

Svarthol og skammtafræði

Lárus Thorlacius

Raunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 15. nóvember 2004

Ágrip – Eitt af viðfangsefnum kennilegrar eðlisfræði er að leita skilnings á innstu gerð efnisheimsins. Til að ná því markmiði þarf að finna kenningu e sameinar lýsingu skammtafræðinnar á hinu örsmáa og lýsingu afstæðiskenningarinnar á rúmi og tíma. Svarthol eru náttúrufrýrbæri þar sem báðar þessar kenningar koma við sögu. Með því að rýna í tímaþróun kerfis, sem inniheldur svarthol, má finna vísbendingar um eðli hinnar sameinuðu kenningar. Niðurstaðan er að eðlisfræði rúms og tíma hljóti að vera óstaðbundin þó að þess gæti lítið við daglegar aðstæður.

1. Inngangur

Stjarnvísindi nútímans hafa frá mörgum framandi fyrirbærum að segja en þeirra á meðal eru svonefnd svarthol ef til vill furðulegust allra. Í svartholi birtist þyngdaraflið í sinni öflugustu mynd og hefur alla aðra krafta náttúrunnar undir. Ekkert efni, sem berst inn fyrir sjóndeild (e. event horizon) svarthols, á þaðan afturkvæmt. Jafnvel ljós, sem þó fer hraðar en nokkuð efni, kemst ekki útfyrir sjóndeild svarthols samkvæmt jöfnum almennu afstæðiskenningar Einsteins, en sú kenning liggur til grundvallar skilningi okkar á eðlisfræði þyngdarinnar.

Áhugi eðlisfræðinga á svartholum á sér mismunandi ástæður en ein sú mikilvægasta er sú að þau eru að öllum líkum til í náttúrunni. Að sjálfsögðu er erfitt að koma auga á svarthol því þau gleypa það ljós sem á þeim lendir en þyngdarsvið þeirra er sterkt og hefur áhrif á efni í næsta nágrenni. Í sumum tilfellum má greina í mælitækjum útgeislun frá efni, sem talið er vera á leið inn í svarthol, en í öðrum tilvikum má ráða nærveru svarthols af göngu nálægra hnatta. Á grundvelli slíkra óbeinna athugana hafa stjarnvísindamenn fært sannfærandi rök fyrir tilvist svarthola¹ en ekki verður farið nánar út í þá sálma hér.

Önnur ástæða fyrir áhuga eðlisfræðinga á svart-holum er af fræðilegum toga. Þeim er lýst með lausnum á jöfnum afstæðiskenningarinnar, sem innihalda sérgildi (e. singularity), þar sem mikilvægar kenni-

stærðir eru illa skilgreindar. Í grófum dráttum lýsa þessi sérgildi því að mælanlegir eiginleikar eins og til dæmis flóðkraftar, sem verka á efni, stefni á óendanlegt. Raunveruleg mæling getur hinsvegar aldrei gefið óendanlega niðurstöðu. Sérgildi í lausn á jöfnum tiltekinnar kenningar segir okkur því að notagildi kenningarinnar sé takmarkað. Í sumum tilfellum er ekki ástæða til að gera mikið veður út af sérgildum. Lögmál Coulombs lýsir rafkraftinum á milli hleðslna í sígildri rafsegulfræði. Þessi kraftur stefnir vissulega á óendanlegt þegar tvær andstæðar punkthleðslur rekast beint á hvor aðra en við vitum jafnframt að slík lausn er mjög sérstök því að jafnaði fara hleðslurnar eitthvað á mis og þá er rafkrafturinn ávallt endanlegur.² Það verður hinsvegar að taka á sérgildum í afstæðiskenningunni af meiri alvöru. Þau koma ekki bara fyrir í einstökum lausnum þar sem óvenjuleg samhverfa er fyrir hendi eins og í dæminu hér á undan úr rafsegulfræði heldur er sérgildi að finna í *dæmigerðum* lausnum í afstæðiskenningunni. Þessa staðreynd sönnuðu þeir Hawking og Penrose í nokkrum skrefum á sjöunda áratug síðustu aldar [2] og má segja að sérstæðusetningar (e. singularity theorems) þeirra félaga hafi valdið straumhvörfum í þyngdarfræði. Sérgildin eru ekki alltaf falin inni í svartholum. Til dæmis eiga hugmyndir manna um *miklahvell*, sprenginguna miklu sem markaði upp-

² Reyndar vitum við líka að sígild rafsegulfræði á ekki lengur við þegar hleðslur fara mjög nálægt hver annarri heldur kemur þá til kasta skammtarafsegulfræði sem leysir úr þessum vanda.

¹ Um það má til dæmis lesa í [1].

haf alheimsins, rætur sínar að rekja til þess að lausnir á jöfnum Einsteins, sem taka til alheimsins í heild sinni, innihalda jafnan sérgildi.

Svarthol eru einnig áhugaverð sökum þess að fræðileg umfjöllun um þau krefst þess að skoðað sé samspil milli almennu afstæðiskenningarinnar og skammtafræði, eins og nánar verður sagt frá hér á eftir. Þessar tvær kenningar, skammtafræðin og afstæðiskenningin, eru hornsteinar nútímaeðlisfræði. Skammtafræðin lýsir heimi hins örsmáa; frumeindunum og sameindunum, sem við erum öll samsett úr, og enn smærri ögnum, sem er að finna inni í frumeindunum eða myndast í árekstrum milli agna í svo nefndum agnahröðlum. Skammtafræðin er hagnýtt á margvíslegan hátt í daglegu lífi og er ein af undirstöðum velmegunar nútímans. Afstæðiskenningin kemur minna við sögu í daglegu amstri. Hún lýsir hreyfingum hnatta í sólkerfinu og ennþá stærri kerfum eins og vetrarbrautinni, hópum vetrarbrauta og síðast en ekki síst alheiminum í heild sinni. Afstæðiskenningin hefur því ekki reynst eins hagnýt og skammtafræðin en það dregur ekki úr mikilvægi hennar innan eðlisfræðinnar. Þessar kenningar hafa hvor um sig mótað heimsmynd nútímans á afgerandi hátt.

Í ljósi þessa er athyglisvert hversu frábrugðnar hvor annarri afstæðiskenningin og skammtafræðin eru. Þær styðjast báðar við stærðfræðilega framsetningu á eðlisfræðilögmálum en nota ákaflega mismunandi stærðfræði. Í skammtafræði er línuleg fallagreinung í aðalhlutverki meðan afstæðiskenningin byggir á deildarúmfræði. Ef reynt er að fella aðra kenninguna að formgerð hinnar lenda menn í stærðfræðilegum ófærum sem koma í veg fyrir að úr verði nothæf eðlisfræði. Á hinn bóginn lýsa báðar þessar kenningar sömu veröldinni og því er eðlilegt að leita að sameinadri kenningu sem nær yfir verksvið beggja. Auðvitað má spyrja hvort nauðsyn krefji að finna slíka sameinada kenningu. Þyngdarsvið einstakra öreinda er hverfandi miðað við önnur svið, sem umlykja þær, eins og rafsvið eða litasvið sterku víxlverkunarinnar og því er lítil þörf á almennu afstæðiskenningunni á lengd-arkvarða öreindanna. Jafnframt eru áhrif einstakra öreinda á göngu himintunglanna ákaflega veik og til lítills að flækja útreikninga stjarnvísindamanna með skammtafræði. Þetta er vissulega rétt en ef við leitum skilnings á grundvallarlögmálum eðlisfræðinnar þá verðum við að finna þeim sameiginlegan vettvang þar sem bæði gætir skammtaáhrifa og þyngdaráhrifa

því þessi áhrif eru alltaf bæði til staðar þótt önnur kunnni að veða þyngra en hin í tilteknu kerfi. Mikilvægi svart-hola í kennilegri eðlisfræði liggur ekki síst í því að ekki verður hjá því komist að taka tillit til bæði þyngdar og skammtaáhrifa þegar fjallað er um þau. Annað slíkt tilfelli er miklihvellur þar sem alheimurinn spratt fram úr upphafsástandi sem ekki verður lýst nema fyrir tilstilli sameinaðrar kenningar.

