

Þyngdargeislun

Einar H. Guðmundsson

Raunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 21. maí 2003

Ágrip – Samkvæmt almennu afstæðiskeningunni breiðast breytingar í þyngdarsviði út frá upptökum sínum með ljóshraða. Þær koma fram sem sveiflur í sveigju tímarúmsins og eru ýmist kallaðar þyngdarbylgjur (e. gravitational waves) eða þyngdargeislun (e. gravitational radiation). Slík geislun hefur reyndar ekki enn fundist með beinum mælingum, en það er von manna að með nýrri tækni muni hún sjást á næstu árum. Ef sú von rætist, opnast nýtt og spennandi svið til rannsókna á alheimi. Í þessu yfirliti verður fyrst sagt stuttlega frá sögu rannsókna á þyngdargeislun. Þá verður rætt um eðli og eiginleika geislunarinnar og fjallað um hugsanlegar uppsprettur hennar. Jafnframt verður gefin stutt lýsing á þeirri tækni sem beitt er við mælingar á þyngdarbylgjum.

1. Inngangur

Mánudaginn 18. desember 1978 sté bandaríski stjarn-eðlisfræðingurinn J. H. Taylor í pontu á alþjóðlegri ráðstefnu í München í Þýskalandi og tilkynnti þingheimi að hann og samstarfsmenn hefðu fundið áreiðanlegar vísbendingar um áhrif þyngdargeislunar á tífstjörnunna PSR1913+16 [19]. Mælingar þeirra á útvarpsbylgjum frá stjörnunni, sem er í tvístirni með annarri nifteindastjörnu, bentu eindregið til þess að stjörnur væru að nálgast hvor aðra og kerfið því að missa orku. Taylor sýndi einnig fram á að þróunin væri í fullu samræmi við sextíu ára gamla spá Einsteins um orkutap vegna þyngdargeislunar [8].

Niðurstöður Taylors og félaga sannfærðu flesta eðlisfræðinga um tilvist þyngdarbylgna og frekari mælingar á PSR1913+16 sem og öðrum tífstjörnum í þéttstæðum tvístirnum hafa enn styrkt þá skoðun [22]. Svo mikilvægar þykja þessar rannsóknir, að Taylor og nemanda hans R. A. Hulse voru veitt Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 1993 fyrir framlag sitt til nákvæmnismælinga á tífstjörnum, einkum þó PSR1913+16 [7, 20].

Þrátt fyrir þennan merka áfanga er rétt að hafa í huga, að tífstjörnumælingarnar gefa aðeins óbeinrar vísbendingar um tilvist þyngdarbylgna. Engin slík geislun hefur enn sést í þar til gerðum mælitækjum, hvorki frá tvístirnum né öðrum upptökum þyngdarbylgna. Hvað PSR1913+16 varðar er tvístirnið reynd-

ar svo langt í burtu að beinar mælingar á þyngdarbylgjum þaðan eru nær óhugsandi í nálægri framtíð. Hins vegar hleypti uppgötun þeirra Taylors og félaga auknu fjöri í rannsóknir á þessu sviði og fljótlega var hafist handa um hönnun nýrri og fullkomnari nema en þá voru í notkun. Nú, í byrjun tuttugustu og fyrstu aldar, eru nokkur af þessum nýju mælitækjum að komast í gagnið og má í því sambandi nefna LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) mælistöðvarnar í Bandaríkjunum, sem talsvert hafa verið í fréttum á síðustu árum, auk minni stöðva í Evrópu, Japan og Ástralíu [2, 9].¹

Menn gera sér vonir um að með hinum nýja tækjabúnaði megi nema öflugar hrinur þyngdarbylgna, svokallaða þyngdarblossa, frá stjörnusprengingum og árekstrum svarthola eða nifteindastjarna. Þyngdargeislun er hins vegar svo veik og svo erfitt er að mæla hana, að flestir eru þeirrar skoðunar að nauðsynlegt sé að koma upp öflugri stöð úti í geimnum til þess að árangur sé tryggður. Ein slík alþjóðleg geimstöð, LISA (Laser Interferometer Space Antenna), er nú á teikniborðinu og verður hún hugsanlega komin í gagnið innan tíu ára.²

¹ Á heimasíðu LIGO eru tengingar við síður fleiri þyngdarbylgjunema: <http://www.ligo.caltech.edu>.

² Upplýsingar um LISA er að finna á heimasíðunni <http://lisa.jpl.nasa.gov/whatis.html>.

Í þessu yfirliti verður fyrst fjallað stuttlega um nokkra sögubætti. Þá verður rætt um eðli geislunarinnar og hvernig menn vonast til að mæla hana. Að lokum verður svo farið nokkrum orðum um uppsprettur þyngdarbylgna í geimnum og styrk geislunarinnar frá þeim.

2. Hraði þyngdarinnar

Þótt þyngdarlög málm Newtons hafi reynst ótrúlega vel allt frá upphafi, átti höfundur þess í vandræðum með að réttlæta það með öðrum orðum en þeim, að það gæfi réttar niðurstöður. „Hypotheses non fingo“ sagði hann þegar hann var krafinn frumspekilegra skýringa á þyngdaraflinu, „ég skálda ekki tilgátur“. Það sem aðallega vafðist fyrir Newton var að samkvæmt lögmálinu berast þyngdarhrif samstundis frá einum hlut til annars án tillits til fjarlægðar. Slík fjarhrif (e. action at a distance) voru eitru í beinum náttúruspekninga samtímans. Líkt og Aristóteles trúðu þeir því að tóms væri ekki til og flestir aðhylltust hugmyndafræði Descartes um efnisfyllingu rúmsins. Hlutir gætu ekki haft bein áhrif hver á annan nema með snertingu og væri bil á milli hlytu áhrifin að berast með hjálp einhvers konar vaka (e. aether eða ether). Þannig bærst ljósið í eða með ljósvaka, þyngdin í þyngdarvaka, varminn með varmavaka og svo framvegis. Skoðanir Newtons sjálfs sveifluðust alla tíð milli tóms og vaka og hið sama átti við um marga aðra náttúruspekninga eftir hans dag. Vakakenningar af ýmsu tagi áttu þó miklu fylgi að fagna meðal eðlisfræðinga allt fram á tuttugustu öld, þegar afstæðiskenning og skammtafræði komu til sögunnar og beindu eðlisfræði inn á nýjar brautir [10].

Árið 1776 kannaði P. S. Laplace hvaða afleiðingar það hefði í þyngdarfræði Newtons að láta þyngdarhrif berast með endanlegum hraða. Ástæðan fyrir hugleiðingum hans voru langtíma breytingar á umferðartíma tungls um jörðu, sem ekki hafði tekist að útskýra. Laplace sýndi fram á að endanlegur þyngdarhraði ylli þyngdarvillu (e. aberration of gravity), sem sé að þyngdarkraftur jarðar á tunglið stefndi ekki í átt að jarðarmiðju, heldur virtist hann koma úr örlítið annarri átt. Þessi hrif eru hliðstæð ljósvillu (e. aberration of light), sem einnig stafa af afstæðri hreyfingu lindar og athuganda þvert á tengilínu þeirra. Samkvæmt reikningum Laplaces þurfti þyngdarhraðinn að vera margfalt meiri en milljónfaldur ljóshraðinn til þess að unnt væri að útskýra breytingarnar á umferðartíma

tunglsins með þessum hætti [11]. Skömmu síðar tókst honum að finna aðra og sennilegri skýringu á breytingunum og varð það til þess að hann hætti að hugsa um endanlegan þyngdarhraða.³

