fiseindamælingunum bárust ekki fyrir en nokkrum dögum eftir að sprengistjarnan sást fyrst með berum augum, og um tíma ríkti nokkur óvissa um hvað gerst hafði. Hópur ítalskra og sovéskra vísindamanna tilkynnti um mælingu á fiseindablossa í mælitæki í jarðgöngum í Mont Blanc klukkan 2:52 að íslenskum tíma aðfaranótt 23. febrúar. Mælingar japanskra öreindafræðinga í Kamiokanámunni nálægt Tókíó sýndu aftur á móti svipaðan blossa klukkan 7:35, eða rúmlega fjórum og hálfri klukkustund síðar. Mælingar bandarískra vísindamanna í saltnámu í Ohio staðfestu niðurstöður Japananna, en hvorugur hópurinn varð var við, að neitt óvenjulegt hefði gerst klukkan

³Mun ítarlegri lýsingu á atburðarásinni er meðal annars að finna í vikuritinu Time (23. mars 1987), í júlíhefti tímaritsins Discover (1987) og í mörgum fréttapistlum í stjörnufræðitímaritinu Sky and Telescope. Sjá einnig greinar Helfands (1987) og Henbest (1987) og bók Nørgaards (1988).

⁴SN = supernova. 1987A = Fyrsta stjarnfræðilega fyrirbærið af þessari gerð sem fannst árið 1987.

2:52. Skömmu seinna bárust þær fréttir frá sovéskri mælistöð í fjöllum Kákasus að þar hefðu mælst tveir fiseindablossar, einn mjög daufur klukkan 2:52, og annar mun sterkari klukkan 7:35⁵.

Í dag, rúmlega einu og hálfu ári eftir atburðinn, mun það vera álit flestra sérfræðinga á sviði fiseindamælinga að mælinguna á "fyrrri" blossanum beri ekki að taka alvarlega; það sé eingöngu "seinni" blossinn klukkan 7:35 sem tengist sprengingunni í Stóra Magellanskýinu. Ekki er þó alveg ljóst hvernig sérfræðingarnir vilja útskýra mælinguna klukkan 2:52 og einstaka vísindamenn telja að um raunverulegt merki hafi verið að ræða. Fleiri en einn hafa varpað fram þeirri hugmynd að blossarnir hafi í raun og veru verið tveir og að þeir sýni svart á hvítu að þyngdarhrun hafi orðið tvisvar: Fyrst hafi myndast nifteindastjarna, sem lifði í fjóra og hálfu klukkustund en hrundi þá saman og myndaði svarthol⁶. Eins og áður sagði eru þeir fáir sem telja þetta trúverðugan möguleika.

Um svipað leyti og fréttir af fiseindamælingum flugu um heimsbyggðina bárust einnig fregnir af því, að klukkan 2:52 hefðu komið fram merki á þyngdarbylgjumælum í Róm og í Maryland í Bandaríkjunum⁷. Þrátt fyrir það að merkin hafi sést á sama tíma og "fyrrri" fiseindablossinn hafa fáir viljað taka nokkurt mark á þessum mælingum. Meðal annars hefur verið á það bent, að hafi merkin raunverulega borist frá sprengistjörnunni, hafi um þúsund sólar-massar af efni ummyndast í hreina þyngdarbylgjuorku við sprenginguna. Þetta fær augsýnilega ekki staðist. Þá hefur einnig verið bent á það, að á þeim tíma sem merkin sáust hafi verið þrumuveður í Maryland og jarðhræringar í Róm og sé þar að finna mun líklegri skýringu á merkjunum en stjörnu-sprenginguna.

Það vakti talsverða athygli á sínum tíma að þessi tvö mælitæki, sem eru nokkuð komin til ára sinna og ekki kæld niður undir alkul eins og nýrri og mun næmari namar, voru einu þyngdarbylgjunemarnir í notkun á þessari mikilvægu stundu. Öll hin tækin voru í skoðun! Ástæðan fyrir þessari tilviljun reyndist vera mjög einföld: Nemarnir eru mjög viðkvæmir fyrir hvers kyns

⁵Niðurstöðum fiseindamælinganna er lýst í eftirfarandi greinum: Aglietta og fé. (1987a,b). Hirata og fé. (1987). Bionta og fé. (1987). Alexeyev og fé. (1988). Þar er einnig að finna lýsingu á mælitækjunum, sem notuð voru.

⁶Sjá t.d. De Rújula (1987).

⁷Niðurstöðum mælinganna í Róm er meðal annars lýst í grein Amaldi og fé. (1987).

truflunum, og þyngdarbylgjur, jafnvel frá nálægri sprengistjörnu, gefa það veikt merki að engri einni mælingu er treystandi. Menn vilja því hafa sem flest tæki í gangi á sama tíma til þess að staðfesting fái st, ef um raunverulegt merki er að ræða. Það hafði því orðið að samkomulagi milli hinna ýmsu hópa þyngdarbylgjufræðinga að setja tækin ávallt í skoðun á sama tíma. Atburðir næturinnar 23. febrúar 1987 urðu til þess að skipulaginu var breytt, og nú eru ávallt í notkun að minnsta kosti tveir nemar samtímis.

Rétt er að benda á í þessu sambandi að styrkur þyngdarbylgjublossa, sem myndast við stjörnusprengingu í Stóra Magellanskýinu, er orðinn svo lítill þegar blossinn berst að lokum til jarðarinnar að jafnvel næmstu þyngdarbylgjunemar, sem til eru í dag, geta ekki mælt hann, hvað þá nemarnir í Róm og Maryland⁸.

Stutt söguinnskot

Sprengistjarnan 1987A í Stóra Magellanskýinu er fyrsta sprengistjarnan sem sést hefur með berum augum síðan 1604.⁹ Það ár sást í stjörnumerkinu Naðurvalda mjög björt sprengistjarna, sem margir fylgdust með af miklum áhuga, þar á meðal hinn frægi stjörnufræðingur Jóhannes Kepler. Stjarnan náði birtustiginu -3 og var því mun bjartari en nýja sprengistjarnan, sem aldrei varð bjartari en $+2,9$ stig. Meginástæðan fyrir þessum mikla birtumun er fjarlægðin. SN1987A er í um það bil 170 þúsund ljósára fjarlægð, en áætlað er að sprengistjarna Keplers hafi verið í okkar eigin Vetrarbraut og í 15 til 35 þúsund ljósára fjarlægð. Rétt er að minna á, að Kepler varð að notast við augun ein við rannsóknir sínar á stjörnunni; það var ekki fyrr en fimm árum seinna sem Galileo beindi fyrstur manna sjónauka til himins og sá þá dýrð sem þar er að finna.¹⁰

Nú á dögum háþróaðrar tækni nútíma stjarnvísinda finnast að meðaltali nokkrar sprengistjörnur ár hvert í fjarlægum vetrarbrautum, og áætlað er að stjörnusprenging verði á 20 til 60 ára fresti í venjulegri þyrilþoku á borð við Vetrarbrautina. Ástæðan fyrir því, að svo langt er um liðið frá því sprengi-

⁸Sjá t.d. Bachall og fél. (1987).