2. Svarthol frá fræðilegu sjónarhorni

Eins og áður sagði vekja svarthol áhuga fræðimanna bæði vegna þess að þar koma upp sérgildi í lausnum almennu afstæðiskenningarinnar, sem kalla á nýja kenningu til að fást við ofursterkt þyngdarsvið, og eins vegna þess að skammtafræði leikur mikilvægt hlutverk við hlið afstæðiskenningarinnar þegar svarthol eru skoðuð. Þessar tvær ástæður eru reyndar nátengdar og líklegt að hver sú kenning sem leysir vandamálið varðandi sérgildi muni einnig lýsa skammtaáhrifum. Svarthol eru því nokkurskonar tilraunastofur fyrir kennilega eðlisfræði þar sem hægt er að prófa nýjar hugmyndir um gerð og gangverk alheimsins og velja þær vænlegustu úr. Í þessari grein verður rakin ein slík tilraun og reynt með því að gefa lesandanum innsýn í rannsóknir á þessu sviði. Nýlega yfirlitgrein um sama efni er að finna í [3].

Reynt verður að halda tæknilegri umfjöllun í lágmarki en viðfangsefnið kallar óhjákvæmilega á ýmis hugtök úr nútímaeðlisfræði sem of langt mál yrði að útskýra hvert um sig. Það verður þó ekki hjá því komist að ræða hugtakið *tímarúm* en það er fjórviðt rúm, sem hefur hinar hefðbundnu þrjár rúmviðdir, og að auki mælir fjórði hnitaásinn tímann. Í takmörkuðu afstæðiskenningunni, sem lýsir hreyfifræði hluta þegar þeir nálgast ljóshraða en tekur ekki til þyngdaráhrifa, er hentugt að setja fram jöfnur fræðanna í slíku tímarúmi en það ber enga nauðsyn til þess og vel hægt að komast af með rúm og tíma hvort í sínu lagi. Í almennu afstæðiskenningunni er tímarúmið hinsvegar í aðalhlutverki og afar erfitt að henda reiður á rúmi og tíma hvoru í sínu lagi. Helstu kennistærðir í þessum fræðum lýsa rúmfræði tímarúmsins. Þyngdarsvið kemur til dæmis fram sem rúmfræðileg sveigja í tímarúminu³ og flóðkrafta má rekja til þess að *gagnvegir*, það sem kemst næst beinum línunum í sveigðu rúmi, sem eru samsíða á tilteknum stað fjarlægjast eða nálgast

³ Fjallað er um tímarúm og sveigju á aðgengilegan hátt í [4].

hvern annan þegar frá dregur. Fyrir þá sem vilja kynna sér almennu afstæðiskeninguna má benda á fjölda erlendra kennslubóka en efni á íslensku er meðal annars að finna í [4, 5].

2.1. Schwarzschild svarthol

Jöfnur Einsteins eru afleiðujöfnur eins og almennt gerist um hreyfingarjöfnur í eðlisfræði. Þær lýsa því hvernig sveigja tímarúmsins stjórnast af því efni, sem þar er að finna, nánar tiltekið af orkunni sem fólgin er í efninu. Eins og fyrr sagði svarar sveigja tímarúmsins til þyngdarsviðs og í þessu þyngdarsviði er fólgin orka, sem hefur sín áhrif á rúmfræði tímarúmsins ekkert síður en önnur orka. Af þeim sökum eru jöfnur Einsteins *ólínulegar* afleiðujöfnur og það hefur afgerandi áhrif þegar þyngdarsviðið er sterkt eða kerfið, sem verið er að skoða, er mjög stórt.

Í tímarúmi, sem inniheldur svarthol, er þessi ólínulega hegðun í fyrirrúmi. Einfaldasta lausn sem lýsir slíku tímarúmi er kennd við Karl Schwarzschild, sem fann hana árið 1916 meðan hann gegndi herþjónustu í fyrri heimstyrjöldinni [6]. Þá var innan við ár frá því að Einstein birti hreyfingarjöfnur sínar opinberlega. Schwarzschild lausnin lýsir sveigju tímarúmsins í tómi umhverfis kyrrstæðan, kúlusamhverfan massa. Hún kemur meðal annars að notum við að reikna út áhrif sólarinnar á göngu reikistjarnanna.⁴ Í slíkum útreikningum kemur fram örlítið, en þó mælanlegt, frávik frá því sem þyngdarfræði Newtons segir fyrir um og það er niðurstaða almennu afstæðiskeningarinnar sem er í samræmi við nákvæmar athuganir stjörnufræðinga á göngu innstu reikistjarnanna.

Lausn Schwarzschilds á ekki lengur við þegar kemur inn fyrir yfirborð sólarinnar því inni í sólinni er efni en ekki tómt. Þar er sveigju tímarúmsins lýst með annari lausn á jöfnum Einsteins sem lagar sig að orkuþéttleika efnisins í iðrum sólar. Ef við hugsum okkur hinsvegar mun samþjappaðri hnött en sólina þá er hægt að fylgja Schwarzschild lausninni mun lengra innávið og sjá hvernig hin ólínulega hegðun verður sífellt meira áberandi. Ef yfirborðsflatarmál hins þetta hnattar fer undir ákveðið lágmark, sem kallað er *Schwarzschild flatarmálið* og ræðst eingöngu af heildarmassa hlutar-

⁴ Sólín er reyndar ekki alveg kúlulaga og hún snýst um möndul sinn en frávik frá kúlulögun er hverfandi miðað við vegalengdir milli hnatta í sólkerfinu og hverfiþunginn er tiltölulega lítill þannig að gera má þessa nálgun.

ins, þá getur hnötturinn ekki haft neitt stöðugt yfirborð heldur fellur algjörlega saman undan eigin þyngd. Þá hefur orðið til svarthol í tímarúminu. Nafnið svarar til þess að enginn athugandi, sem hættir sér of nálægt slíku fyrirbæri, á þaðan afturkvæmt og eftir að hann fer innfyrir svonefnda *sjóndeild* (e. event horizon) geta engin merki frá honum borist út því jafnvel ljós sleppur ekki úr greipum svarthols. Yfirborðsflatarmál sólarinnar er á að giska tíu milljón milljón ferkílómetrar en Schwarzschild flatarmál sjóndeildar svarthols með sama massa og sólin er ekki nema um hundrað ferkílómetrar. Þéttleiki efnis þarf því að verða afar mikill til að það falli saman í svarthol.⁵

Það er freistandi að hugsa sér sterka þyngdarkrafta í þessu samhengi en mikilvægt er að hafa í huga að í afstæðiskeningunni verka ekki þyngdarkraftar heldur er það sveigja tímarúmsins sem ræður hreyfingu efnisins. Allt efni, og ljós reyndar einnig, ferðast í gegnum tímarúmið eftir gagnvegum og inni í svartholi er sveigja tímarúmsins orðin slík að engir gagnvegir, sem eru færir efni eða ljósi, liggja þaðan út. Það sem verra er fyrir ólánsaman athuganda, sem lendir inni í svartholi, er að allar færar leiðir enda í sérgildi þar sem sveigja tímarúmsins vex upp úr öllu valdi og flóðkraftar, sem ekkert fær hamið, kreista hann og slíta sundur. Það er alveg sama til hvaða ráða gripid er eftir að komið er inn fyrir sjóndeildina, sérgildið verður ekki umflúið eftir hámarkstíma sem ræðst af massa svartholsins. Ef svartholið hefur sama massa og sólin lendir athugandi í sérgildinu um það bil millisekúndu eftir að hann fer innfyrir sjóndeildina en hann getur haft nokkra mánuði til að velta fyrir sér örlögum sínum ef hann berst inn í risasvarthol, með samanlagðan massa milljarða sólstjarna, eins og talið er að sé að finna í miðjum vetrarbrauta af ákveðinni gerð.

2.2. Svarthol almennt í afstæðiskeningunni

Schwarzschild lausnin er tiltölulega einföld að gerð. Hún lýsir kúlulaga svartholi, sem athugendur geta farið inn í og endað ferðina í sérgildi, en hún inniheldur líka annað svæði í tímarúminu sem mun erfiðara er að túlka á skynsamlegan hátt. Það er stundum kallað *hvíthol* enda er það á vissan hátt andstæða svarthols. Hvítholið inniheldur sérgildi, sem er sýnilegt fjarlæg-

⁵ Þéttasta efni, sem vitað er um, er að finna inni í nifteindastjörnum. Yfirborðsflatarmál nifteindastjörnu, sem hefur massa á við sólina, er nokkur þúsund ferkílómetrar.