Í þessu sambandi er mikilvægt að gera sér grein fyrir því, að þyngdarfræði Newtons er ekki afstæðileg kenning og inniheldur tímann því aðeins sem stika. Þetta má til dæmis sjá á jöfnu Poissons fyrir þyngdarmættið $\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$, þar sem Φ er mættið, G þyngdarstuðull Newtons og ρ massaþéttleikinn. Kenningin leyfir því ekki þyngdarbylgjur. Af sömu ástæðu kemur fram stefnuvilla (e. aberration) þyngdararkrafta nema hraði þyngdarhrifa sé óendanlegur, eins og Laplace sýndi fram á. Í hinna afstæðilegu þyngdarfræði Einsteins (almennu afstæðiskenningunni), þar sem þyngdarhrif berast með ljóshraða, er hins vegar engin slík stefnuvilla, að minnsta kosti ef þyngdararsvið er veikt og hraði agna ekki of mikill. Hið sama gildir um rafsegulfræði Maxwells, sem er afstæðileg kenning. Þar kemur ekki fram nein stefnuvilla í raf- og segulkröftum. Ef rafsegulfræðin er notuð sem fyrirmynd og gert er ráð fyrir seinkuðu mætti í þyngdarfræði Newtons, má leiða út bylgjujöfnuna $\nabla^2\Phi - \frac{1}{c_g^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = 4\pi G\rho$. Hún lýsir skalarbylgju sem ferðast með hraða c_g . Þyngdarhröðun er jöfn $-\nabla\Phi$ eins og áður, og þyngdarbylgjan í þessari kenningu er því langsbylgja. Þyngdarbylgjur Einsteins eru hins vegar þverstæðar þinabylgjur. (Sjá nánari útfærslu á þessu hjá [17]).

Niðurstöður Laplaces urðu til þess að allt fram á tuttugustu öld gerðu menn almennt ráð fyrir fjarhrifum þegar þyngdaraflið var annars vegar. Þetta hélt þó áfram að valda fræðimönnum talsverðum heilabrotum og má til dæmis sjá þess glögg merki í ýmsum yfirlitsgreinum sem J. C. Maxwell skrifaði fyrir *Encyclopaedia Britannica* og fleiri rit á síðari hluta nítjándu aldar [12]. Lausnin fannst ekki fyrr en með almennu afstæðiskenningunni sem felur í sér þyngdarlög málm Newtons í þeim skilningi, að lögmálið reynist vera góð nálgun þegar massadreifing er ekki of samþjöppuð og hraði hluta er lítill miðað við ljóshraðann.

Hugtakið þyngdarbylgja kemur fyrst fyrir í grein eftir H. Poincaré frá árinu 1905. Þar færir hann rök fyrir því að þyngdarhrif ferðist með ljóshraða [14].

³ Í dag vitum við að Laplace tókst aðeins að útskýra hluta breytinganna. Það sem uppá vantar orsakast af sjávarföllum, eins og Kant hafði séð fyrir þegar árið 1754.

Premur árum seinna reyndi hann að nota þyngdargeislun til þess að útskýra muninn á raunverulegri braut Merkúrísar og útreiknaðri braut samkvæmt þyngdarfræði Newtons. Hann benti á, að snúningur reikistjarna um sólina framkallaði sennilega ölduhreyfingu í þyngdarsviði þeirra og bylgjurnar bæru burt orku. Honum reiknaðist til að slíkt orkutap gæti þó ekki skýrt nema hluta af umræddu frávikum [15].⁴

Poincaré vann ekki frekar úr þessari hugmynd, enda skorti hann sviðskenningu um þyngdina til að byggja á. Það kom því í hlut Einsteins að setja fram fyrstu heildstæðu kenninguna um þyngdarbylgjur á grundvelli þyngdarfræði sinnar á árunum 1916 til 1918 [8]. Samkvæmt henni eru þyngdarbylgjur sveiflur eða gárur í sveigju tímarúmsins sem ferðast með sama hraða og ljósið. Með því að nota rafsegulfræði Maxwells sem fyrirmynd færði Einstein rök fyrir því að þyngdarbylgjur bæru með sér orku frá upptökunum og hann leiddi út almenna formúlu fyrir orkutap, sem þeir Taylor og félagar notuðu við rannsóknir á PSR1913+16 mörgum áratugum síðar. Á sínum tíma kom þessi niðurstaða Einsteins, hin svokallaða fjórþólsformúla, af stað talsverðum umræðum um eðli þyngdargeislunar, eins og nánar verður sagt frá í næsta kafla. Rétt er að minna á að til eru aðrar og flóknari kenningar um þyngdina en þyngdarfræði Einsteins og að í sumum þeirra eru þyngdarbylgjur frábrugðnar bylgjum Einsteins. Hraði þeirra getur einnig verið annar en ljóshraðinn [24]. Ekki er ætlunin að fjalla um slíkar kenningar í þessari grein. Þetta er þó nefnt hér vegna þess að í ársbyrjun 2003 bárust þær fréttir um heimsbyggðina að tekist hefði að mæla hraða þyngdarinnar þegar Júpiter myrkvaði fjarlægst dulstirni og hefði hann reynst jafn ljóshraðanum. Því miður virðist vera um mistúlkun að ræða og að sá hraði sem mældur var hafi í raun verið hraði ljóssins en ekki þyngdarinnar.

3. Efasemdir og deilur

Kenning Einsteins um þyngdarbylgjur gerir ráð fyrir, að bylgjurnar séu tiltölulega veikar. Það þýðir einfaldlega að niðurstöður hans byggja á línulegri nálgun [8]. Á næstu árum og áratugum kannaði hann nánar hvaða skilyrði þyrftu að vera uppfyllt til þess að treysta mætti slíkum reikningum. Aðrir fræðimenn,

⁴ Árið 1915 tókst Einstein að útskýra frávikid með hinni nýju þyngdarfræði sinni. Í ljós kom að þyngdarbylgjur áttu ekki sökina, heldur afstæðileg hrif af öðru tagi.

svo sem A. S. Eddington, H. Weyl og fleiri, blönduðu sér í umræðuna og leiðréttu meðal annars ýmsar villur í fyrstu greinum Einsteins um efnið.

Fljótlega komu í ljós tæknileg vandamál, sem áttu eftir að vefjast fyrir mönnum og langan tíma tók að leysa. Meðal annars var deilt á fjórþólsformúlu Einsteins og því haldið fram að hún stæðist ekki fyrir raunveruleg kerfi eins og tvístirni, sem væru ólínuleg. Þá héldu ýmsir því jafnvel fram, að þyngdarbylgjur gætu alls ekki borið orku. Svo erfið voru þessi vandamál, að Einstein sjálfur hætti um tíma að trú á þyngdarbylgjur og árið 1936 hafði hann skrifað handrit að grein ásamt aðstoðarmanni sínum N. Rosen þar sem þeir töldu sig hafa afsannað tilvist þeirra. Áður en til útgáfu kom fann H. P. Robertson þó villu í útreikningunum og forðaði þannig höfundunum frá álitshnekki. Rúmlega tuttugu árum síðar tókst svo H. Bondi og samstarfsmönnum hans að finna snjalla leið til þess að sannfæra fræðimenn um tilvist þyngdarbylgna. Deilurnar um fjórþólsformúlu Einsteins héldu þó áfram allt fram á miðjan níunda áratug síðustu aldar, en þá hafði mörgum úr hópi yngri fræðimanna loks tekist að staðfesta hana með því að beita nýjum reikniáðferðum [21]. Einnig voru mælingarnar á PSR1913+16 í fullu samræmi við formúluna [22].