⁹Reyndar hefur verið uppi orðrómur um það að mjög sjóngóðir stjörnuskoðendur hafi séð sprengistjörnuna S Andromedae (nú SN1885A) í Andróméðabokunni með berum augum árið 1885. Þetta gæti vel verið satt því að stjarnan mun hafa náð sýndarbirtustiginu $+6$.

¹⁰Sjá t.d. bók Þorsteins Vilhjálmssonar um sögu vísindanna (1987).

stjarna sást síðast í Vetrarbrautinni, er líklega sú að mikið er af rykmettuðum geimþokum í skífu Vetrarbrautarinnar; þær skyggja á fjarlægari svæði og gera það að verkum að við sjáum ekki mjög langt út eftir skífunni. Það er vel hugsanlegt að nokkrar stjörnur hafi sprungið í Vetrarbrautinni á síðustu 380 árum eða svo án þess að jarðarbúar yrðu þess varir. Tilkoma fiseindamælitækjanna á síðustu árum breytir stöðunni verulega, og nú má gera ráð fyrir því að í framtíðinni fáist vitneskja um allar stjörmusprengingar í Vetrarbrautinni, jafnvel þótt ekkert sjáist til þeirra í bestu og næmstu sjónaukum eða með öðrum rafsegulbylgjunum.

Í fornum heimildum er að finna upplýsingar um einar 7 sprengistjörnur, sem sést hafa með berum augum á síðustu 2000 árum.¹¹ Stjarna Keplers hefur þegar verið nefnd. Næsta sprengistjarna þar á undan er venjulega kennd við lærimeistara Keplers, danska stjörnufræðinginn Tycho Brahe, sem fylgdist grannt með hinni "nýju stjörnu" í nær eitt og hálf ár, eða allt frá því hún birtist árið 1572 og þar til hún var orðin of dauf til að sjást með berum augum. Fróðlegt væri að vita hvort helsti stjörnufræðingur Íslendinga á þessum tíma, Guðbrandur Þorláksson biskup á Hólum¹², hefur haft tök á að fylgjast með stjörnunni. Það er alls ekki ólíklegt því hún var í stjörnumerkinu Kassíópeiu, sem sést mjög vel frá Íslandi. Guðbrandur var enn á lífi 32 árum síðar, þegar stjarna Keplers birtist á hvelvingunni, og hugsanlega hefur hann fylgst með henni, en varla hefur það verið auðvelt svo lágt sem hún hefur verið á lofti frá Íslandi séð.

Kínverskar og japanskar heimildir segja frá sprengistjörnum ("gestastjörnum") árin 1181 og 1054. Hin síðarnefnda varð bjartari en Venus á að líta og leifar hennar mynda nú ægifagra ljómþoku, Krabbapökuna í Nautsmerki. Talið er fullvíst að þessi sprengistjarna hafi fætt af sér Krabbatífstjörnuna frægu, sem er nifteindastjarna er situr í ljómþokunni miðri.

Bjartasta sprengistjarna sem um getur sást árið 1006 í stjörnumerkinu Úlfinum. Talið er að hún hafi náð hámarksbirtu -9 og verið þá álíka björt og nokkurra daga gamalt tungl.

¹¹Sjá Stephenson og Clark (1976), og Clark og Stephenson (1977).

¹²Einar H. Guðmundsson (1988). Sjá einnig umfjöllun um Guðbrand og stjörnufræðipekkingu hans í 1. bindi Landfræðisögu Þorvalds Thoroddsens, bls. 210 - 214.

Kínverskar heimildir geta einnig um bjartar gestastjörnur árin 393 og 185. Þær sáust nokkuð lengi og hafa því tvímælalaust verið sprengistjörnur. Ýmsar aðrar gestastjörnur sem getið er um í fornum kínverskum annálum hafa væntanlega einnig verið sprengistjörnur, en líklegast er þó að flestar þeirra hafi annað hvort verið venjuleg nýstirni eða halastjörnur.

Það er víðar en í fornum skræðum sem upplýsingar er að finna um nálægar sprengistjörnur. Vítt og breitt um Vetrarbrautina má sjá leifar stjörnu-sprenginga, ýmist sem ljómandi geimpokur eða sem tifandi nifteinda-stjörnur¹³. Sumar af þeim stjörnusprengingum sem hér hafa verið nefndar hafa skilið eftir sig einhverjar slíkar leifar. Einnig er vitað um fjöldamargar tífstjörnur og sprengipokur sem ekki tengjast neinum þekktum sprengi-stjörnum. Frægasta sprengipokan af þessu tagi er ljómpoka í Kassíópeiu, sem er aðeins í um 10 þúsund ljósára fjarlægð og hefur líklega myndast í stjörnu-sprengingu sem hefði átt að sjást vel héðan frá jörðinni á seinni hluta sautjándu aldar. Hið furðulega er, að enginn virðist hafa séð sprenginguna. Enn þann dag í dag er það hulin ráðgáta hvernig á þessu stendur.

Allar þær stjörnusprengingar, sem finna má upplýsingar um í sögulegum heimildum, hafa orðið tiltölulega nálægt okkur í Vetrarbrautinni. Sú fjarlæg-asta hefur varla verið í meira en 50 þúsund ljósára fjarlægð. Það má því ljóst vera að "nýja" sprengistjarnan sprakk í raun og veru löngu á undan öllum hinum "gömlu" stjörnunum. Þegar ljósið, sem við sjáum í dag, lagði af stað frá sprengistaðnum í Stóra Magellanskýinu fyrir 170 þúsund árum ríkti jökul-skeið ísaldar hér á jörðinni og frumstæð steinaldarmenning í mannheimum.

Stjarnan sem sprakk og birtuferill SN1987A¹⁴

Strax og fréttin um nýju sprengistjörnuna birtist¹⁵ varð uppi fótur og fit meðal stjarnvísindamanna um víða veröld, og öllum tiltækum sjónaukum á suður-hveli jarðar var beint í átt að Stóra Magellanskýinu. Jafnframt voru dregnar fram í dagsljósið bæði gamlar og nýlegar myndir af þessu sama svæði í þeirri von, að á þeim mætti sjá stjörnuna eins og hún var áður en hún sprakk. Eftir örfáa daga hafði það tekist, en mönnum til mikillar furðu reyndist stjarnan

¹³Sjá t.d. Seward og fél. (1985).

¹⁴Mjög gott yfirlit um allt þetta efni er að finna í grein Woosleys og Phillips (1988).

¹⁵Kunkel og Madore (1987).

ekki hafa verið rauður risi, eins og allir bjuggust við, heldur blá risastjarna, sem skráð var undir nafninu Sanduleak -69°202.¹⁶ Þetta var alls ekki í samræmi við þær hugmyndir sem flestir stjarnfræðingar höfðu áður gert sér um þróun væntanlegra sprengistjarna. Ekki leið þó á löngu þar til menn töldu sig hafa skilið hvað þarna hafði gerst. Nánar verður fjallað um þetta atriði síðar, eftir að lítillega hefur verið rætt um athuganir á birtuferli sprengistjörnunnar.