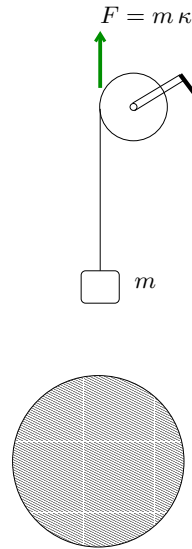
um athugendum, því allir gagnvegir, færir efni og ljósi, liggja út úr hvítholinu. *Nakið* sérgildi af þessu tagi er mjög óæskilegt í fræðunum vegna þess að allar kennistærðir eru illa skilgreindar þar og því getur *nakið* sérgildi í raun geislað út hverju sem er. Öðru máli gegnir um sérgildi inni í svartholi því það er ávallt falið handan við sjöndeldina.⁶

Ástæðan fyrir þessum vandræðum er að Schwarzschild tímarúmið er það sem kallað er kyrrstætt (e. static) og til að komast fyrir vandann þarf að finna lausn á jöfnum Einsteins, sem lýsir tímarúmi þar sem efni fellur saman undan eigin þyngd og myndar svarthol. Slíkar þyngdarhrunslausnir eru flóknari en Schwarzschild lausnin og reyndar sjaldnast hægt að lýsa þeim í smáatriðum nema með aðstoð tölvu. Þær eru hinsvegar lausar við hvíthol og svara til ferlis, sem talið er að fari fram í náttúrunni, til dæmis í iðrum sprengistjörnu þegar hráefni í kjarnasamruna þrýtur. Í þessari grein þurfum við ekki á nákvæmum þyngdarhrunslausnum að halda heldur nægir að átta sig á nokkrum almennum eiginleikum svarthola, sem alla má leiða út með hjálp Einstein jafnanna þó að það verði ekki gert hér.

Í fyrsta lagi eru svarthol alls ekki eins fjölbreytt og stjörnur sem talið er að þau myndist úr. Eftir að þyngdarhrun á sér stað leitar svartholið á tiltölulega stuttum tíma í lokaástand sem einkennist eingöngu af massa þess, hverfiþunga og rafhleðslu. Þetta eru allt stærðir sem tengjast langdrægum sviðum umhverfis svartholið sem fjarlægir athugendur geta mælt. Rafhleðslan er uppspretta rafsviðs meðan massinn og hverfiþunginn valda mælanlegri sveigju tímarúmsins fjarri svartholinu eða með öðrum orðum þyngdarsviði þess. Í fræðunum er þessi niðurstaða sett fram sem eingildissetning um lausnir á jöfnum Einsteins, svonefnd *skallasetning* (e. no-hair theorem) [7]. Nafnið vísar til þess að svarthol virðast ekki hafa nein einkenni, sem bundin eru við yfirborð sjöndeildarinnar, heldur er það slétt og fellt.

Annar mikilvægur eiginleiki svarthola samkvæmt almennu afstæðiskeningunni er að í sérhverju ferli sem svarthol tekur þátt í, hvort sem það gleypir efni eða lendir í árekstri við annað svarthol, þá minnkar heildarflatarmál sjöndeilda í tímarúminu aldrei. Þetta er afleiðing af svonefndri *flatarmálssetningu* (e. area

⁶ Jafnvel athugendur, sem falla inn í svartholið, sjá ekki sérgildið því þeir lenda þar áður en nein geislun frá því berst til þeirra.



Mynd 1. Ímynduð mæling á yfirborðshröðun svarthols.

theorem) [8]. Kyrrstætt svarthol stækkar þegar það bætir við sig massa en flatarmál sjöndeildarinnar er líka háð hverfiþunga svartholsins þannig að skoða þarf vandlega þau tilfelli þar sem bæði massi svartholsins og hverfiþungi þess breytast. Ennfremur er árekstur tveggja eða fleiri svarthola flókið ferli, sem ekki er raunhæft að ætla sér að lýsa í smáatriðum, en niðurstaðan er engu að síður sú að samanlagt flatarmál allra sjöndeilda í tímarúminu er stærra eftir áreksturinn heldur en það var fyrir.

Áður en lengra er haldið er rétt að kynna til sögunnar mikilvæga kennistærð, svonefnda *yfirborðshröðun* (e. surface gravity) svarthols, sem táknuð er með κ . Tæknileg skilgreining á yfirborðshröðun verður ekki gefin hér en í grófum dráttum má skýra hana útfrá mynd 1. Hugsum okkur hlut með massa m sem látinn er síga niður að sjöndeild kyrrstæðs svarthols úr mikilli hæð. Þá er krafturinn, sem vindan á myndinni þarf að beita á tógina til að halda hlutnum kyrrum, gefinn með $F = m\kappa$. Athugið að vegna svonefnds *þyngdarrauðviks*, sem er grundvallareiginleiki þyngdarsviðs í almennum afstæðiskeningunni og veldur því meðal annars að klukkur ganga hægar niðri í kjallara en uppi á hanabjálka,⁷ þá er þetta alls ekki sami kraftur og tógin verður að bera hjá hlutnum sjálfum. Sá

⁷ Þessi áhrif hafa verið staðfest í mælingum og hafa raunar hagnýtt gildi því leiðréttá verður fyrir þeim ef nota á merki frá gervitunglum til að ákvarða staðsetningu á jörðu niðri með GPS búnaði.

kraftur vex upp úr öllu valdi þegar nær dregur sjóndeildinni og því er í raun ekki til nein sú tóg sem gæti haldið hlutnum þar. Það er engu að síður gagnlegt að ímynda sér óendanlega sterka tóg og skilgreina yfirborðshröðun svartholsins út frá kraftinum, sem vindan þarf að skila þegar hluturinn nemur við sjóndeildina, því sá kraftur er endanlegur og í réttu hlutfalli við massa hlutarins. Tæknilegu skilgreininguna, sem ekki var sýnd hér, má alhæfa þannig að hún nái ekki aðeins yfir kyrrstæð svarthol heldur einnig þau sem snúast. Nú segir skallasetningin að aðeins þurfi þrjár kennistærðir til að lýsa tilteknu svartholi eftir að myndunarferli þess lýkur, það er að segja massa þess, hverfiþunga og rafhleðslu. Yfirborðshröðunin er því ekki ný óháð kennistærð, heldur má skrifa hana sem fall af hinum þremur.⁸ Mikilvægi hennar liggur í því að einmitt þessi samsetning af M , J og Q kemur fyrir í mörgum jöfnum fræðanna og hún leikur stórt hlutverk í athyglisverðri og óvæntri samsvörun á milli þyngdarfræði og varmafræði.

2.3. Svarthol og varmafræði

Ef eingöngu eru skoðuð ferli þar sem breytingar á kennistærðum svarthols eru örsmáar má leiða út líkingu sem tengir breytinguna á flatarmáli sjóndeildarinnar dA við breytingar á massa þess dM og hverfiþunga dJ ,

$$\frac{c^2}{8\pi G} \kappa dA = c^2 dM - \Omega_H dJ.$$

Hér er κ áðurnefnd yfirborðshröðun, Ω_H er hornhraði sem einkennir snúning svartholsins, c er ljóshraðinn og G þyngdarfasti Newtons. Þessi líking er stundum nefnd fyrsta lögmál svartholafræðinnar vegna þess hve henni svipar til fyrsta lögmáls varmafræðinnar. Þessi samlíking við varmafræði nær reyndar mun lengra og hefur orðið mönnum innblástur í vangaveltum um eðli og eiginleika svarthola allar götur síðan hún kom fram á sjónarsviðið á fyrri hluta áttunda áratugarins.