Árið 1969 varð uppi fótur og fit meðal stjarnvísindamanna þegar J. Weber tilkynnti að hann hefði uppgötvað sterka þyngdargeislun frá miðju Vetrarbrautarinnar með aðstoð sivalningslaga herminema (e. resonant bar detector). Í kjölfarið reyndu margir aðrir að smíða svipaðan en næmari búnað til þess að staðfesta mælingarnar. Í stuttu máli sagt lét staðfestingin á sér standa og eftir langvinnar og hatrammar deilur Webers við gagnrýnendur eru flestir nú þeirrar skoðunar að hrifin sem hann mældi hafi verið eitthvað annað en þyngdargeislun [3, 21]. Þrátt fyrir þetta verður Weber að teljast frumkvöðull á þessu sviði því að tilraunir hans til að mæla þyngdarbylgjur vöktu mikinn áhuga yngri fræðimanna og leiddu að lokum til hönnunar og smíði nýrrar tegundar þyngdarbylgjunema, hinna svokölluðu víxlunarnema (e. laser interferometer detectors), sem nánar verður rætt um hér á eftir.

Í febrúar 1987 birtist ný stjarna á himni í Stóra Magellanskýinu, fyrsta sprengistjarnan sem sést hafði með berum augum í 383 ár [6]. Öllum tiltækum mælitækjum stjarnvísindamanna var beint að stjörnunni og einnig tókst öreindafræðingum að mæla fiseinda-

geislun frá þyngdarhruninu sem olli sprengingunni. Er þetta í fyrsta og eina sinn sem fiseindageislun hefur mælst frá stjarnfræðilegu fyrirbæri, öðru en sólinni. Jafnhliða þessu bárust fréttir af því, að tveir hermennemar við herbergishita hefðu numið þyngdarbylgjur frá stjörnunni og var annar þeirra á Ítalíu en hinn hjá Weber í Bandaríkjunum. Engir aðrir þyngdarbylgjunemar voru í notkun á þessum tíma svo erfitt var um staðfestingu. Hins vegar hafa óháðar rannsóknir á gögnunum leitt í ljós að hverfandi líkur eru á því að um þyngdarbylgjur hafi verið ræða [5].

Þótt engin þyngdargeislun hafi enn fundist með beinum mælingum, virðast kennileg rök fyrir tilvist slíkrar geislunar mjög sannfærandi. Hegðun tífstjörnu PSR1913+16 bendir og eindregið til þess að kenning Einsteins um þyngdarbylgjur sé rétt og eykur það trú sérfræðinga á því að mat þeirra á styrk og hegðun bylgna sé raunhæft. Hvort sú trú reynist á rökum reist kemur væntanlega í ljós á næstu árum eða áratugum.

4. Hvað er þyngdargeislun og hvernig verður hún mæld?

Á sínum tíma sýndi Newton fram á, að þyngdarsvið umhverfis kúlusamhverfa massadreifingu er hið sama og sviðið frá jafnmiklum massa í miðpunkti kúlunnar. Löngu síðar sannaði G. Birkhoff tilsvandi niðurstöðu í þyngdarfræði Einsteins: Þyngdarsvið fyrir utan kúlusamhverfa massadreifingu er eins og ytra þyngdarsvið svarthols með sama massa.⁵ Þetta gildir jafnvel þótt massadreifingin sveiflist út og inn, svo framarlega sem sveiflan er kúlusamhverf. Ef sveiflan er hins vegar ekki kúlusamhverf verður breyting á þyngdarsviðinu utan massadreifingarinnar og sú breyting eða truflun berst burtu frá massanum með ljóshraða. Þetta er þyngdargeislun.⁶

Í þyngdarfræði Einsteins er þyngdarsvið nátengt sveigju tímarúmsins og þess vegna má líta á þyngdargeislun sem sveiflur eða gárur í sveigjunni. Þegar lýsa þarf áhrifum geislunarinnar á þyngdarbylgjunema eða

⁵ Hér er átt við svarthol án möndulsúnings, þ.e. svokallað Schwarzschild-svarthol.

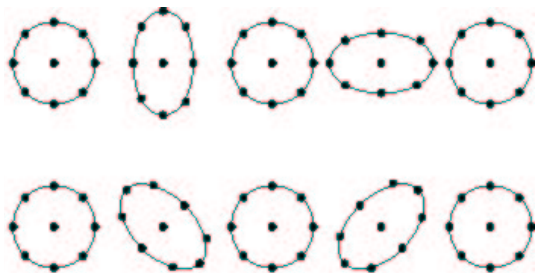
⁶ Við samningu þessa kafla og þeirra, sem á eftir koma, hefur m.a. verið stuðst við eftirfarandi bækur og yfirlitsgreinar: [2, 4, 13, 18, 21, 23]. Þar má einnig finna lista yfir frekari heimildir auk þess sem víða er farið dýpra í efnið en hér er gert. Jafnframt má benda áhugasömum lesendum á alþýðlega umfjöllun um þyngdarbylgjur hjá [3, 9].

hluti almennt, er þó oftast heppilegra að nota aðra en jafngilda lýsingu og líta á þyngdargeislun sem svið krafta sem breiðist út með ljóshraða í ósveigðu rúmi. Kraftarnir bjaga og hnoða allt sem verður á vegi bylgjunnar.

Þótt ekki sé ýkja erfitt að skilja sjálft þyngdarbylgjuhugtakið, þá eru útreikningar á upptökum geislunarinnar flóknir, nema í einföldustu tilvikum. Þannig geta menn notað nálgunarreikninga til að meta geislunina frá litlum sveiflum í stjörnum, og einnig frá kerfum eins og tvístirnum, á meðan stjörnur eru nógu langt hvor frá annarri. Ef sveiflur verða hins vegar mjög miklar og óreglulegar, eða stjörnur í tvístirnum lenda í návígi og rekast saman, verður atburðarásin svo flókin að nálgunarreikningar duga ekki til og grípa verður til tölulegra lausna á sviðsjöfnunum Einsteins. Það er reyndar ekkert áhlaupaverk, því um er að ræða kerfi margra ólínulegra og tengdra hlutfleiðujafna. Um þessar mundir eru hópar vísindamanna víða um heim að glíma við slík töluleg vandamál, enda má gera ráð fyrir að sterkasta geislunin komi frá hamfarakenndum atburðum eins og árekstrum svarthola eða nifteindastjarna og ósamhverfum sprengingum af ýmsu tagi.

Þegar LIGO hefur mælingar fyrir alvöru er ætlinin að bera niðurstöður þessara tölulegu reikninga saman við mæliniðurstöður. Þannig ætti að vera unnt að afla nákvæmra upplýsinga um uppsprettur. Líklegast er að geislunin komi frá fjarlægum vetrarbrautum og hafi verið milljónir eða jafnvel milljarða ára á leiðinni. Vegna fjarlægðarinnar er hún því orðin mjög veik, þegar hún kemur til jarðar, og erfitt verður að greina hana frá truflunum frá nágrenni nemanna og suði í þeim sjálfum. Til þess að fullvíst sé, að um þyngdargeislun sé að ræða, er því nauðsynlegt að merkið komi fram á tveimur eða fleiri nemum á mismunandi stöðum. Það er ástæðan fyrir því að LIGO nemarnir eru tveir, annar í Washingtonríki, hinn í Louisiana. Að auki hefur verið komið á samvinnu milli flestra ef ekki allra hópa sem stunda þyngdarbylgjumælingar á hinum ýmsu stöðum á jörðinni.