SN1987A er fyrsta sprengistjarnan í sögunni sem rannsökuð hefur verið á öllum sviðum rafsegulrófsins. Svo heppilega vill til að á undanförmum áratugum hafa risið margar mjög góðar stjörnuathugunarstöðvar á suðurhveli jarðar, meðal annars í Chile, Ástralíu, Suður Afríku og á Nýja Sjálandi, og þaðan hefur frá upphafi verið fylgst grannt með sprengistjörnunni, bæði á sýnilega sviðinu og á útvarpssviðinu.

Auk mælinga frá jörðu niðri hafa verið gerðar innrauðar mælingar frá rannsóknarstofunni fljúgandi, Kuiper Airborne Observatory, og rannsóknir á gammageislum hafa bæði verið gerðar úr SMM (Solar Maximum Mission) gervitunglinu og úr loftbelgjum, sem sendir voru á loft frá Ástralíu og Suðurskautslandinu. Athuganir á útfjólubláa sviðinu eru framkvæmdar úr IUE (International Ultraviolet Explorer) gervitunglinu, en auk þess fylgjast japanska tunglið Ginga og sovéska geimstöðin Mir með röntgengeislun frá sprengistjörnunni. Til viðbótar öllum þessum mælingum á rafsegulbylgjum má svo nefna fiseindamælingarnar, sem þegar hefur verið minnst á.

SN1987A er nú þegar orðin það stjarnfræðilega fyrirbæri utan sólkerfisins sem mest hefur verið rannsakað bæði fyrr og síðar. Gífurlegt magn mæligagna hefur hlaðist upp í stofnunum víða um heim, og hefur jafnvel verið rætt um það að opna sérstakan banka til þess að halda utan um gögnin, líkt og gert var fyrir skömmu fyrir mæligögn sem safnað var meðan á heimsókn halastjörnu Halleys stóð.

Í byrjun kom það stjarnvísindamönnum talsvert á óvart að birta sprengistjörnunnar virtist ná hámarki aðeins nokkrum tugum klukkustunda eftir sprenginguna. Sýndarbirtan hélst síðan nokkurn veginn óbreytt í nokkra daga, en virtist þó frekar fara minnkandi. Eftir um það bil viku tók stjarnan svo

¹⁶Sjá t.d. White og Malin (1987).

skyndilega við sér og varð skærari með hverjum deginum sem leið. Raunverulegu hámarki náði hún í lok maí 1987 og var þá á sýndarbirtustigi +2,9. Eftir það fór birta hennar stöðugt minnkandi og vorið 1988 var hún orðin algjörlega ósýnileg með berum augum.¹⁷ Með mælitækjum nútíma stjarnvísinda á hún þó enn eftir að sjást í marga áratugi.

Birtuferill SN1987A er frábrugðinn ferlum annarra álíka sprengistjarna að því leyti að það tók hana óvenju langan tíma að ná hámarksbirtu. Eftir þessa hægu byrjun náði hún þó að verða næstum því jafn björt og dæmigerðar sprengistjörnur af gerð II, og við hámark skein hún með ljósafli 250 milljón sólna.

Hin sérkennilega birtuþróun SN1987A fyrstu dagana og ekki síður sú staðreynd, að stjarnan sem sprakk var blá risastjarna en ekki rauð, gerði það að verkum að stjarnedlisfræðingar tóku að endurskoða alla sína reikninga á gerð og þróun risastjarna. Fljótlega kom þó í ljós að bæði þessi atriði mátti útskýra með tiltölulega einföldum hætti: Stjarnedlisfræðingar hafa lengi vitað að það er einkum tvennt sem ræður úrslitum um gerð og þróun sólstjarna, nefnilega massi þeirra og efnasamsetning, og það er hér sem ástæðuna fyrir sérstöðu nýju sprengistjörnunnar er væntanlega að finna. Samsetning geimefnis í Stóra Magellanskýinu er talsvert önnur en í Vetrarbrautinni og öðrum svipuðum stjörnuþokum, og þróun stjarna í Stóra Magellanskýinu er þess vegna frábrugðin þróun stjarnanna í næsta nágrenni okkar í geimnum. En þetta eitt nægir ekki til að útskýra hegðun Sanduleak $-69^{\circ}202$. Það virðist einnig vera nauðsynlegt að gera ráð fyrir því að stjarnan hafi misst stóran hluta af upphaflegum massa sínum í öflugum stjörnuvindi á risaskeiðinu. Það er reyndar í fullu samræmi við athuganir á massamiklum risastjörnum í nágrenni okkar í Vetrarbrautinni, sem sýna mikið massastreymi frá yfirborði stjarnanna.

Á grundvelli líkanreikninga, þar sem fullt tillit er tekið til þessara atriða, hafa menn nú gert sér eftirfarandi mynd af þróuninni.¹⁸ Stjarnan Sanduleak $-69^{\circ}202$ hefur í upphafi verið 15 til 20 sinnum massameiri en sólin. Eftir meginraðarskeið, er aðeins stóð í 10 milljón ár, varð hún að rauðum stórrisa, sem missti á um það bil 10 þúsund árum að minnsta kosti 25% af massa sínum

¹⁷Sjá ítarlega lýsingu á birtuferlinum í eftirfarandi greinum: Menzies og féll. (1987). Catchpole og féll. (1987, 1988) og Whitelock og féll. (1988).

¹⁸Sjá til dæmis Woosley og Phillips (1988), Hillebrandt og féll. (1987) og Saio og féll. (1988).

út í geiminn í stjörnuvindi og þróaðist við það yfir í bláan stórrisa. Í lok þessa skeiðs hefur stjarnan líklega verið um 50 sinnum stærri en sólin að þvermáli og allt að 100 þúsund sinnum bjartari. Reikningarnir sýna að í miðju bláa risans hefur setið ógnarþéttur kjarni úr þungum frumefnum, sem myndast höfðu í flóknum samrunahvörfum á fyrri þróunarstigum stjörnunnar. Kjarninn hefur verið talsvert minni en jörðin að þvermáli, en massi hans hefur hins vegar verið mun meiri en massi jarðar, eða kringum 1,4 sólarmassar. Afgangurinn af risastjörnunni var úr léttum frumefnum, mest vetni, sem mynduðu örþunna en gífurlega víðáttumikinn hjúp utan um kjarnann. Eins og áður hefur verið minnst á er nú talið fullvíst að stjarnan hafi sprungið með þeim hætti að kjarni hennar hafi orðið óstöðugur og hrunið saman undan eigin þunga. Við það myndaðist öflug höggbylgja, sem þeytti hluta stjörnukjarnans og öllum hjúpnum út í geiminn með gífurlegum hraða.¹⁹

Þegar höggbylgjan braust út á yfirborðið hefur hluti af orku hennar væntanlega geislað burtu sem öflugur gamma- og röntgenblossi. Slíkur blossi mældist reyndar ekki hér á jörðinni, en við því var heldur ekki að búast, þar sem mælitækjum gervitungla hafði ekki enn verið beint að Stóra Magellanskýinu. Það var ekki gert fyrr en mörgum klukkustundum síðar, þegar eldhnöttur sprengistjörnunnar var orðinn vel sjáanlegur með berum augum. Næstu daga þandist eldhnötturinn út með hraða í kringum 10 þúsund km/s. Vegna útpenslunnar kólnaði hann verulega og jafnframt varð hann bæði þynnri og gagnsærri. Þetta gerði það að verkum að ljóshvolf sprengistjörnunnar færðist stöðugt innar í eldhnöttinn, og geislunin sem mældist hér á jörðinni kom þar af leiðandi frá sífellt dýpri lögum. Reikningar sýna að auðveldlega má útskýra hegðun birtuferilsins fyrstu dagana með þessu flókna samspili ljóshvolfs í útpenslu og breytinga á hita og efnisþéttleika.²⁰