Í töflu 1 eru almenn lögmál, sem gilda um svarthol, sett fram við hlið lögmála varmafræðinnar. Við höfum þegar rætt um fyrsta lögmálið. Flatarmálssetning Hawkings svarar til annars lögmáls varmafræðinnar, sem segir að varmafræðileg óreiða S vaxi eða standi í stað í sérhverju ferli. Núllta lögmál varmafræðinnar

⁸ Til dæmis er yfirborðshröðun kyrrstæðs svarthols án hverfiþunga og rafhleðslu gefin með $\kappa = \frac{c^4}{4GM}$.

segir að kerfi í varmajafnvægi hafi sama hitastig alls staðar en um svarthol gildir að yfirborðshröðunin er sú sama alls staðar á sjóndeild svarthols, eða með öðrum orðum að það skiptir ekki máli úr hvaða átt hluturinn á mynd 1 er látinn síga niður að sjóndeildinni. Að lokum segir þriðja lögmálið að ekkert ferli í varmafræði geti komið hitastigi kerfis niður í alkul en tilsvarendi staðhæfing um svarthol er að ekkert ferli færir yfirborðshröðun svarthols niður í núll.

Þegar tafla 1 er skoðuð sést greinilega að reglum sem gilda um svarthol svipar til lögmála varmafræðinnar en samsvörunin milli þessara annars óskyldu fræðigreina ristir mun dýpra en það. Árið 1973 færði Bekenstein rök fyrir því að svarthol hljóti að bera varmafræðilega óreiðu [9] því að öðrum kosti mætti kollvarpa öðru lögmáli varmafræðinnar. Hugsum okkur að kerfi innihaldi svarthol með yfirborðsflatarmál A_0 ásamt lokuðu fláti með gasi í, sem hefur óreiðu S_0 . Ef svartholið ber enga óreiðu þá er heildaróreiða kerfisins í upphafi gefin með S_0 . Nú er flátið látið falla inn í svartholið þannig að lokaástand kerfisins innihaldi eingöngu svarthol með flatarmál A_1 en ekkert flát lengur. Ef svarthol bera ekki óreiðu þá er heildaróreiða kerfisins nú orðin núll, sem er minna en S_0 , í mótsögn við annað lögmál varmafræðinnar. Þessi mótsögn er hinsvegar ekki til staðar ef við tileinkum svartholi varmafræðilega óreiðu í réttu hlutfalli við flatarmál sjóndeildarinnar. Samkvæmt flatarmálssetningunni er A_1 stærra en upphaflega flatarmálið A_0 og því vex óreiða svartholsins við það að gleypa í sig flátið og ef hlutfallsstuðullinn milli flatarmáls svarthols og óreiðu þess er nógu stór þá vex heildaróreiðan í þessu ferli.

Bekenstein setti fram alhæfingu á öðru lögmáli varmafræðinnar þar sem óreiða fólgin í svartholum er talin með [10]. Hann lagði ennfremur til að samsvörunin milli varmafræði og þyngdarfræði, sem sést í töflu 1, sé tekin bókstaflega og kennistærðum um svarthol gefin varmafræðileg túlkun. Ef við skoðum fyrsta lögmálið með þetta í huga sjáum við að ef óreiða svarthols er í réttu hlutfalli við flatarmál sjóndeildarinnar þá eigum við að tileinka svartholinu hitastig sem stendur í réttu hlutfalli við yfirborðshröðun þess. Núllta lögmálið og það þriðja styðja einnig þessa túlkun en Bekenstein og aðrir gerðu sér engu að síður grein fyrir augljósum galla, sem varð til þess að þessum hugmyndum var tekið með fyrirvara. Í varmafræði sendir sérhver heitur hlutur nefnilega frá sér geislun, svonefnda varmageislun, sem hefur litróf er einkennist af hitastigi hlutarins,

LÖGMÁL	VARMAFRÆÐI	SVARTHOL
0.	T er hið sama um allt kerfi í varmajafnvægi	κ er hið sama um alla sjóndeild svarthols
1.	$T dS = dE + P dV - \Omega dJ$	$\frac{c^2}{8\pi G} \kappa dA = c^2 dM - \Omega_H dJ$
2.	$\delta S \geq 0$	$\delta A \geq 0$
3.	$T \rightarrow 0$ í öllum ferlum	$\kappa \rightarrow 0$ í öllum ferlum

Tafla 1. Samanburður á lögmálum er varða svarthol og varmafræði.

en samkvæmt afstæðiskenningunni gleypa svarthol í sig efni og geislun en frá þeim kemur ekkert, hvorki geislun né nokkuð annað. Úr þessu verður ekki leyst með þyngdarfræði afstæðiskenningarinnar einni saman en árið 1975 urðu straumhvörf í þessum fræðum þegar Hawking sýndi fram á að svarthol senda frá sér geislun vegna skammtaáhrifa [11], eins og nánar verður sagt frá í næsta kafla. Hann reiknaði jafnframt út litróf geislunarinnar og sá að um var að ræða varma-geislun. Tilsvandi hitastig er kallað *Hawking hitastig* svartholsins og stendur í réttu hlutfalli við yfirborðs-hröðun þess alveg eins og samsvörunin við varmafræði bendir til. Hawking hitastig kyrstæðs svarthols, sem ber hvorki rafhleðslu né hverfipunga, er gefið með

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi kGM},$$

þar sem M er massi svartholsins. Hinir ýmsu fastar, sem koma fyrir í jöfnunni, tengjast mismunandi kenningum eðlisfræðinnar. Planck fastinn \hbar tilheyrir skammtafræði, ljóshraði c og þyngdarfastinn G koma fyrir í afstæðiskenningunni og loks er Boltzmann fastinn k úr varmafræði. Það að Hawking hitastigið felur þá alla í sér vísar til þess að þessar kenningar þurfa allar að koma saman til að lýsa eðlisfræði svarthola.

Niðurstöður Hawking renndu stöðum undir varmafræðilega túlkun kennistærða, sem einkenna svarthol, en þó vantaði nokkuð upp á að fullum skiln-

ingi á varmafræði svarthola væri náð. Með því að úthluta svartholi óreiðu í réttu hlutfalli við flatarmál sjóndeildarinnar er hægt að tryggja að annað lögmál varmafræðinnar haldi velli. Raunar má ákvarða hlutfallsstuðulinn milli óreiðunnar og flatarmálsins með því að stinga jöfnunni fyrir Hawking hitastigið inn í fyrsta lögmálið í töflu 1,

$$S_{\text{svarthol}} = \frac{kc^3 A}{4G\hbar}.$$

Þessi jafna segir okkur hinsvegar ekkert um það hvernig óreiða svartholsins er til komin. Í nútíma-eðlisfræði byggir varmafræði jafnan á grunni svo-nefndar safneðlisfræði. Venjulegt efni er samsett úr aragrúa örsmárra agna. Andrúmsloftið inniheldur til dæmis ótal sameindir af ýmsum gerðum. Það er óvinnandi vegur að fylgjast með hreyfingum allra þessara agna og reyndar er það óþarfi ef ætlunin er einungis að lýsa stórsæjum eiginleikum efnisins. Í því tilfelli má skilgreina kennistærðir með því að taka meðaltöl yfir tilsvandi eiginleika allra agna í tilteknu rými og það eru þessar *stórsæju* kennistærðir sem varmafræðin fjallar um. Með þessu móti er unnið með mun minna af upplýsingum heldur en væri að finna í nákvæmri lýsingu á kerfinu öllu því fjölmörg mismunandi ástönd örsmáu agnanna gefa af sér sömu stórsæju kennistærðirnar. Heildarorka kerfis fæst til dæmis með því að leggja saman orku allra agna í því en þessi orka getur skipst á milli agnanna á mismunandi hátt. Í saf-

neðlisfræði er gert ráð fyrir að jafnar líkur séu á því að finna kerfið í hvaða *örsmæðarástandi* (e. microstate) sem er, sem gefur tiltekna heildarorku, heildarrafhleðslu, og aðrar varðveittar kennistærðir eftir því sem við á. Lögmál varmafræðinnar eru síðan leidd út frá þessari forsendu með tölfræði. Varmafræðileg óreiða kerfis reynist vera mælikvarði á hve mörg mismunandi örsmæðarástönd gefa af sér sömu stórsæju kennistærðirnar.