Það einfaldar verulega hönnun mælitækja og úrvinnslu mæligagna að vegna fjarlægðarinnar til upptaka er sá hluti þyngdarbylgju, sem lendir á jörðinni, orðin að þverstæðri sléttbylgju. Það þýðir að hvar sem er á jörðinni verka bjögunarkraftar bylgjunnar í sléttu þvert á stefnuna til hinnar fjarlægðu uppsprettu.



Mynd 1. Áhrif þyngdarbylgju frá fjarlægri uppsprettu á stöðu frjálsra agna sem raðað er í hring í sléttu þvert á útbreiðslustefnu bylgjunnar. Sveifluhættir eru tveir og er annar þeirra sýndur í efri röð, en hinn í þeirri neðri. Sveiflutími bylgjunnar er T . Lögun kerfisins er sýnd á mismunandi tímum (frá vinstri til hægri): (a) $t = 0$, (b) $t = T/4$, (c) $t = T/2$, (d) $t = 3T/4$, (e) $t = T$. Myndin er fengin að láni hjá [18].

Öðlast má tilfinningu fyrir áhrifum dæmigerðrar þyngdarbylgju með því að ímynda sér nokkrar frjálsar agnir sem raðað er í hring utan um athuganda eins og sýnt er á mynd 1a (efri röð). Athugandinn er í miðju hringsins og í frjálsum falli eins og agnirnar. Hugsum okkur upptök geislunarinnar langt að baki hringsins og að stefnan til þeirra sé hornrétt á sléttu hringsins. Þegar bylgjan lendir á ögnunum sér athugandinn hana teygja á hringnum í eina átt en þjappa honum saman í þverstæða stefnu. Útkoman er sporbaugur eins og sýnt er á mynd 1b (efri röð). Ef bylgjan er regluleg heldur bjögun hringsins áfram eins og sýnt er á myndum 1c til 1e og síðan endurtekur atburðarásin sig með reglubundnum hætti. Önnur en jafn líkleg bjögun er sýnd í neðri röðinni á mynd 1. Í ljós kemur að flóknum bylgjum má ávallt lýsa sem línulegri samantekt af þessum tveimur sveifluháttum.

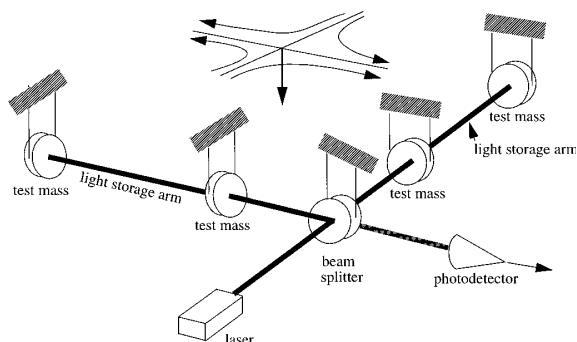
Myndirnar sýna vel, hvers vegna oft er talað um sjávarfallahrif í tengslum við þyngdarbylgjur. Bylgjurnar hnoða og bjaga agnakerfið með reglubundnum hætti. Hlutfallsleg bjögun er óháð stærð hringsins, þannig að hugsi maður sér til dæmis marga agnahringi, hvern inni í öðrum með athugandann í miðjunni, þá bjagast lögum þeirra allra á nákvæmlega sama hátt. Einfaldasta leiðin til að lýsa bjöguninni er því sú að gefa upp hlutfallslega breytingu á lengd í höfuðáttirnar tvær. Venja er að nota stærðina $h = 2\Delta L/L$, þar sem L er upphaflegur radíus viðkomandi hrings og ΔL breytingin í L á hverjum tíma. Þá er nokkuð ljóst að skrifa má $h = h(t) = h_0 \sin 2\pi\nu t$,

þar sem t er tíminn, ν tíðni bylgjunnar og h_0 sveifluviddin. Stærðirnar sem einkenna þyngdarbylgjuna eru því ν og h_0 . Rétt er að hafa í huga, að almennt er bjögunin línuleg samantekt af sveifluháttunum tveimur sem sýndir eru á mynd 1, auk þess sem bæði ν og h_0 geta verið flókin föll af tíma. Tölulegu reikningarnir, sem áður voru nefndir, fjalla einmitt um slík tilfelli, einkum tiltölulega stuttar hrinur þyngdarbylgna frá miklum hamförum.

Mynd 1 lýsir bjöguninni eins og hún lítur út frá athuganda í frjálsum falli. Slíkur athugandi sér nálægjar frjálsar agnir sveiflast fram og aftur, fjarlægjast og nálgast á víxl, en mismunandi mikið eftir áttum. LIGO (mynd 2) og LISA (mynd 4) og aðrir víxlunarnemarnir nýta þessa eiginleika þyngdargeislunar til hins ítrasta. Þar er leysiljós sent frá miðju tækisins í tvær áttir. Ljósíð endurkastast frá speglum, sem eru í hlutverki tveggja agna á hringnum á mynd 1. Endurspeglaða ljósíð kemur aftur saman í miðjunni og víxlast, og með því að fylgjast með víxlunarmynstrinu má sjá hvernig fjarlægðirnar milli miðju og spegla sveiflast. Þannig er hægt að ákvarða h og ν .

Á mynd 3 er gerð tilraun til lýsa áhrifum þyngdarbylgju á víxlunarnema. Efri hlutinn samsvarar efri röðinni á mynd 1. Fyrir neðan sést hvernig bylgjan bjagar nemann, ef útbreiðslustefna hennar er þvert á sléttuna, sem neminn er í. Vert er að hafa í huga, að bylgjan breytir öllum frjálsum fjarlægðum í sömu hlutföllum, þar á meðal bylgjulengd ljóssins frá leysinum. Ljósraðinn er hins vegar fasti og því breytist tíðnin einnig. Ljósíð í öðrum arminum er þar af leiðandi úr fasa við ljósíð í hinum og fasamunurinn sveiflast. Það veldur sveiflukenndum breytingum á víxlunarmynstrinu (sjá nánari útfærslu á þessu mikilvæga atviki hjá [16]).

Herminemar eru talsvert frábrugðnir víxlunarnemum. Þó er hægt að lýsa þeim á tiltölulega einfaldan hátt með því að vísa enn og aftur til agnahringsins á mynd 1. Í víxlunarnema eru endaspeglarnir í hlutverkum frjálsum agnanna á hringnum. Í herminema eru agnirnar hins vegar ekki frjálsar heldur hluti af stífum hlut. Þannig má til dæmis hugsa sér að í stað agnakerfisins á mynd 1 komi skífulaga álpata. Tengikraftar milli atómanna í plötunni gera það að verkum að bjögun hennar verður miklu mun minni en bjögun frjálsa agnahringsins. Í staðinn orsakar þyngdarbylgjan sveiflukennt spennusvið í plötunni. Ef tíðni bylgjunnar er nálægt hermitíðni plötunnar, örvar hún