En hver er ástæðan fyrir því að sprengistjarnan tók aftur við sér eftir nokkurra daga hik og jók birtu sína jafnt og þétt í næstum þrjá mánuði, eða þar til hún náði hámarki? Nú er talið nær fullvíst að þessi breyting hafi stafað af orkulosun í venjulegri kjarnahrörnun: Í sprengingunni myndaðist mikið magn af geislavirku samsætunni ⁵⁶Ni, sem hefur 6 daga helmingunartíma, og breytist í ⁵⁶Co við betasundrun. Kóbaltkjarnarnir, sem einnig eru óstöðugir

¹⁹Sjá frekari umfjöllun í næsta kafla.

²⁰Annað en ekki alveg eins flókið dæmi um ljóshvolf þar sem aðstæður eru sífellt að breytast er "ljóshvolf hins sýnilega heims" (sjá t.d. Einar H. Guðmundsson (1985)).

með um 77 daga helmingunartíma, hafa stöðugu samsætuna ^{56}Fe sem dóttur-efni. Við hrömun kóbaltsins í sprengistjörnunni mynduðust orkumiklir gammageislar sem víxlverkuðu við efni hjúpsins; orka þeirra hitaði upp hjúpin og dreifðist á ljóseindir með lengri bylgjulengdir og geislaði að lokum út í geiminn frá yfirborði eldhnattarins. Samanburður athugana og líkanreikninga sýnir, að um 0,07 sólar massa af hreinu ^{56}Ni þarf til að útskýra birtuferilinn með þessum hætti, og talið er að slíkt magn myndist auðveldlega í dæmigerðri stjörnusprengingu²¹. Það styður og þessa tilgátu að haustið 1987 sýndu rófmælingar á innrauða sviðinu tilvist bæði nikkels og kóbalts í sprengistjörnunni²² og um svipað leyti sáust einnig tvær gammalínur í rófi stjörnnar með orku er svarar nákvæmlega til orku gammaeinda, sem losna við hrömun kóbalts í járn.²³

Þyngdarhrun og fiseindir²⁴

Eins og þegar hefur verið bent á var mælingin á fiseindablossanum frá nýju sprengistjörnunni ákaflega mikilvæg frá sjónarhóli stjarnvísindanna. Hér var ekki aðeins um að ræða fyrstu mælingu á fiseindageislun frá uppsprettu utan sólkerfisins, heldur reyndust öll einkenni blossans vera í góðu samræmi við þá mynd sem stjarnfræðingar voru búnir að gera sér af fiseindageislun af völdum þyngdarhruns. Óhætt mun því að segja að flestir stjarnvísindamenn séu nú orðnir fullkomlega sannfærðir um það, að orsök stjörnusprenginga af gerð II sé þyngdarhrun kjarna í risastjörnu.

Það hefur reyndar ekki gengið alveg þrautalaust að útskýra í smáatriðum hvernig höggbylgjan, sem myndast við þyngdarhrunið, fer að því að þeyta yfirborðslögum stjörnnar út í geiminn. Eðlisfræðin sem þarna kemur við sögu er gífurlega flókin, og vegna þess hversu hratt hlutirnir ganga fyrir sig er mjög erfitt að herma eftir þróuninni með tölvureikningum, jafnvel þótt

²¹Sjá Woosley og Phillips (1988) og Woosley og Weaver (1986).

²²Rank og fél. (1988).

²³Matz og fél. (1988).

²⁴Mjög góða og skilmerkilega lýsingu á þyngdarhruni er að finna í bók Shapiros og Teukolskys frá 1983. Þar er meðal annars fjallað um fiseindabúskapinn í þyngdarhruni. Einnig gefur grein Burrows (1987) mjög gott yfirlit um þetta efni. Ítarlega umfjöllun um stjörnusprengingar og þá flóknu eðlisfræði sem þar kemur við sögu er að finna hjá Brown (1988) og Woosley og Weaver (1986). Í grein Einars H. Guðmundsonar frá 1987 er fjallað um myndun og þróun nifteindastjarna.

notaðar séu hraðvirkustu tölvur sem til eru í dag. Þetta gerir það að verkum að ýmis smáatriði eru enn óljós í sambandi við víxlverkun höggbylgjunnar og efnisins sem umlykur stjörnukjarnann. Í þessu sambandi er þess vegna mikilvægt að gera sér grein fyrir því, að fiseindablossinn sem barst til jarðarinnar frá nýju sprengistjörnunni sagði okkur ekkert um það sem var að gerast í yfirborðslögum risastjörunnar meðan á hamförunum stóð. Blossinn gerði okkur hins vegar kleift að sjá í gegnum hjúpinn og inn í innsta kjarna stjörunnar og fá þannig milliliðalaust fréttir af þyngdarhruninu sjálfu.

Útreikningar á gerð og þróun sólstjarna sýna að gerð stjörnukjarna, sem kominn er að hrúni, er því sem næst óháð hjúpnum er umlykur hann, svo framarlega sem heildarmassi stjörunnar er nógu mikill. Þannig virðast allar sólstjörnur með upphaflegan massa á bilinu 10 til 40 sólarmassar vera komnar með svipaðan kjarna undir lokin. Eins og áður er getið er slíkur kjarni heldur minni en jörðin að þvermáli. Hann er því sem næst allur úr jámi og massinn er um 1,4 sólarmassar, eða alveg við hin svokölluðu Chandrasekhar-mörk, sem er mesti massi sem kjarninn getur haft án þess að hrynja saman. Efnisþéttleiki kjamans er nálægt því að vera 10^{13} kg/m³ og hitinn í kringum 10^{10} K. Við þessar aðstæður er efnið í mjög sérkennilegu plasmaástandi með járnkjörnum, rafeindum og orkuríkum gammaeindum í varmajafnvægi. Hitinn og þéttleikinn vaxa hægt og sígandi þar til gammaeindirnar öðlast næga orku til að splundra járnkjörnunum í fjórar nifteindir og þrettán helíumkjarna. Við þetta breytist þrýstingurinn í stjörnukjarnanum nægilega til þess að þyngdarkrafturinn verður allsráðandi og kjarninn hrynur skyndilega saman undan eigin þunga.

Meðan á þyngdarhruninu stendur fara fram í efninu margs konar kjarna- og öreindahvörf sem mynda mikinn fjölda af orkumiklum fiseindum. Mikilvægasta hvarfið er svokölluð rafeindagleyping, þar sem rafeind og róteind sameinast og mynda nifteind auk fiseindar. Í sem stystu og einföldustu máli má segja að í þyngdarhruninu breytist 10^{57} róteindir og rafeindir í nifteindir og fiseindir. Þrýstingur nifteindanna fer stöðugt vaxandi eftir því sem þéttleikinn vex, og að því kemur að hann nær að stöðva hrúnið. Við hemlunina myndast höggbylgjan sem þeytir burtu yfirborðslögunum, og eftir situr gífurlega heit og þétt og fiseindarík nifteindastjarna.