Vandinn sem blasir við þegar beita á aðferðum safneðlisfræðinnar til að útskýra varmafræði svarthola er að samkvæmt skallasetningunni eru öll svarthol með tiltekinn massa, hverfipunga og rafhleðslu eins. Á hinn bóginn segir jafnan fyrir S_{Svarthol} að svarthol geti verið með jöfnum líkum í aragrúa af örsmæðarástöndum. Lauslega áætlað er varmafræðileg óreiða sólarinnar um það bil $10^{57}k$, þar sem k er Boltzmann fastinn. Óreiða kyrrstæðs svarthols, án rafhleðslu, með sama massa og sólin er hinsvegar mun meiri eða um $10^{80}k$. Þetta gefur til kynna að talsvert fleiri örsmæðarástönd komi til greina fyrir svartholið heldur en agnirnar í sólinni en hvernig kemur það heim og saman við skallasetninguna? Þessi gáta verður að teljast óleyst enn þann dag í dag fyrir almenn svarthol en árið 1996 reiknuðu Strominger og Vafa út fjölda örsmæðarástænda svarthola af ákveðinni gerð í strengjafræði og reyndist óreiða þeirra einmitt vera gefin með jöfnunni hér að ofan [12]. Strengjafræði er kenning sem ætlað er að fella skammtafræði öreinda og almennu afstæðiskenninguna undir einn hatt. Hún er fjarri því að vera fullmótuð og á langt í land með að ná þessu markmiði til fulls en er þó tvímælalaust sú kenning sem mestur árangur hefur náðst með í þá veru.⁹ Það er mikilvægur áfangi í sjálfu sér að tekist hafi að finna varmafræðilegri óreiðu svarthola stoð í safneðlisfræði, jafnvel þótt af tæknilegum ástæðum taki útreikningarnir ekki nema til svarthola af ákveðinni gerð, en þessi niðurstaða er ekki síður mikilvæg fyrir strengjafræðina sjálfa því hún sýnir að kenningin getur gefið svör við spurningum, sem varða samspil skammtafræði og þyngdarfræði, þar sem aðrar kenningar hafa lítið fram að færa.

3. Uppgufun svarthola

Hawking sýndi fram á að þegar skammtaáhrif eru tekin með í reikninginn þá sendir svarthol frá sér varmageislun sem einkennist af hitastiginu T_H . Þetta gekk þvert

⁹ Fyrir þá sem vilja kynna sér strengjafræði má benda á [13, 14].

á viðteknar hugmyndir um eðli svarthola og var því umdeilt fyrst um sinn en eftir að fjöldi annara eðlisfræðinga hafði komist að sömu niðurstöðu með nokkrum mismunandi aðferðum létu þó flestir sannfærast. Í dag er almennt viðurkennt að Hawking hafi haft rétt fyrir sér og að svarthol sendi frá sér þessa varmageislun, sem kölluð er *Hawking geislun*. Hún gegnir einnig lykilhlutverki í varmafræði svarthola eins og áður kom fram.

3.1. Hawking geislun

Við útreikninga sína notaði Hawking reikniaðferðir sem þá höfðu nýlega verið þróaðar til að fást við skammtasviðsfræði í sveigðu tímarúmi en eru of tæknilegar fyrir þessa grein. Þær leiða ótvírætt til þeirrar niðurstöðu að fjarlægur athugandi greini varmageislun sem berst frá svartholinu en uppspretta þessarar geislunar er hinsvegar ekki nákvæmlega ákvörðuð.¹⁰ Geislunina má rekja til óvissulögmáls skammtafræðinnar sem kemur í veg fyrir kyrrstöðu í tóminu. Á hverjum stað í rúminu eru ákveðnar líkur á að skammlíf pör af ögnum og andögnum myndist og eyðist í sífellu. Þetta á ekki aðeins við í grennd við svarthol heldur hvar sem er í alheiminum og tilvist þessara kraumandi agnapara í tóminu hefur fengist staðfest með mælingum í tilraunastofum. Svarthol hefur hinsvegar áhrif á tómið í nágrenni við sig á þann veg að sum agnapörin eyðast ekki jafnharðan og þaðan á Hawking geislun upptök sín. Það er erfitt að útfæra þessa túlkun í smáatriðum því hinir tæknilegu útreikningar, sem Hawking framkvæmdi, byggja ekki á því sem fram fer nálægt svartholinu sjálfu heldur á samanburði milli grunnástandsins í skammtasviðsfræðinni, sem lýsir geislunarsviðinu löngu áður en þyngdarhrunið á sér stað, og grunnástands sviðsins löngu síðar.

Í bylgjufræði gildir almennt að ekki er hægt að staðsetja uppsprettu útfrá geisluninni, sem hún sendir frá sér, með meiri nákvæmni en svarar til bylgjulengdar geislunarinnar. Dæmigerð bylgjulengd Hawking geislunar, sem fjarlægur athugandi mælir, er sambærileg við stærð svartholsins, sem sendir hana frá sér, og

¹⁰ Þó má álykta að uppspretta Hawking geislunar sé utan við sjóndeild svartholsins vegna þess að í þessum útreikningum er gert ráð fyrir skammtaáhrifum á geislunarsviðið en ekki á þyngdarsviðið sjálft þannig að sjóndeild svartholsins er áfram skýrt afmörkuð og engin geislun getur borist frá svæðinu innan hennar.

við getum því einungis staðhæft að geislunin komi frá svartholinu, eða næsta nágreppi þess, en ekki staðsett uppsprettuna með meiri nákvæmni en það. Þetta er reyndar ekki alveg svona einfalt því við erum að fjalla um bylgjur, sem ferðast í sterku þyngdarsviði, þannig að taka þarf tillit til þyngdarrauðviksins, sem minnst var á þegar yfirborðshröðun svarthols var kynnt til sögunnar hér að framan. Hugsum okkur athuganda sem er haldið kyrrstæðum í ákveðinni hæð yfir sjóndeild svarthols. Krafturinn, sem vegur á móti þyngdaráhrifum svartholsins, gæti verið frá tóg sem athugandinn hangir í eða frá eldflaugarhreyfli sem heldur honum í fastri hæð. Þessi kraftur þarf að vera því stærri sem athugandinn er nær svartholinu uns kemur að sjóndeildinni þar sem enginn kraftur fær haldið honum kyrrum. Gerum nú ráð fyrir að athugandinn sendi stöðugt frá sér ljósmerki, sem er blátt á litinn séð frá honum sjálfum, og að félagi hans í öruggri fjarlægð frá svartholinu nemi frá honum merkið. Þyngdarrauðvikið veldur því að bylgjulengd ljóss mælist lengri eftir því sem lengra dregur frá svartholinu þannig að blái liturinn á ljósmerkinu hefur hliðrast yfir í rauðan þegar félaginn nemur það með mælitækjum sínum. Þetta á einnig við um Hawking geislun svo að búast má við því að bylgjulengd hennar sé mun styttri í námunda við svart-holið heldur en hún mælist langt frá því. Eru þá ekki greinigæði Hawking geislunarinnar mun betri en áður sagði og þar með hægt að ákvarða upptök hennar með meiri nákvæmni? Svarið við þessari spurningu er háð því hvernig athugandi nærri svartholinu ber sig að við mælinguna. Ef hann er fastur í tóg, eins og sá sem var að senda ljósmerkið hér áðan, mun hann vissulega nema geislun sem hefur styttri bylgjulengd en mælist fjarri svartholinu. Styrkur geislunarinnar er líka mun meiri nálægt sjóndeildinni heldur en þegar fjær dregur þannig að það þarf ekki aðeins sterkan kraft til að halda kyrrstæðum athuganda rétt fyrir utan sjóndeildina heldur þarf slíkur athugandi líka að þola mikið magn orkumikillar geislunar. Ef við hugsum okkur í staðinn athuganda, sem er á leið inn í svartholið í frjálsum falli, þá upplifir hann allt annan veruleika. Mælitæki hans greina alls enga orkumikla geislun!