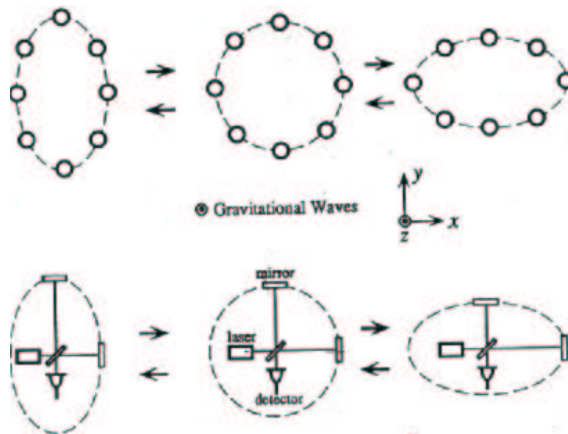


Mynd 2. Einfölduð mynd af LIGO og öðrum víxlunarnemum. Leysir (laser) sendir ljós á geislakljúf (beam splitter), sem er miðpunktur tækisins. Hluti ljóssins fer beint í gegn en afgangurinn speglast þvert á upphaflega stefnu. Báðir ljósgeislar endurkastast af speglum (test masses) sem eru á braut þeirra og koma aftur saman í miðjunni og víxlást. Víxlunarmynstrið er mælt með þar til gerðum búnaði (photodetector). Speglnir í örum nemans hanga í sérstökum vírum, en eru að öðru leyti frjálssir. Umhverfis nemann er búnaður sem ver hann gegn titringi frá umhverfinu og tryggir að mælingarnar fari fram í lofttæmi. Armar LIGOs eru hvor um sig fjórir kílómetrar að lengd. Reiknað er með að lengd armanna í LISA verði hins vegar um fimm milljón kílómetrar (sjá mynd 4). Teikningin er fengin að láni hjá [23].

viðkomandi sveifluhátt og platan fer að „syngja“. Ef sveiflurnar eru nógu miklar má mæla þær með spennumælum eða öðrum búnaði. Nýjusu nemand af þessari gerð eru verndaðir frá umhverfinu með því að hengja þá upp í lofttæmi eins og sýnt er á mynd 5.

Næmni herminema er enn talsvert minni en væntanlegra víxlunarnema og er það sennilega ástæða þess að enginn þeirra hefur enn numið þyngdarbylgjum. Þó hafa nokkrir slíkir verið í notkun árum saman. Nýir eru í smíðum og þeir gömlu verða sumir notaðir áfram, meðal annars vegna þess að þeir ættu að geta numið sterka þyngdarblossa á tíðniborða kringum 10^3 Hz sem víxlunarnemar ráða illa við vegna innra suðs.

Í þessari stuttu grein gefst ekki rúm til að fara í frekari smáatriði um gerð þyngdarbylgjunema eða gera grein fyrir öllum þeim hrifum, smáum sem stórum, er trufla mælingarnar og hjálpa til við að gera þær að einhverjum erfiðustu mælingum sem um getur í sögu eðlisfræðinnar. Í næsta kafla verður þó vikið lítillega að þessu atriði, og einnig má benda áhugasömum lesendum á fróðlega umfjöllum um efnið hjá [1], [2], [21] og [23].



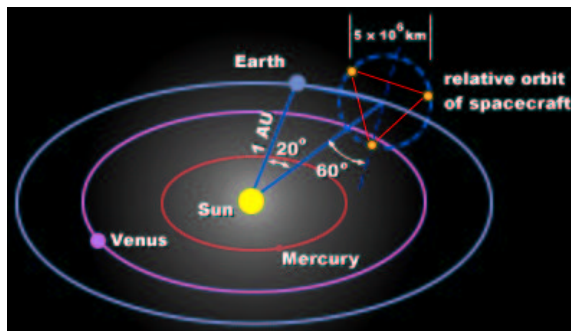
Mynd 3. Hugmyndin að baki LIGO sýnd á einfaldan hátt. Sjá myndir 1 og 2 til samanburðar. Myndin er fengin að láni hjá [1].

5. Upptök og styrkur

Sígild rafsegulfræði er línuleg og þar er venja að lýsa rafsegulgeislun frá afmörkuðu kerfi rafhleðslna og rafstrauma með hjálp svokallaðra fjölpólsvægja. Kerfið geislar aðeins frá sér rafsegulbylgjum ef breyting verður á vægjunum, en þar sem heildarhleðsla kerfisins er varðveitt og seguleinþólar eru ekki til kemur ekki fram nein einpólsgeislun. Af því leiðir að raftvípólsgeislun er almennt ráðandi í útgeislun rafsegulbylgna. Næst koma segultvípólsgeislun og raffjórþólsgeislun og svo segulfjórþólsgeislun og rafáttþólsgeislun.

Á sama hátt má í þyngdarfræði Einsteins lýsa þyngdargeislun frá afmarkaðri massadreifingu með hjálp fjölpólsvægja massa og massastrauma. Vegna þess að sviðsjöfnur Einsteins eru ólínulegar er hins vegar takmarkað gagn að slíkri framsetningu nema hreyfingar í kerfinu séu nær óafstæðilegar, en það þýðir að hámarkshraði agna í kerfinu er lítill miðað við ljóshraðann (en ekki nauðsynlega hverfandi). Varðveisla heildarmassa, heildarskriðþunga og heildarhreyfþunga veldur því, að hvorki verður til einpólsgeislun né tvíþólsgeislun. Fjórþólsgeislun er því almennt ráðandi í útgeislun þyngdarbylgna [21]. Þetta er í samræmi við upprunalega niðurstöðu Einsteins frá árunum 1916–18 [8].

Í kennslubókum um þyngdarfræði Einsteins er sýnt fram á, að sveifluvídd þyngdarbylgju á athugunarstað í fjarlægð r frá upptökum er nokkurn veginn



Mynd 4. Ætlunin er að geimstöðin LISA verði samsett úr þremur gervitunglum, sem mynda hornpunktana í jafnhliða þríhyrningi. Fjarlægðin milli tunglanna verður 5 milljón km og kerfið eltir jörðina á braut hennar um sólu og er 20° á eftir. Slétta þríhyrningsins myndar 60° horn við jarðbrautar-sléttuna. Í hverju tungli eru massar og leysar sem beina ljósi að hinum tunglum tveim. Kerfið í heild verkar eins og þrjú óháðir en jafnframt samverkandi víxlunarmælar. Myndin er fengin af heimasíðu LISA².

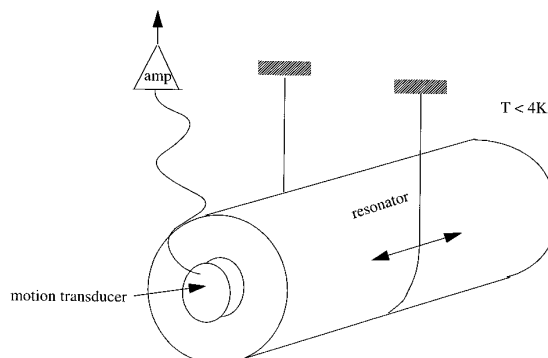
gefin með formúlunni $h_0 = (2G/c^4)(d^2Q/dt^2)/r$. Hér er c ljóshraðinn, t tímunn og Q fjórþólsvægi massadreifingarinnar.⁷ Sterkasta geislunin kemur frá uppsprettum með lögun sem er mjög frábrugðin kúlu. Þá er $Q \sim MD^2$, þar sem D er mælikvarði á stærð uppsprettunnar og M er heildarmassi hennar. Af því leiðir að $d^2Q/dt^2 \sim 2Mv_*^2$, þar sem stjarnan táknað að aðeins er tekið tillit til þeirrar hreyfingar efnisagna, sem víkur frá kúlu-samhverfu. Einingalause sveifluvíddin er því gefin með

$$h_0 \sim \frac{4GMv_*^2}{c^4 r} = 2 \left(\frac{R_S}{r} \right) \left(\frac{v_*}{c} \right)^2 \quad (1)$$

$$\sim 10^{-20} \left(\frac{r}{15 \text{Mpc}} \right)^{-1} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \left(\frac{v_*}{c} \right)^2,$$

þar sem Schwarzschild-ráðus uppsprettunnar er $R_S = 2GM/c^2 = 3 (M/M_\odot) \text{ km}$ og M_\odot er massi sólar. Framsetningin í neðri línunni í jöfnu (1) er kvörðuð miðað við þyngdarbylgju frá árekstri tveggja nifteindastjarna eða svarthola í vetrarbrautþyrpingunni miklu í meyjarmerki (Virgo), en talið er að þar verði slíkir árekstrar að jafnaði á nokkurra áratuga

⁷ Í nákvæmari framsetningu verður að taka tillit til þess að um þini er að ræða. Þá er heppilegast að vinna í svokölluðum „sporlausum þverkráða“ („transverse–traceless (TT) gauge“) sem sýnir ótvírætt að þyngdarbylgjur eru þverstæðar þinabylgjur (sjá t.d. [13]).