Allt gerist þetta á ótrúlega skömmum tíma. Auðvelt er að sýna fram á, að ekki líður nema tíundasti partur úr sekúndu frá því kjarninn verður óstöðugur þar

til nifteindastjarnan hefur myndast. Hraðinn er svo mikill að fiseindirnar lokast inni í hrynjandi stjörnukjarnanum og fara ekki að streyma út úr nifteindastjörnunni fyrir alvöru fyrr en hrunið hefur stöðvast. Ástæðan fyrir þessari tímabundnu innilokun er hið sérstæða ástand efnisins í kjarnanum. Fiseindirnar, sem við allar venjulegar aðstæður víxlverka ákaflega veikt við aðrar öreindir²⁵, lenda auðveldlega í árekstrum við nifteindir og aðrar eindir í hrynjandi kjarnanum og eru þess vegna sífellt að breyta um stefnu. Dæmigerð fiseind sveimar fram og aftur um kjarnann í um það bil tíu sekúndur áður en hún sleppur út. Sú staðreynd að lengd fiseindablossans, sem mældist frá SN1987A, var í kringum tíu sekúndur⁵ bendir þess vegna sterklega til þess að sú mynd sem hér hefur verið dregin upp sé í öllum meginatriðum rétt.²⁶ Orka fiseindanna, sem mælingarnar náðu til, er einnig í fullu samræmi við fræðilega útreikninga, og sömu sögu er að segja um heildarorkuna í fiseindaflæðinu frá sprengistjörnunni, en hana má áætla út frá tímalengd blossans og fjölda fiseindanna sem mældar voru. Það er þess vegna samdóma álit flestra stjarnfræðinga, sem starfa á þessu sviði, að fiseindablossinn frá nýju sprengistjörnunni hafi í öllum aðalatriðum staðfest kenninguna um þyngdarhrun sem orsök stjörnusprenginga af þessu tagi.

Heildarorkan sem losnaði í sprengingunni í Stóra Magellanskýinu var í kringum 2×10^{46} J. Hún er jöfn bindiorku nifteindastjörnnar, sem hlýtur að hafa myndast við þyngdarhrunið, ef kenningarnar eru réttar. Þetta er um það bil 200 sinnum meiri orka en sólin okkar geislar frá sér á allri sinni löngu ævi, sem er um 10 þúsund milljón ár. Svo til öll þessi orka streymdi burt frá sprengistjörnunni með fiseindum á fyrstu 10 til 20 sekúndunum eftir þyngdarhrunið, og á meðan kólnaði nýfædd nifteindastjarnan verulega og dróst saman.²⁷ Aðeins um 1% af heildarorkunni fór í að lyfta hjúpnum og senda hann með miklum hraða út í geiminn. Enn minna, eða innan við 0,1% orkunnar, kom fram sem ljós eða aðrar rafsegulbylgjur. Til viðbótar má svo nefna að einhver hluti orkunnar hefur sennilega borist burtu með þyngdarbylgjum, en það hefur væntanlega verið langtum minna en 1%.²⁸ Af þessu má

²⁵Fiseindir fara auðveldlega í gegnum jörðina án þessa "að verða varar við hana". Til þess að stöðva fullkomlega dæmigerða fiseind þarf að minnsta kosti níu ljósára þykkan vegg úr hreinu blýi!

²⁶Hér verður reyndar að gera ráð fyrir því að fiseindin sé massalaus, en mælingarnar á fiseindablossanum sjálfum benda einmitt til að svo sé. Sjá næsta kafla.

²⁷Sjá Einar H. Guðmundsson og J. R. Buchler (1980) og Burrows (1987).

²⁸Sjá t.d. Saenz og Shapiro (1981).

ljóst vera að fiseindageislunin bar ægishjálmi yfir allt annað sem gerðist í stjörnusprengingunni, og virtuaukning nýju stjörnunnar, sem vakti svo mikla athygli hér á jörðinni, var í raun ekki annað en veikt og langdregið bergmál af þeirri stórbrotnu þrumu sem áður hafði riðið yfir.

Hafa fiseindir massa?

Mælingarnar á þeim 26 eða 27 fiseindum, sem sáust í tækjum tilraunaedlisfræðinga að morgni 23. febrúar 1987⁵, vöktu ekki aðeins áhuga stjarnvísindamanna, heldur varð einnig mikið fjaðrafok í heimi öreindafræðinga um leið og fyrstu fréttirnar bárust. Ástæðan var sú, að mælingarnar gátu hugsanlega gefið mikilvægar upplýsingar um ýmsa eiginleika fiseinda, einkum þó massa þeirra og stöðugleika. Auk þess vonuðust menn til þess að þær gætu varpað nýju ljósi á spurninguna um fjölda fiseindategunda, það er að segja hvort til eru fleiri en þær þrjár gerðir fiseinda sem sést hafa í tilraunum eðlisfræðinga hér á jörðinni.²⁹ Ekki leið á löngu þar til vísindaritgerðir með túlkun öreindafræðinga á niðurstöðum mælinganna voru orðnar margfalt fleiri en fiseindirnar sem mældar höfðu verið.³⁰

Í flestum ritgerðanna er aðeins fjallað um þær 19 fiseindir, sem sáust í vatnsgeymunum í Kamiokanámunni í Japan og í saltnámunni í Ohio, enda birtust niðurstöður þeirra mælinga tiltölulega fljótlega eftir atburðinn. Nákvæmar upplýsingar um fiseindirnar í Kákasus og í jarðgöngunum í Mont Blanc birtust ekki fyrr en talsvert löngu síðar, og þær breyttu lítið sem ekkert þeim niðurstöðum sem áður höfðu fengist.

Mikilvægasta atriðið í þessu sambandi er án efa spurningin um það, hvort fiseindir hafi massa eða ekki. Á undanförmum árum hafa öreindafræðingar mikið verið að velta fyrir sér kenningum, þar sem reynt er að lýsa öllum víxlverkunum í náttúrunni sem mismunandi útgáfu af einni og sömu grunnvíxlverkuninni.³¹ Í mörgum kenningum af þessu tagi er það fræðilegur

²⁹Þessar þrjár tegundir eru raffiseindin, mýfiseindin og táfiseindin. Sjá t. d. grein Guðna G. Sigurðsonar (1987) um tilraunir í öreindafræði.

³⁰Sjá t.d. Pendlebury (1988).