Þetta er afleiðing af *jafngildislögmálinu* (e. equivalence principle), sem er einn af hornsteinum afstæðiskennningarinnar, og segir að *staðbundinn* athugandi (e. local observer) í frjálsum falli geti á engan hátt orðið var við þyngdarsvið. Athugið að hér er átt við ímyndaðan, punktlaga athuganda. Raunverulegur at-

hugandi nær að sjálfsögðu yfir endanlega stórt svæði og finnur fyrir flóðkröftum í sveigðu tímarúmi. Það er hinsvegar mjög mikilvægur eiginleiki svarthola að sveigja tímarúmsins við *sjóndeildina* er því minni sem massi svartholsins er meiri. Það kann að koma spáskt fyrir sjónir að þyngdaráhrif við sjóndeild svarthols minnki eftir því sem svartholið er stærra en þetta er má rekja til þess að fjarlægðin frá sjóndeildinni að sérgildinu vex með auknum massa.¹¹ Af þessum sökum eru flóðkraftarnir sem verka á athuganda á leið inn í svarthol í frjálsum falli því minni sem svartholið er stærra og ef svartholið er risastórt er í raun ekkert í nánasta umhverfi hans sem varar hann við þeim örlögum er honum eru búin. Athugandi, sem er kyrrstæður fyrir utan sjóndeildina, og því ekki í frjálsum falli, verður hinsvegar óþyrmilega var við svartholið. Á honum dynur varmageislun eins og frá heitum hlut við því hærra hitastig sem athugandinn er nær sjóndeildinni. Þessi afgerandi munur á umhverfi athuganda eftir því hvernig þeir hreyfast kemur eingöngu fram þegar skammtaáhrif eru skoðuð í samhengi við þyngdarfræðina og kemur við sögu í úrlausn upplýsingagátunnar svonefndu, sem nánar segir frá síðar í greininni.

3.2. Líftími svarthols

Ef eingöngu er stuðst við jöfnur Einsteins án skammtafræði er svarthol svæði í tímarúminu, sem efni og geislun komast inn í en ekkert kemur þaðan út. Þegar tekið er tillit til skammtaáhrifa kemur hinsvegar í ljós að séð úr fjarlægð er svarthol ekki alveg svart heldur glóir það eins og hlutur sem er við Hawking hitastigið. Reyndar er glóir ef til vill ekki rétta orðið til að nota um svarthol sem myndast við þyngdarhrun stjörnu því Hawking hitastig slíkra svarthola er ákaflega lágt,

$$T_H = 6 \times 10^{-8} \left(\frac{M_\odot}{M} \right) \text{ K}.$$

Hér táknar M_\odot massa sólarinnar og jafnan segir okkur að Hawking hitastig svarthols með sama massa og sólin sé aðeins sextíu nanókelvin yfir alkuli þannig að vonlaust má telja að nokkurn tíma verði hægt að greina Hawking geislun frá slíkum svartholum þó að þau sé að finna hér og þar í vetrarbrautinni okkar.

¹¹ Í þeim skilningi að sá tími, sem athugandi á eftir ólifað þegar inn fyrir sjóndeildina kemur, er því lengri sem svart-holið er stærra.

Útgeislunin ber orku frá svartholinu þannig að massi þess hlýtur að minnka með tímanum í samræmi við jöfnu Einsteins $E = mc^2$, að því tilskildu að ekkert efni falli inn í svartholið meðan á útgeisluninni stendur. Hawking hitastigið hækkar eftir því sem svartholið minnkar. Þá verður útgeislunin sterkari og orkutapið frá svartholinu örara. Á endanum, þegar lítið er orðið eftir af upphaflegum massa svartholsins, verður hitastig þess mjög hátt og útgeislunin öflug þannig að ferlinu lýkur með sprengingu. Orkan sem geislað er út á síðustu sekúndunni í ævi svarthols jafngildir um 0.5% af útgeislun sólarinnar á hverri sekúndu. Ef slík sprenging ætti sér stað innan vetrarbrautarinnar okkar mætti vel greina hana í mælitækjum hér á jörðinni en því miður er harla ólíklegt að það gerist því þau ferli sem líkleg eru til að mynda svarthol eiga það öll sameiginlegt að gefa af sér mjög stór svarthol sem geisla lítið út og eiga langa ævi fyrir höndum. Lauslega áætlaður líftími svarthols er

$$\tau \sim 10^{71} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3 \text{ s},$$

sem er ákaflega langur tími ef upphaflegur massi svart-holsins er ámóta og massi sólarinnar. Til samanburðar er aldur alheimsins talinn vera um 5×10^{17} sekúndur.

4. Upplýsingagáta Hawkings

Í kjölfar uppgötvunar sinnar að svarthol sendi frá sér varmageislun benti Hawking á að ferlið í heild, frá því að svarthol myndast við þyngdarhrun venjulegs efnis þangað til massi þess er uppurinn, virðist leiða til mótsagnar við reglur skammtafræðinnar um framvindu skammtakerfa [15]. Þetta er mjög athyglisverð staðhæfing því hún bendir til þess að endurskoða þurfi löngu viðteknar hugmyndir um heim hins örsmáa þegar tekið er tillit til þyngdaráhrifa.

4.1. Tímaþróun í skammtafræði

Til að átta okkur á mótsögninni sem Hawking benti á þurfum við að ræða stuttlega um skammtafræði. Ástandi skammtakerfis er lýst með svonefndu bylgjufalli sem nota má til að reikna út líkur á því að mæling á einhverjum eiginleika kerfisins gefi ákveðna niðurstöðu á tilteknum tíma. Þessi eiginleiki gæti til dæmis verið staðsetning eða hraði agnar en bylgjufallið inniheldur líka upplýsingar um aðrar mælanlegar stærðir eins og orku og spuna agnanna í kerfinu. Eitt af

því sem gerir skammtafræði frábrugðna sígildri eðlisfræði er óvissulögmál Heisenbergs en samkvæmt því er aldrei hægt að ákvarða bæði staðsetningu og hraða agna með fullri nákvæmni samtímis. Þessi staðreynd er alveg óháð því hversu vönduð og nákvæm mælitækin eru. Sumar stærðir, eins og til dæmis hraði og staðsetning eða þættir hverfiþunga samsíða mismunandi hnitaásam, eru einfaldlega ekki samtímis mælanlegar. Þessi óvissa um niðurstöður mælinga er fyrir hendi þó bylgjufall kerfisins sé nákvæmlega þekkt. Það er hinsvegar engin óvissa um framvindu skammtakerfis. Ef bylgjufall þess er þekkt á einhverjum tíma þá má nota Schrödinger jöfnuna til að finna bylgjufallið á hvaða öðrum tíma sem er. Skoðum þessa þróun skammtakerfis með tíma aðeins nánar. Ef upphafsástandi kerfisins er lýst með tilteknu bylgjufalli, sem við táknum með Ψ_{inn} , þá er bylgjufallið $\Psi_{\text{út}}$, sem lýsir lokaástandi þess, ótvírátt ákvarðað og hægt að reikna það út með því að leysa Schrödinger jöfnu kerfisins. Flest raunveruleg kerfi eru reyndar of flókin til að slíkir útreikningar séu viðráðanlegir en það skiptir ekki máli hér. Aðalatriðið er að það má hugsa sér reikniverk, sem er nógu öflugt til að leysa hvaða Schrödinger jöfnu sem er, og þá segir ein af frumforsendum skammtafræðinnar að lokaástand kerfis sé *línuleg* vörpun af upphafsástandinu,

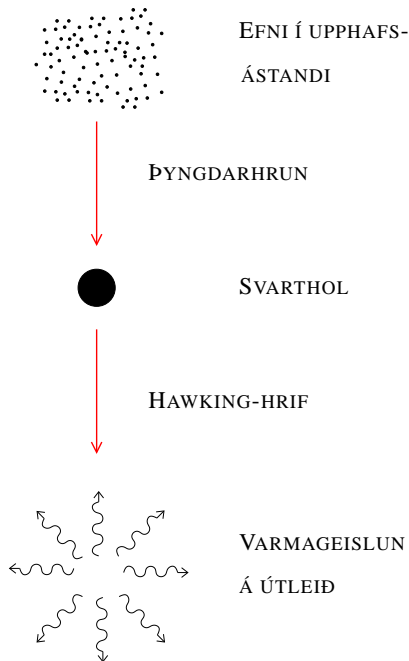
$$\Psi_{\text{út}} = S \Psi_{\text{inn}}.$$

Línulega vörpunin S tengist Schrödinger jöfnu kerfisins og hefur meðal annars þann mikilvæga eiginleika að hún er ávallt andhverfanleg. Það þýðir að ef lokaástand kerfis er þekkt þá kemur aðeins eitt upphafsástand til greina og það er gefið með því að láta andhverfu vörpunina verka á lokaástandið,

$$\Psi_{\text{inn}} = S^{-1} \Psi_{\text{út}}.$$

Þessi jafna segir okkur jafnframt að allar upplýsingar um upphafsástand skammtakerfis hljóta að vera fyrir hendi í lokaástandinu því annars væri ekki hægt að skrifa Ψ_{inn} sem línulega vörpun af $\Psi_{\text{út}}$. Þess vegna er sagt að tímaþróun í skammtafræði varðveiti upplýsingar um skammtaástand kerfis. Óvissulögmálið setur því takmörk hve mikið að þessum upplýsingum er hægt að lesa úr niðurstöðum mælinga á hverjum tíma en sú óvissa eykst hvorki né minnkar með tíma.