Mynd 5. Sívalningslaga herminemi. Næmnin er mest þegar þyngdargeislunin stefnir hornrétt á samhverfuás sívalningsins. Myndin er fengin að láni hjá [23].

fresti (fjarlægðin til þyrpingarinnar er um 15 Mpc þar sem skammstöfunin þc stendur fyrir fjarlægðareininguna parsek og jafngildir 3,26 ljósárum).

Enn erfiðara er að sjá fjarlægari hamfarir. Sem dæmi má nefna, að til þess að nema nokkra árekstra á ári þarf að skoða þyrpingar í allt að 200 Mpc fjarlægð. Hlutfallsleg sveifluvidd þyngdarbylgju, sem kemur úr svo mikilli fjarlægð verður ekki stærri en $h_0 \sim 10^{-21}$ samkvæmt jöfnu (1). Markmiðið er, að LIGO nemarnir náði að nema merki frá öllum slíkum hamförum.

Ef um er að ræða árekstra nifteindastjarna eða svarthola í okkar eigin Vetrarbraut ($r \sim 10 \text{ kpc}$) verður $h_0 \sim 10^{-17}$, sem við fyrstu sýn virðist ekki svo slæmt. En þá verður að hafa í huga, að slíkir árekstrar verða sennilega ekki nema á hundrað þúsund ára fresti að meðaltali og því ekki vænlegt til árangurs að bíða eftir þeim. Í Vetrarbrautinni er hins vegar talsvert af þéttstæðum tvístirnum og spurningin er, hversu sterk geislunin er frá slíkum kerfum. Sem dæmi má taka tvístirni tífstjörnunna PSR1913+16. Það er í um 5 kpc fjarlægð og hefur $v_* \sim 10^{-3}c$. Sveifluviddin er því $h_0 \sim 10^{-23}$. Umferðatími kerfisins er hins vegar svo langur að hvorki LIGO né LISA geta numið geislunina (sjá nánar síðar). LISA ætti þó að geta séð nálæg tvístirni með styttri umferðatíma.

Jöfnu (1) má einnig nota til þess að áætla styrk þyngdargeislunar frá jarðneskum fyrirbærum, hvort heldur er í rannsóknastofu eða í náttúrunni. Tökum sem dæmi „þyngdarbylgjusendi“, sem er 10 tonn að þyngd, 10 metrar að stærð og með sveifluhraða $v_* \sim 1000 \text{ km/klst}$. Í 20 m fjarlægð er $h_0 \sim 10^{-36}$, sem er og verður ómælanleg stærð, að minnsta kosti í fyrir-

sjánlegri framtíð. Þetta sýnir betur en flest annað, að vænlegasta leiðin til þess að mæla þyngdarbylgjur er að leita að afstæðilegum lindum úti í geimnum.

Það mat, sem hér hefur verið sett fram, kann að vera í hærri kantinum, en ekki er ólíklegt að öðru hverju muni menn þó sjá talsvert öflugri þyngdarblossa frá fjarlægum hamförum. Ekki er heldur loku fyrir það skotið að mælingarnar muni leiða í ljós ný og áður óþekkt fyrirbæri.

Skoðum næst áhrif þyngdarbylgju á þyngdarbylgjunema og tókum LIGO sem dæmi. Þar er $L = 4$ km og $\Delta L = h_0 L/2$ er mesta breyting á lengd hvors arms um sig. Fyrir $h_0 \sim 10^{-21}$ fæst því að $\Delta L \sim 2 \times 10^{-17}$ m, sem er um einn þúsundasti úr þvermáli róteindar. Þetta eitt gefur vísbendingu um kröfurnar sem LIGO þarf að uppfylla. Kröfurnar eru reyndar heldur minni en þetta gefur til kynna, því leysigeislarnir eru látnir fara mörgum sinnum fram og aftur áður en þeir víxlast. Þegar, og ef, LISA fer út í geiminn verða til umráða milljón lengri armar, en það þýðir að dæmigerð lengdarbreyting verður um 2×10^{-11} m. Sú fjarlægð er svipuð og rásir vetrarsatömsins.

Þessar örsmáu sveiflur, sem hér hefur verið lýst, eru bein afleiðing af því hversu veikt þyngdaraflið er og hversu fjarlægur uppspretturarnar eru. Það gerir mönnum erfitt um vik við mælingar, en á móti kemur að efni alheimsins er því sem næst gagnsætt, þegar um þyngdargeislun er að ræða. Orkuflæðið dofnar að sjálfsögðu í öfugu hlutfalli við r^2 , en vegna veikrar víxlunar við efnið missir geislunin að öðru leyti litla sem enga orku á leiðinni. Hún kemst því nær óhindrað til jarðar frá fjarlægustu afkimum hins sýnilega heims. Þannig má til dæmis nota þyngdarbylgjur til að afla upplýsinga um næsta nágrenni svarthola, hversu langt sem þau eru í burtu. Menn láta sig jafnvel dreyma um, að með þyngdarbylgjunemum framtíðar megi skyggjast langleiðina aftur til Plancks-skeiðsins í sögu alheimsins. Í þessu sambandi má nefna, að þótt eðlisfræðingum hafi ekki enn tekist að setja saman fullmótaða skammtakenningu um þyngdina, þá er hægt að gefa skammtafræðilega lýsingu á veikum þyngdarbylgjum. Í þeirri lýsingu bera svokallaðar þyngdareindir (e. gravitons) þyngdarvíxlverkunina. Þyngdareindir hreyfast með ljóshraða og hafa því engan kyrrstöðumassa. Spuni þeirra er 2. Skammtalýsingin skiptir hins vegar litlu máli þegar um stjarnfræðilegar lindir er að ræða,

til dæmis stjörnusprengingar eða stjörnuárekstra. Þar nægir að nota sígilda þyngdarfræði Einsteins og skammtafræðilegar leiðréttingar eru hlutfallslega um 10^{-37} [21]. Hins vegar er mikilvægt að hafa í huga, að við mælingar á þyngdarbylgjum í víxlunarnemum og herminemum er að sjálfsögðu nauðsynlegt að beita venjulegri skammtafræði.

Ef uppspretta þyngdargeislunar hefur massa M , getur hún ekki haft minni rásir en R_S eða sent frá sér sterka þyngdargeislun með sveiflutíma T , sem er minni en ferðatími ljóss umhverfis svarthol með þann rásir. Þess vegna er $T \geq 2\pi R_S/c$ og tíðni þyngdarbylgjunnar uppfyllir skilyrðið

$$\nu \leq \frac{c^3}{4\pi GM} \sim 10^4 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-1} \text{ Hz} . \quad (2)$$

Um bylgjulengdina λ gildir því að

$$\lambda \geq \frac{4\pi GM}{c^2} \sim 30 \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \text{ km} . \quad (3)$$

Ætla má að öflugustu uppspretturarnar tengist þéttum hnöttum eða svartholum með $R \sim R_S$ og $M \sim M_\odot$ og því reikna menn með að hámarkstíðni sterkrar þyngdargeislunnar í geimnum sé í kringum 10^4 Hz og lágmarksbylgjulengdin um 30 km.