³¹Sjá t.d. Langacker (1986). Aðgengilegar upplýsingar um allra nýjustu hugmyndirnar í heimi öreindafræðinga er meðal annars að finna í nýrri grein Þórðar Jónssonar (1988) og bók Davies og Browns (1988). Á undanförmum árum hafa birst nokkrar greinar á íslensku um grundvallarkenningar í eðlisfræði, t.d. eftir Þórð Jónsson (1981, 1985) og Jakob Yngvason (1984).

möguleiki að fiseindirnar hafi massa. Hins vegar er mikilvægt að hafa í huga, að í þeim kenningum sem bestar þykja í dag til að lýsa veikum og sterkum víxlverkunum er gert ráð fyrir því að fiseindir séu massalausar eins og ljóseindir. Til að skera úr um þetta atriði hafa verið gerðar ýmsar tilraunir á síðustu árum, en niðurstöður þeirra hafa ekki enn gefið endanlegt svar. Aðeins hefur verið unnt að finna efri mörk fyrir massa eindanna, það er að segja ef fiseindirnar hafa massa á annað borð þá er massi raffiseindarinnar minni en $3,2 \times 10^{-35}$ kg (18 eV), massi mýfiseindarinnar minni en $4,5 \times 10^{-31}$ kg (250 keV) og massi táfiseindarinnar minni en $1,3 \times 10^{-28}$ kg (70 MeV)³². Til samanburðar má minna á að massi rafeindarinnar er $9,11 \times 10^{-31}$ kg (511 keV). Einnig hefur verið reynt að nota kenningar og athuganir í heimsfræði til þess að fá upplýsingar um massa fiseindanna, en þau mörk sem þannig eru fengin eru mun veikari en tilraunaniðurstöðurnar.³³

Margir hugsuðu sér því gott til glóðarinnar þegar fréttist af fiseindablossanum frá SN1987A. Flugtími öreinda frá sprengistjörnunni til jarðar er nefnilega ekki aðeins háður fjarlægðinni, heldur einnig massa og orku eindanna. Fyrir ljóseind er flugtíminn jafn $d/c = 170$ þúsund ár, þar sem d er fjarlægðin og c er ljóshraðinn. Öreind með kyrrstöðumassa m og heildarorku E er lengur á leiðinni sem svarar tímanum $(d/2c)(mc^2/E)^2$. Af þessu má sjá að ef fiseindir með ákveðinn massa en mismunandi orku leggja samtímis af stað frá hrynjandi stjörnukjarnanum þá komast þær orkumestu fyrstar á leiðarenda, en hinar orkuminnstu reka lestina. Allar tilraunir til þess að lesa massa fiseindanna úr mælingunum á blossanum byggjast á þessu einfalda grundvallaratriði. Rétt er að geta þess hér að fiseindamælingarnar náðu aðeins til andeindar raffiseindarinnar og gefa þar af leiðandi engar beinar upplýsingar um mý- eða táfiseindir.

Á þeim stutta tíma sem liðinn er frá uppgötvun sprengistjörunnar hefur birst mikill fjöldi greina þar sem fjallað er um mælingarnar á orku og komutíma fiseindanna 19 í miklum smáatriðum. Flestir höfundanna reyna að setja efri mörk á massa eindanna, en sumir vilja ganga lengra og setja bæði efri og neðri mörk. Almennt má segja að heldur hafi gætt tilhneigingar í þá átt að ofmeta upplýsingarnar sem felast í þessum fáu mæligildum, og sumir hafa einnig

³²Sjá t.d. Harari og Nir (1987). Orkan 1 eV jafngildir massanum $1,783 \times 10^{-36}$ kg.

³³Sjá t.d. Kolb (1986).

freistast til að nota gagnrýnislaust smáatriði úr tölvureikningum á þyngdarhruni við massaákvörðunina. Hlutlaust mat á mæliniðurstöðunum bendir hins vegar eindregið til þess, að ekki sé hægt að segja miklu meira um massa raffiseindarinnar en það, að hann sé minni en $3,5$ til $5,5 \times 10^{-35}$ kg (20 til 30 eV) og gæti alveg eins verið núll.³⁴ Þetta eru heldur lakari mörk en fást með beinum tilraunum.

Á þessu stigi virðist því vera skynsamlegast að líta svo á að raffiseindin sé í raun og veru massalaus og að tímahegðun blossans gefi okkur fyrst og fremst upplýsingar um myndun og innilokun fiseindanna í þyngdarhruni stjörnukjarnans í Sanduleak $-69^{\circ}202$. Hins vegar sýnir þessi atburður svo að ekki verður um villst, að fiseindastjörnufræðin getur lagt mikið af mörkum við lausn ákveðinna vandamála í öreindafræði, og margir öreindafræðingar bíða þess vegna álíka spenntir og stjarnæðlisfræðingar eftir næstu stjörnusprengingu í nágrenni okkar í Vetrarbrautinni.

Vangaveltur og lokaorð

Eldhnöttur nýju sprengistjörnnunnar er enn að þenjast út með miklum hraða. Birta hans dvínar þó jafnt og þétt, efnisþéttleikinn minnkar og hitinn fer stöðugt lækkandi. Með tímanum mun hann væntanlega breytast í ljómþoku af svipaðri gerð og Krabbapokan. Einnig má búast við því að höggbylgjan, sem myndaðist í sprengingunni, eigi enn eftir að hafa áhrif á geimefnið í kringum stjörnuna, einkum leifarnar af yfirborðslögum Sanduleak $-69^{\circ}202$ sem fuku í burtu í stjörnuvindinum, þegar stjarnan var á risastiginu. Það er jafnvel hugsanlegt að árekstur höggbylgjunnar og geimefnisins geti komið af stað tímabundnum kjarnahvörfum með tilheyrandi birtuaukningu sprengistjörnnunnar.

Ekki alls fyrir löngu urðu menn varir við dauft endurkast á ljósi frá sprengistjörnunni. "Bergmál" þetta kemur líklega frá risastöru rykmettuðu geimskýi

³⁴Hér er aðeins fjallað um ákvörðun á massa raffiseindarinnar. Kolb, Stebbins og Turner (1987) gefa mjög gott yfirlit um þetta efni og Schramm (1987) fjallar að auki um ýmsa aðra skylda hluti, eins og stöðugleika fiseinda og fjölda fiseindategunda. Hann ræðir einnig lítillega um það hvað mælingarnar geta sagt um eiginleika annarra veikt víxlverkandi einda (t.d. áseinda), sem öreindafræðingar telja að geti verið til, en hafa aldrei fundist í tilraunum. Mælingarnar á sprengistjörnunni hafa einnig verið notaðar til könnunar á jafngildislögmáli Einsteins, sem almenna afstæðiskenningin hvílir á (sjá Longo (1988) og Krauss og Tremaine (1988)).

í nágrenni stjörnuunar og búist er við að það verði sýnilegt í nokkurn tíma. Mælingar á rófi ljóssins sýna að það lagði af stað frá eldhnetinum, þegar hann var hvað bjartastur, og þarna gefst því kærkomið tækifæri til þess að endurtaka athuganir á sprengistjörnu eini og hún var við hámark.³⁵ Í þessu sambandi má einnig nefna, að um það bil mánuði eftir stjörnusprenginguna birtist skyndilega bjartur "depill" í 16 ljósdaga fjarlægð frá sprengistaðnum. Depillinn, sem skein með birtu 25 milljón sólna og var þar af leiðandi ekki nema tíu sinnum daufari en SN1987A, hvarf aftur eftir stuttan tíma og hefur ekki sést síðan. Enn þann dag í dag veit enginn með vissu hvað þarna var á ferðinni, en líklega hefur verið um endurkast á ljósi sprengistjörnuunar að ræða.³⁶

Enginn veit heldur með vissu hvernig sprengistjarnan mun þróast á næstunni. Eitt af því sem menn bíða eftir með hvað mestri eftirvæntingu er að eldhnötturinn verði algjörlega gagnsær, svo að hægt verði að kanna hvaða fyrirbæri situr í honum miðjum. Flestir búast við því að þar sé að finna nýfædda nifteindastjörnu, en aðrir möguleikar koma að sjálfsögðu einnig til greina. Til dæmis hefur hugsanlega myndast svarthol við þyngdarhrunið í stað nifteindastjörnu, og eins hefur stjarnan getað sprungið algjörlega í tætlur án þess að skilja eftir sig nokkurt "afkvæmi". Þessir tveir möguleikar eru þó almennt taldir fremur ólíklegir.