Eins og áður sagði eru flest áhugaverð skammtakerfi það flókin að óvinnandi er að reikna út línulegu vörpunina, sem færir kerfið úr einu ástandi í annað, en



Mynd 2. Svarthol myndast og gufar svo upp á löngum tíma.

tilvist slíkar vörpunar er engu að síður ein af grunnforsendum skammtafræðinnar og einmitt sú forsenda sem Hawking staðhæfði að fengi ekki staðist þegar þyngdaráhrifa gætir.

4.2. Tímaþróun kerfis sem inniheldur svarthol

Hugsum okkur nú skammtakerfi sem upphaflega inniheldur ský af ögnum einhvers staðar úti í geimnum og gerum ráð fyrir að þessar agnir verði ekki fyrir neinum ytri áhrifum en dragist hver að annari vegna þyngdaráhrifa. Gerum ennfremur ráð fyrir að þessu upphafsástandi sé lýst með bylgjufalli, sem getum kallað Ψ_{inn} , en höfum ekki áhyggjur af því hvernig þetta bylgjufall lítur út í smáatriðum. Tímaþróun kerfisins er lýst í grófum dráttum á mynd 2. Agnirnar í skýinu nálgast hver aðra og falla að lokum saman undan eigin þyngd þannig að svarthol myndast. Í raunverulegu kerfi er þetta flókið ferli þar sem hugsanlega myndast sólstjarna, sem þróast eftir lögmálum stjarneldisfræðinnar í langan tíma áður en þyngdarhrunið á sér stað, en það skiptir ekki máli hér.

Samkvæmt skallasetningunni verður svartholið innan skamms án allra ytri einkenna að undanskildum massa, hverfiþunga og rafhleðslu. Þessar stærðir

virðast vera eina vitneskjan, sem eftir er utan við svartholið, um efnið sem það myndaðist úr og þá jafnframt um upphaflegt skammtaástand þessa efnis. Þetta kann að þykja skrýtið en er samt ekki í neinni mótsögn við reglur skammtafræðinnar því svartholið sjálft er hluti af skammtakerfinu í heild og við getum gert ráð fyrir því að allar upplýsingarnar sem okkur vantar um upphafsástandið sé að finna inni í því. Það er að vísu ekki hægt að nálgast þær öðruvísi en að fara inn í svartholið og hver sem hættir sér þangað á ekki afturkvæmt. Þessar upplýsingar eru því glataðar athugendum utan við svartholið en eru engu að síður ennþá í skammtakerfinu sem svartholið er hluti af.

Vandinn sem Hawking benti á kemur í ljós þegar við skoðum seinni hluta ferlisins á mynd 2 þegar svartholið gufar smám saman upp. Ef við gerum ráð fyrir því að svartholið hverfi alveg í lokin þá inniheldur lokaástand kerfisins ekkert annað en Hawking geislun á útleið frá þeim stað þar sem svartholið var. Á hverjum tíma meðan á uppgufuninni stendur er Hawking geislunin á formi varmageislunar frá hlut við hitastig, sem fer smám saman hækkandi með minnkandi massa svartholsins, en skammtaástand varmageislunar er ekki ótvírætt ákvarðað. Varmageislun er aðeins hægt að lýsa með svonefndu *blönduðu* skammtaástandi þar sem mörg mismunandi bylgjuföll koma til greina, hvert með ákveðnum líkum. Kerfi sem lýst er með tilteknu bylgjufalli er hinsvegar sagt vera í *hreinu* skammtaástandi. Mótsögnin sem Hawking vakti máls á liggur í því að upphaflega kerfið, sem við gerðum ráð fyrir að væri í hreinu upphafsástandi, virðist þróast yfir í blandað lokaástand ef svarthol myndast og gufar upp í ferlinu. Þetta brýtur í bága við þá forsendu skammtafræðinnar að gefið upphafsástand leiði ávallt til lokaástands, sem er ótvírætt ákvarðað. Eða með öðrum orðum, hreint upphafsástand gefur ekki af sér blandað lokaástand í skammtafræði.

Vandann má rekja til þess að varmageislun felur ekki í sér upplýsingar um annað en hitastig uppsprettunnar og það er engan veginn nóg til að ráða í skammtaástand hennar. Upplýsingarnar um upphafsástand kerfisins, sem hurfu inn í svartholið, virðast því ekki skila sér út aftur með Hawking geisluninni og ef svartholið hverfur í lok ferlisins þá er þessar upplýsingar hvergi að finna lengur í kerfinu.

4.3. Tillögur að lausn gátunnar

Mikilvægi upplýsingagátu Hawkings liggur í því að hún varðar grundvöll fræðanna og sýnir okkur að þyngdarfræði og skammtafræði fá ekki báðar staðist í núverandi mynd. Fjöldi eðlisfræðinga hefur lagt hönd á plóg við að leita lausnar á gátunni og margar athyglisverðar hugmyndir hafa komið fram í þeirri viðleitni. Of langt mál yrði að gera þeim öllum skil hér og verður látið nægja að greina frá þremur helstu.

Í fyrsta lagi er tillaga Hawkings sjálfs sem hann setti fram um leið og hann fjallaði fyrst um þessa mótsögn. Hann freistaði þess að alhæfa grundvallarreglur skammtafræðinnar þannig að hreint skammtaástand geti þróast með tíma yfir í blandað ástand. Til að ná þessu markmiði notaðist Hawking við svonefndan *þéttleikavirkja* (e. density matrix) í stað bylgjufalls til að lýsa ástandi skammtakerfis og setti fram reglur um framvindu þéttleikavirkja sem fela í sér að hreint skammtaástand þróast yfir í blandað ástand þegar svarthol myndast og gufar upp. Þessar nýju reglur ná yfir ferli þar sem upplýsingar um upphaflegt skammtaástand kerfis tapast með tímanum og Hawking færði rök fyrir því að slíkt væri óhjákvæmilegt við sameiningu skammta- og þyngdarfræði.¹²

Því miður er þetta ekki það eina sem hinar nýju reglur Hawkings hafa í för með sér. Taka þarf tillit til þess að hugsanlega myndast örsmá skammlíf svarthol sem millibilsástand í ferlum, sem annars hafa lítið með þyngdarfræði að gera, eins og til dæmis árekstrum ör-einda í agnahraðli. Líkurnar á þessu eru hverfandi litlar í hverju tilfelli um sig en engu að síður eru samhlöð áhrif slíkra örsvarthola mikil. Þau leiða til þess að upplýsingar um upphaflegt skammtaástand tapast ekki aðeins þegar svarthol myndast heldur líka að einhverju leyti í tímaþróun allra skammtakerfa. Alhæfð skammtafræði, í þeirri mynd sem Hawking setti hana fram, reynist vera jafngild venjulegri skammtafræði þar sem uppsprettur er lúta slembilögmálum eru alls staðar í rúminu [16]. Þessar uppsprettur senda frá sér og taka til sín geislun af handahófi og hita þannig upp umhverfi sitt. Kenningin lýsir framandi heimi þar sem alls staðar er funhiti, svonefnt *Planck hitastig* sem er $1,4 \times 10^{32}$ K, og á lítið sameiginlegt með því um-

hverfi sem við eigum að venjast. Tilraun Hawkings til að alhæfa grundvallarreglur skammtafræðinnar til samræmis við tímaþróun kerfis, sem inniheldur svarthol, náði því ekki tilætluðum árangri en það útilokar ekki að síðar meir komi fram betur heppnuð kenning þar sem upplýsingar geta glatast án voveiflegra afleiðinga.