Lítum næst á orkuna sem þyngdarbylgja ber með sér. Í kennslubókum um þyngdarfræði Einsteins er sýnt fram á, að orkuflæði sléttbylgjunnar er gefið með jöfnunni

$$f = \left(\frac{c^3}{32\pi G}\right) \left\langle \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \right\rangle \quad (4)$$

$$\sim 10^{-5} \left(\frac{\nu}{100 \text{ Hz}}\right)^2 \left(\frac{h_0}{10^{-22}}\right)^2 \text{ W m}^{-2} .$$

Tíðnin 100 Hz er hér valin til kvörðunar þar sem LIGO-neminn er næmastur fyrir geislun á þeirri tíðni.

Til samanburðar má nefna, að ljósflæðið frá reikistjörnunni Júpíter er að meðaltali um $2 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$ hér á jörðinni. Á heiðskíru kvöldi sjáum við Júpíter greinilega vegna þess að ljósið víxlverkar auðveldlega við augað. Hins vegar verðum við aldrei vör við þyngdarblossa frá fjarlægum vetrarbrautum jafnvel þótt nokkrir slíkir fari í gegnum augu okkar í viku hverri og beri með sér álíka eða meiri orku en ljósið frá Júpíter. Ástæðan er að sjálfsögðu sú að þyngdarvíxlverkunin við augað er margfalt veikari en rafsegulvíxlverkun.

Þegar jafna (4) er heilduð yfir kúlufliót með miðju í uppsprettunni og radíus r fæst heildarafið í þyngdargeisluninni:

$$L_{\text{GW}} = \frac{dE}{dt} = \left(\frac{G}{5c^5} \right) \left\langle \left(\frac{d^3 Q}{dt^3} \right)^2 \right\rangle \quad (5)$$

$$\sim \left(\frac{c^5}{G} \right) \left(\frac{R_S}{D} \right)^2 \left(\frac{v_*}{c} \right)^6.$$

Þetta er einfölduð útgáfa af hinn þekktu tvíþólsformúlu Einsteins, sem áður var minnst á. Athugið að $c^5/G = 3.6 \times 10^{52}$ W. Fyrir PSR1913+16 er $R_S \sim 8$ km, $D \sim 10^6$ km og $v_* \sim 10^{-3}c$. Samkvæmt jöfnu (5) fæst $L_{\text{GW}} \sim 2 \times 10^{24}$ W. Þegar fram líða stundir fer L_{GW} vaxandi þar sem v_* eykst og D minnkar. Að lokum lenda stjörnur í árekstri með tilheyrandi þyngdarblossa. Til samanburðar má geta þess að sólin sendir frá sér rafsegulgeislun með heildarljósaflinu 4×10^{26} W.

Af jöfnu (3) má ráða að $\lambda \geq 2\pi R_S$, sem þýðir að bylgjulengd sterkrar þyngdargeislunar er ávallt svipuð að stærð eða stærri en útgeislunarsvæðið. Það hefur aftur á móti í för með sér að ekki er hægt að búa til skarpa þyngdarmynd af uppsprettunni, gagnstætt því sem gerist þegar venjuleg ljósmynd er tekin.⁸

Mælisvið LIGOs og annarra jarðbundinna þyngdarbylgjunema er takmarkað við hærri tíðni en 1 Hz. Ástæðan er sú, að mælingar á lægri tíðni eru óframkvæmanlegar á yfirborði jarðar vegna truflana frá smáskjálftum af völdum jarðhræringa og þyngdarbreytingum er stafa af hreyfingum hluta í umhverfinu. Til þess að losna við þennan vanda er nauðsynlegt að senda mælitækin út í geiminn. Það er ein af ástæðunum fyrir geimstöðinni LISA. En jafnvel LISA nær ekki að mæla geislun með minni tíðni en 10^{-4} Hz vegna slembitrings í geimstöðinni sjálfri.⁹

Eins og þegar hefur komið fram má ætla að LIGO og aðrir jarðbundnir víxlunarnemar, ásamt næstu kynslóð herminema, geti numið þyngdargeislun frá árekstrum nifteindastjarna eða svarthola allt

⁸ Skarpar ljósmyndir eru mögulegar þegar bylgjulengd ljóssins ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) er mun minni en fyrirmyndin.

⁹ Herminemar bregðast ágætlega við þyngdarbylgjum á tíðnisviði í kringum 10^3 Hz. Næmni LIGOs er hins vegar mest á bilinu $10 - 10^3$ Hz. Fyrir hærri tíðni en 10^3 Hz fer svokallað skotsuð (e. shot noise) í flæði leysiljóssins mjög vaxandi og takmarkar það mælisviðið verulega. Í LISA fer skotsuðið hins vegar að valda vandræðum ef tíðni þyngdarbylgju er hærri en 1 Hz.

út að endimörkum hins sýnilega heims. Einnig ættu þessir nemar að geta séð þyngdarhrun, sem er samfara myndun nifteindastjarna og svarthola, hvort sem slíkum atburðum fylgja stjörnusprengingar eða ekki. Einnig er líklegt að með þessum nemum megi fylgjast með snúningi og sveiflum nálægna nifteindastjarna og jafnvel mæla suðkennda þyngdargeislun frá hamskiptum, sem talið er að orðið hafi á ógnarheitu frumskeiði alheimsins.

LISA mun væntanlega geta séð þyngdargeislun frá hamfarakenndum atburðum er tengjast risasvartholum með massa $M \sim 10^3$ til $10^8 M_\odot$ og jafnframt reglubundna geislun frá nálægum tvístirnum, svo framarlega sem tíðnin er ekki of lág. Einnig ætti LISA að nema þyngdarsuð frá frumheimi.

Að lokum skal þess getið, að nota má ýmsa aðra tækni en hér hefur verið lýst til þess að afla upplýsinga um þyngdargeislun [21]. Þannig hafa Dopplermælingar á hraða geimflauga til dæmis verið notaðar til þess að setja efri mörk ($h_0 < 10^{-14}$) á tilvist þyngdarbylgna með tíðni á bilinu $10^{-4} - 10^{-2}$ Hz.¹⁰ Þá hafa nákvæmnismælingar á tífstjörnum einnig verið notaðar til þess að setja efri mörk á lágtíðnisuð ($10^{-9} - 10^{-7}$ Hz) frá frumheimi. Síðast en ekki síst er það von manna, að á næstu árum eða áratugum muni finnast í örbylgjukliðnum merki um þyngdarbylgjur með tíðni á bilinu $10^{-18} - 10^{-15}$ Hz. Slíkar bylgjur eru afleiðingar skammtaflökts í frumheimi, sem blés út vegna óðapenslu skömmu eftir Miklahvell.

6. Lokaorð

Árið 2003 verða liðin 87 ár frá því Einstein setti fyrst fram kenningu sína um þyngdargeislun. Þá verða einnig liðin rúm 40 ár frá því Weber reyndi fyrstur manna að mæla slíka geislun, og aldarfjórðungur frá því Taylor og félagar tilkynntu um mælingarnar á PSR1913+16. Mikill fjöldi eðlisfræðinga og annarra vísindamanna hafa unnið hörðum höndum að því að endurbæta eldri aðferðir og innleiða nýjar, með það fyrir augum að góma einhverja veikustu geislun sem um getur. Með tilkomu LIGOs og nýrri og öflugri nema virðist takmarkið loks í sjónmáli. Ef sú spá reynist rétt, fæst ekki aðeins langþráð staðfesting á

¹⁰ Dopplermælingar hafa t.d. verið gerðar á geimflugunum Voyager, Pioneer, Mars Observer, Ulysses og núna síðast á Cassini, sem er á leiðinni til Satúrnusar þegar þetta er ritað.

grundvallarhugmyndum Einsteins um eðli þyngdaraflsins, heldur má ætla að uppgötvunin opni nýtt og áhugavert svið til rannsókna á alheiminum.