Ekki er alveg ljóst á þessu stigi með hvaða hætti nýja nifteindastjarnan mun gera vart við sig. Hún gæti birst skyndilega sem tistjarna, en til þess að svo verði þarf útvarpsgeislinn frá henni að beinast í rétta átt og lenda á jörðinni með reglulegu millibili. Einnig er vel hugsanlegt að úr gervitunglum verði hægt að mæla röntgengeislun beint frá yfirborði stjörnuunar og fylgjast þannig með kólnun hennar næstu áratugina. Slíkar mælingar eru mjög þýðingarmiklar frá sjónarhóli eðlisfræðinga, því að þær geta gefið upplýsingar um eiginleika efnisins bæði á yfirborði stjörnuunar og eins í iðrum hennar. Þetta er mikilvægt vegna þess að á nifteindastjörnum ríkir

³⁵Sjá t.d. Suntzeff og fél. (1988).

³⁶Sjá t.d. Meikle og fél. (1987). Stutt yfirlit um "ljósbergmálið" og "dularfulla depilinn" er að finna í Marynowski (1988) og Andersen (1988).

ástand, sem er svo framandi að ekki er fyrirjábanlegt að það verði nokkurn tímann rannsakað í rannsóknarstofum á jörðinni.³⁷

Vangaveltur af þessu tagi geta verið mjög gagnlegar, þegar taka skal ákvörðun um það á hvaða mælingar beri að leggja mesta áherslu í nánustu framtíð. Hins vegar segir sagan okkur að oftast eru það óvæntu uppákomurnar sem langmestu skipta. Það er því rétt að láta hér staðar numið og hætta öllum getgátum um það hvað framtíðin kunni að bera í skauti sér. Í því efni er reynslan besti dómari. En hvernig svo sem málin kunna að þróast í framtíðinni þá er eitt þó víst og það er að stjörnusprengingin í Stóra Magellanskýinu verður skráð á spjöld stjarnvísindasögunnar sem einhver allra merkasti viðburður þessarar aldar.

Hér hefur verið stiklað mjög á stóru í umfjölluninni um sprengistjörnu SN1987A. Mörg áhugaverð atriði eru einungis tekin fyrir í neðanmálgreinum, eða þá að þeim hefur algjörlega verið sleppt. Af þeim sökum hefur verið reynt að hafa heimildaskrána sem ítarlegasta, og með hana að leiðarljósi ættu menn að getað aflað sér frekari fróðleiks um flest það er viðkemur nýju sprengistjörnunni.

Ég vil að lokum þakka Þorsteini Sæmundssyni fyrir ýmsar gagnlegar ábendingar.

Heimildir

- Aglietta, M., ásamt 19 meðhöfundum, 1987a. On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory During the Occurrence of Supernova 1987A. *Europhys. Lett.* 3, 1315 - 1320.
- Aglietta, M., ásamt 19 meðhöfundum, 1987b. Comments on the Two Events Observed in Neutrino Detectors during the Supernova 1987A Outburst. *Europhys. Lett.* 3, 1321 - 1324.
- Alexeyev, E. N., L. N. Alexeyeva, I. V. Krivosheina og V. I. Volchenko, 1988. Detection of the neutrino signal from SN1987A in the LMC using the INR Baksan Underground Scintillation Telescope. *Phys. Lett.* B205, 209 - 214.
- Amaldi, E., ásamt 12 meðhöfundum, 1987. Data Recorded by the Rome Room Temperature Gravitational Wave Antenna, during the Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud. *Europhys. Lett.* 3, 1325 - 1330.
- Andersen, P. H., 1988. Mystery spots, X rays, gamma rays: is the dust settling from SN1987A? *Physics Today*, janúar, 20 - 23.

³⁷Frekari umfjöllun um þetta efni og ýmis önnur atriði í rannsóknum á nifteindastjörnum er meðal annars að finna í greinum eftir Einar H. Guðmundsson (1987), Einar H. Guðmundsson og félagar (1983) og Fushiki og félagar (1988).

- Bachall, J. N., A. Dar og T. Piran, 1987. Neutrinos from the recent LMC supernova. *Nature* 326, 135 - 136.
- Bachall, J. N., R. Davis Jr. og L. Wolfenstein, 1988. Solar neutrinos: a field in transition. *Nature* 334, 487 - 493.
- Bionta, R. M., ásamt 36 meðhöfundum, 1987. Observation of a Neutrino Burst in Coincidence with Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud. *Phys. Rev. Lett.* 58, 1494 - 1496.
- Brown, G. E., (ritstjóri), 1988. Theory of Supernovae. *Physics Reports* 163, Numbers 1 - 3.
- Burrows, A., 1987. The birth of neutron stars and black holes. *Physics Today*, sept., 28-37.
- Catchpole, R. M., ásamt 19 meðhöfundum, 1987. Spectroscopic and photometric observations of SN1987A - II. Days 51 to 134. *Mon. Not. R. astr. Soc.* 229, 15p - 25p.
- Catchpole, R. M., ásamt 23 meðhöfundum, 1988. Spectroscopic and photometric observations of SN1987A - III. Days 135 to 260. *Mon. Not. R. astr. Soc.* 231, 75p - 89p.
- Clark, D. H., og F. R. Stephenson, 1977. *The Historical Supernovae*. Pergamon Press.
- Davies, P. C. W., og J. Brown, ritstjórn, 1988. *Superstrings: A theory of everything?* Cambridge University Press.
- De Rújula, A., 1987. May a Supernova Bang Twice? *Phys. Letters* B193, 514 - 524.
- Einar H. Guðmundsson og J. R. Buchler, 1980. On the consequence of neutrino trapping in gravitational collapse. *Ap. J.* 238, 717 - 721.
- Einar H. Guðmundsson, C. J. Pethick og R. I. Epstein, 1983. Structure of neutron star envelopes. *Ap. J.* 272, 286 - 300.
- Einar H. Guðmundsson, 1985. 3K-geislunin og ljóshvolf hins sýnilega heims. Í ráðstefnuritinu *Rannsóknir í eðlisfræði á Íslandi*. Ritstjóri Leó Kristjánsson. Reykjavík: Eðlisfræðifélag Íslands.
- Einar H. Guðmundsson, 1987. Yfirborð nifteindastjarna. Í ráðstefnuritinu *Eðlisfræði á Íslandi III*. Ritstjórnar Jón Pétursson og Þór Jakobsson. Reykjavík: Eðlisfræðifélag Íslands.
- Einar H. Guðmundsson, 1988. Stjörnufræðipekking Guðbrands biskups Þorlákssonar. Í undirbúningi.
- Fushiki, I., Einar H. Guðmundsson og C. J. Pethick, 1988. Surface structure of neutron stars with high magnetic fields. Greinin hefur verið send *Ap. J.* til birtingar.
- Guðni G. Sigurðsson, 1987. Tilraunir í öreindafræði. Grein í afmælisriti Þorbjarnar Sigurgeirssonar, í *hlutarins eðli*. Ritstjóri Þorsteinn I. Sigfússon. Reykjavík: Menningar-sjóður.
- Harari, H., og Y. Nir, 1987. Bounds on Neutrino Masses from Neutrino Decay Rates, Cosmology and the See-Saw Mechanism. *Nucl. Phys.* B292, 251 - 297.
- Helfand, D., 1987. Bang: The supernova of 1987. *Physics Today*, ágúst, 25 - 32.
- Henbest, N., 1987. Supernova: the cosmic bonfire. *New Scientist*, 5. nóvember, 52- 59.
- Hillebrandt, W., P. Höflich, J. W. Truran og A. Weiss, 1987. Explosion of a blue supergiant, *Nature* 327, 597 - 600.
- Hirata, K., ásamt 22 meðhöfundum, 1987. Observation of a Neutrino Burst from the Supernova SN1987A. *Phys. Rev. Lett.* 58, 1490 - 1493.
- Jakob Yngvason, 1984. Forn og ný vandamál í skammtasviðsfræði. *Fréttabréf Eðlisfræðifélags Íslands*, nr. 5, 3 - 8.