Summary This article gives a short review of the field of gravitational wave physics. It starts with some history, describing among other things how Newton, Laplace and Poincaré thought about action at a distance and the speed of gravity. The contributions of Einstein, Eddington, Weyl, Bondi and others to the theory of gravitational radiation are also discussed. The work of Weber is mentioned. So is the work of Taylor and collaborators on the binary pulsar PSR1913+16. In the second part of the article, the physical nature and properties of gravitational waves are discussed. The principles on which laser interferometer detectors as well as resonant bar detectors are build are described. A short overview of gravitational wave sources is also provided.

Heimildir

- [1] Barish, B.C.: Gravitational Waves. Í *Cosmic Radiations: From Astronomy to Particle Physics*, ritstj. Giacomelli, G., Spurio, M. & Derkaoui, J.E. Kluwer Academic Publishers 2001, bls. 47–65.
- [2] Barish, B.C. & Weiss, R.: LIGO and the Detection of Gravitational Waves. *Physics Today*, okt. 1999, bls. 44–50.
- [3] (a) Bartusiak, M.: *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time*. Joseph Henry Press, Washington 2000.
(b) Blair, D.: *Ripples on a Cosmic Sea: The Search for Gravitational Waves*. Allen & Urvin, St Leonards 1997.
(c) Thorne, K.S.: *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. W.W. Norton & Co., New York 1994, 10. kafli.
- [4] Cutler, C. & Thorne, K.S.: An Overview of Gravitational-Wave Sources. Í prentun: World Scientific. Forprent: gr-qc/0204090.
- [5] Dickson, C.A. & Schutz, B.F.: Reassessment of the Reported Correlations between Gravitational Waves and Neutrinos Associated with SN 1987A. *Physical Review*, **D51**, 1995, bls. 2644–2668.
- [6] Einar H. Guðmundsson: Sprengistjarnan SN1987A. *Eðlisfræði á Íslandi IV*, ritstj. Jakob Yngvason og Þorsteinn Vilhjálmsson, Reykjavík 1989, bls. 11–30.
- [7] Einar H. Guðmundsson: Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði 1993. *Fréttabréf Háskóla Íslands*, okt.–nóv. 1993, bls. 12–15. Í frágangi ritsjórnar *Fréttabréfsins* á greininni urðu þau mistök að veldisvísar lækkuðu flugið. Þannig urðu 10^{-40} að 10 – 40 (bls. 13, hægri dálkur) og 10^{-12} að 10 – 12 (bls. 14, vinstri dálkur).
- [8] Einstein, A.: (a) Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse*, 1916, bls. 688–696.
(b) Über Gravitationswellen. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse*, 1918, bls. 154–167.
- [9] (a) Gibbs, W.W.: Ripples in Spacetime. *Scientific American*, apríl 2002, bls. 48–57.
(b) Sanders, G.H. & Beckett, D.: LIGO: An Antenna Tuned to the Songs of Gravity. *Sky & Telescope*, okt. 2000, bls. 41–48.
- [10] Heilbron, J.L.: *Elements of Early Modern Physics*. University of California Press, Berkeley 1982.
Fróðlega sýn á vaka er m.a. að finna í riti Stefáns Björnssonar, síðar reiknimeistara: *Dissertatio de usu astronomiae in medicina, cujus praeliminaria de influxu corporum caelestium systematis nostri solaris in tellurem nostram mediante vi luminaria et magnetica (Fyrirlestur um gagnsemi stjörnufræði í læknislist. Inngangur um áhrif himinhnatta sólkerfis vors á jörð vora með ljós- og segulafli)*, Khöfn 1759. Ritgerðin fjallar reyndar ekkert um læknislist eins og fyrri hluti titilsins gæti gefið til kynna, heldur um sólarljós og þyngdarafl. Stefán er fyrsti Íslendingurinn, sem vitað er til að hafi verið vel að sér í kenningum Newtons.
- [11] Laplace, P.S.: Sur le Principe de la Gravitation Universelle. Greinin er frá 1776, en endurprentun má finna í *Oeuvres complètes de Laplace VIII*. Gauthier-Villars et fils, Paris 1891, bls. 201-275. Sjá einnig *Traité De Mécanique Céleste*, 4. bindi, 10. bók, kafli 7, grein 22. París 1825. Endurprentuð í *Oeuvres complètes de Laplace*. Gauthier-Villars et fils, Paris 1891. Ensk þýðing: *A Treatise in Celestial Mechanics*, Chelsea, New York 1966, 4. bindi, bls. 642-645.
- [12] Maxwell, J.C.: *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. Ritstj. Niven, W.D. Dover, New York 1965.
- [13] [13] Misner, C.W., Thorne, K.S. & Wheeler, J.A.: *Gravitation*. W.H. Freeman and Company, San Fransisco 1973.
- [14] Poincaré, H.: Sur la dynamique de l'électron. *Comptes rendus Académie des Sciences-Paris*, **140**, 1905, bls. 1504-1508.
- [15] Poincaré, H.: La dynamique de l'électron. Í *Revue générale des sciences pures et appliqués* **19**, 1908, bls. 386-402. Ensk þýðing: The New Mechanics. Í *Science and Method*. Dover, New York 1952, bls. 199-250.
- [16] Saulson, P.R.: If Light Waves Are Stretched by Gravitational Waves, How Can We Use Light as

- a Ruler to Detect Gravitational Waves? *American Journal of Physics*, **65**, júní 1997, bls. 501–505.
- [17] Schutz, B.F.: Gravitational Waves on the Back of an Envelope. *American Journal of Physics*, **52**, maí 1984, bls. 412–419.
- [18] Schutz, B.F.: (a) Gravitational Radiation. Forprent: gr-qc/0003069.
(b) Lighthouses of Gravitational Wave Astronomy. Forprent: gr-qc/0111095.
- [19] Taylor, J.H. & McCulloch, P.M.: Evidence for the Existence of Gravitational Radiation from Measurements of the Binary Pulsar PSR1913+16. *Ninth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*. Ritstj. Ehlers, J., Perry, J.J. & Walker, M. New York 1980, bls. 442-446.
- [20] (a) Taylor, J.H.: Binary Pulsars and Relativistic Gravity. *Reviews of Modern Physics*. **66**, 3, 1994, bls. 711-719.
(b) Hulse, R.A.: The Discovery of the Binary Pulsar. *Reviews of Modern Physics*. **66**, 3, 1994, bls. 699-710.
- [21] Thorne, K.S.: Gravitational Radiation. Í *300 Years of Gravitation*. Ritstj. Hawking S.W. & Israel, W. Cambridge University Press 1987, bls. 330–458.
- [22] Weisberg, J.M. & Taylor, J.H.: The Relativistic Binary Pulsar B1913+16. Í prentun. Forprent: astro-ph/0211217.
- [23] Weiss, R.: Gravitational Radiation. *Reviews of Modern Physics*. **71**, 2, 1999, bls. S187–196. Erratum: *Reviews of Modern Physics*. **71**, 4, 1999, bls. 1247.
- [24] Will, C.M.: Gravitational Radiation and the Validity of General Relativity. *Physics Today*, okt. 1999, bls. 38–43.

Um höfundinn: Einar H. Guðmundsson er prófessor í eðlisfræði við Háskóla Íslands.

Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík
einar@raunvis.hi.is

Móttekin: 3. apríl 2003