- Kolb, E. W., 1986. Lectures on Particle Physics and Cosmology. Í *Superstrings, supergravity and unified theories*. Ritstjórar G. Furlan, R. Jengo, J. C. Pati, D. W. Sciama og Q. Shafi. Singapore: World Scientific.
- Kolb, E. W., A. J. Stebbins og M. S. Turner, 1987. How reliable are neutrino mass limits derived from SN1987A? *Phys. Rev. D* **35**, 3598.
- Krauss, L. M., og S. Tremaine, 1988. Test of the Weak Equivalence Principle for Neutrinos and Photons. *Phys. Rev. Lett.* **60**, 176 - 177.
- Kunkel, W., og B. Madore, 1987. IAU *Circular No. 4316*.
- Langacker, P., 1986. The present status of Grand Unification and proton decay. Í *Inner Space/Outer Space*. Ritstjórar E. W. Kolb, M. S. Turner, D. Lindley, K. Olive og D. Seckel. The University of Chicago Press.
- Longo, M. J., 1988. New Precision Test of the Einstein Equivalence Principle from SN1987A. *Phys. Rev. Lett.* **60**, 173 - 175.
- Marynowski, M., 1988. First echoes from SN1987A. *Physics Today*, ágúst, bls. 18.
- Matz, S. M., ásamt 7 meðhöfundum, 1988. Gamma-ray line emission from SN1987A. *Nature* **331**, 416 - 418.
- Meikle, W. P. S., S. J. Matcher og B. L. Morgan, 1987. Speckle interferometric observations of supernova 1987A and of a bright associated source. *Nature* **329**, 608 - 611.
- Menzies, J. W., ásamt 15 meðhöfundum, 1987. Spectroscopic and photometric observations of SN1987A: the first 50 days. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **227**, 39p - 49p.
- Nørgaard, H., 1988. *Supernova. Et essay om stjernerne liv og død*. Kaupmannahöfn: Nysyn - Munksgaard.
- Pendlebury, D., 1988. A star dies, and a cottage industry is born. *The Scientist*, 13. júní, bls. 15.
- Rank, D. M., ásamt 6 meðhöfundum, 1988. Nickel, argon and cobalt in the infrared spectrum of SN1987A: the core becomes visible. *Nature* **331**, 505 - 507.
- Saenz, R. A., og S. L. Shapiro, 1981. Gravitational Radiation from Stellar Core Collapse. III. Damped Ellipsoidal Oscillations. *Ap. J.* **244**, 1033.
- Saio, H., K. Nomoto og M. Kato, 1988. Nitrogen and helium enhancement in the progenitor of supernova 1987A. *Nature* **334**, 508 - 510.
- Schramm, D. N., 1987. A Look at Supernova 1987A. Mun birtast í riti ráðstefnunnar *The International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies*. Hamburg, 1987.
- Seward, F. D., P. Gorenstein og W. H. Tucker, 1985. Young Supernova Remnants. *Scientific American*, ágúst, 72 - 80.
- Shapiro, S. L., og S. A. Teukolsky, 1983. *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars*. John Wiley and Sons.
- Stephenson, F.R., og D. H. Clark, 1976. Historical Supernovas. *Scientific American*, júní, 100-107.
- Suntzeff, N. B., ásamt 6 meðhöfundum, 1988. The light echoes from SN1987A. *Nature* **334**, 135-138.
- Trimble, V., 1982. Supernovae. Part I: the events. *Rev. Mod. Phys.* **54**, 1183 - 1224.
- Trimble, V., 1983. Supernovae. Part II: the aftermath. *Rev. Mod. Phys.* **55**, 511 - 563.
- White, G. L., og D. F. Malin, 1987. Possible binary star progenitor for SN1987A. *Nature* **327**, 36-38.

- Whitelock, P. A., ásamt 20 meðhöfundum, 1988. Spectroscopic and photometric observations of SN1987A - IV. Days 260 to 385. *Mon. Not. R. astr. Soc.* **234**, 5p - 18p.
- Woosley, S. E., og M. M. Phillips, 1988. Supernova 1987A. *Science* **240**, 750 - 759.
- Woosley, S. E., og T. A. Weaver, 1986. The physics of supernova explosions. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **24**, 285-327.
- Þorsteinn Vilhjálmsson, 1987. *Heimsmýnd á hverfanda hveli II*. Reykjavík: Mál og Menning.
- Þorvaldur Thoroddsen, 1892-96. *Landfræðisaga Íslands I*. Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag.
- Þórður Jónsson, 1981. Hvað er skammtasviðsfræði? *Náttúrufræðingurinn* **51**, 123 - 131.
- Þórður Jónsson, 1985. Hvað er öreind? *Náttúrufræðingurinn* **55**, 31 - 39.
- Þórður Jónsson, 1988. Strengjafræði. Í ráðstefnuritinu *Eðlisfræði á Íslandi IV*. Ritstjórar Jakob Yngvason og Þorsteinn Vilhjálmsson. Reykjavík: Eðlisfræðifélag Íslands.

Summary

The new supernova in the Large Magellanic Cloud is the brightest supernova to be observed since 1604. This paper gives a short account of the discovery and the events that followed during the next few days and weeks. It also gives a short review of the most important scientific results obtained from the observations, with particular emphasis on the progenitor star, the light curve and the neutrino burst. The theory of gravitational collapse is discussed and some comments are made about the birth of neutron stars in supernova explosions and their subsequent evolution. Finally the question of what the neutrino burst tells us about the mass of the electron neutrino is discussed.