Önnur tillaga til lausnar upplýsingagátunni gerir ráð fyrir að svarthol gufi ekki alveg upp heldur verði eftir leif, sem ber í sér tæmandi upplýsingar um upphaflegt skammtaástand kerfisins [17]. Það er erfitt að útiloka það að einhvers konar leif verði eftir í lokin. Rifjum upp að Hawking hitastig svarthols vex eftir því sem massi þess minnkar og að lokum nær það áður nefndu Planck hitastigi. Þegar þar er komið sögu er massi svartholsins orðinn um það bil 2×10^{-8} kg, sem er svonefndur *Planck massi* táknður með m_{pl} , og ekki lengur hægt að treysta þeim nálgunum sem Hawking studdist við í útreikningum sínum. Þetta þýðir að við getum ekki staðhæft neitt með vissu um það hvort leif verði eftir þegar uppgufun svarthols lýkur en við vitum jafnframt að massi þessarar leifar, sé hún á annað borð fyrir hendi, getur ekki verið mikið meiri en Planck massinn.

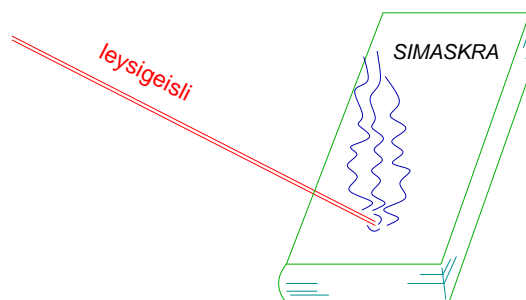
Við fyrstu sýn kann það að virðast vænlegur kostur að geyma í slíkri leif allar upplýsingar um upphafsástand efnisins sem myndaði svartholið og komast þannig hjá því að upplýsingarnar glatast í trássi við reglur skammtafræðinnar. Þetta reynist hinsvegar vera tálsýn því svartholaleifar leiða til vandræða ekkert síður en tapaðar upplýsingar. Vandinn liggur í því að mismunandi leifar þarf fyrir öll hugsanleg upphafsástönd, sem leiða til þess að svarthol myndist, og þar sem svarthol geta fræðilega haft hversu mikinn massa sem er þá eru því engin takmörk sett hve margar mismunandi leifar geta myndast. Þegar haft er í huga að þessar leifar hafa allar massa á stærð við Planck massann og að engum tveimur leifum er lýst með sama skammtaástandinu sést að *þéttleiki* ástanda í kenningunni með orku í nánd við Planck orkuna, $E_{pl} = m_{pl} c^2$, hlýtur að vera óendanlegur. Þetta þýðir að svartholaleifar yrðu allsráðandi sem skammlíf millibilsástönd í nánast hvaða ferli sem er í skammtafræði og hefðbundnar reikniáðferðir myndu raunar alveg bregðast. Skoðum til dæmis árekstur milli rafeindar og jáeindar í agnahraðli. Mjög litlar líkur væru á að mynda tiltekna svartholaleif tímabundið í slíkum árekstri því Planck orkan er mjög há miðað við þá orku sem er í boði en

¹² Þéttleikavirkjar geta einnig komið í stað bylgjufalla í venjulegri skammtafræði en þá eru reglur um framvindu á þann veg að engar upplýsingar um ástand skammtakerfis tapast með tíma.

heildaráhrif allra svartholaleifa fást með því að leggja saman áhrifin frá hverri um sig og ef kenningin telur óendanlega margar leifar þá yrðu þessi áhrif óendanlega mikil. Óendanlegur þéttleiki ástanda leiðir líka til fráleitra niðurstaðna í safneðlisfræði og fær engan veginn staðist í kenningu sem ætlað er að lýsa raunverulegum kerfum.

Reyndar hafa komið fram kenningar um svartholaleifar sem komast hjá þessum augljósu vandræðum á snjallan hátt með því að notfæra sér óevklíðska rúmfræði [18]. Í þessum kenningum felur leifin, sem svarthol skilur eftir sig, í sér *innra rými* þar sem upplýsingarnar um upphaflega skammtaástandið er að finna. Þetta innra rými getur verið stórt þó að leifin sé örsmá að sjá í okkar þrívíða rúmi. Þetta eru áhugaverðar hugmyndir en ólíklegt verður að teljast að lausnarinnar á upplýsingagátunni sé að leita á þessum miðum, að minnsta kosti ekki ef strengjafræði reynist vera hin rétta sameiningarkenning. Eins og áður kom fram er hægt að telja þau örsmæðarástönd, sem svara til svarthola af ákveðinni gerð í strengjafræði, og niðurstaðan kemur heim og saman við varmafræðilega óreiðu þeirra. Þessi talning tekur einnig til örsmæðarástanda, sem bera massa á við Planck massann, og þéttleiki slíkra ástanda reynist vera endanlegur. Í strengjafræði mótar því ekkert fyrir hinum óendanlega þéttleika ástanda, sem fylgir svartholaleifum.

Þriðja tillagan gerir ráð fyrir því að Hawking geislunin, sem svarthol senda frá sér, sé ekki hrein varma-geislun heldur beri í sér allar upplýsingar um upphaflegt skammtaástand efnisins sem myndaði svartholið [19, 20]. Tillagan gengur út frá því að engar upplýsingar tapist við tímaþróun skammtakerfis, jafnvel þótt tekið sé tillit til þyngdaráhrifa, og verður því að teljast íhaldssöm hvað skammtafræðina varðar. Þess í stað krefst hún þess að við endurskoðum grundvallarhugmyndir almennu afstæðiskenningarinnar um eðli rúms og tíma. Ástæðan er í stuttu máli sú að ef við gerum ráð fyrir að Hawking geislunin, sem er á útleið að lokinni uppgufun svartholsins, beri allar upplýsingar um upphaflegt skammtaástand kerfisins þá verðum við jafnframt að gera ráð fyrir því að þessar upplýsingar séu fjarlægðar úr efninu sem fellur saman þegar svartholið myndast. Að öðrum kosti eru upplýsingarnar á tveimur stöðum í kerfinu en það gengur ekki í



Mynd 3. Upplýsingar færðar úr einu formi í annað.

skammtafræði.¹³ Þegar grannt er skoðað kemur í ljós að það verður að fjarlægja allar upplýsingarnar úr efninu áður en það fer innfyrir sjóndeild svartholsins [21] en það virðist brjóta í bága við jafngildislögmál afstæðiskenningarinnar. Rifjum upp að samkvæmt jafngildislögmálinu verður staðbundinn athugandi í frjálssu falli ekki var við þyngdarsvið. Það verka því engin staðbundin þyngdaráhrif á efni sem er í frjálssu falli á leið inn í svarthol hvað þá að allar upplýsingar um uppruna þess séu þurrkaðar út. Reyndar verka flóðkraftar á efnid en eins og áður kom fram eru slík áhrif hverfandi ef svartholið er mjög stórt og þar sem við erum að velta fyrir okkur fræðilegum spurningum getum við haft það eins stórt og við viljum.

Þó að Hawking geislunin beri allar upplýsingar um skammtaástand kerfisins þá er samt engan veginn auðvelt fyrir fjarlæga athugendur að ganga úr skugga um það. Upplýsingarnar eru fölgjar í fylgni milli geislunarskammta, sem berast frá svartholinu, á mismunandi tímum meðan það er að gufa upp. Til að greina þessa fylgni þarf að framkvæma nákvæmar mælingar á mörgum eins kerfum, þar sem efni byrjar alltaf í sama hreina skammtaástandinu, fellur síðan saman í svarthol, og gufar loks upp vegna Hawking geislunar. Endurteknar tilraunir af þessu tagi eru að sjálfsögðu ekki raunhæfar en það má hugsa sér vel tæknivæddar, og óhemju þolinmóðar, vísindaverur sem framkvæma þær og staðfesta þannig að engar upplýsingar glattist í þessu ferli. Skoðum til samanburðar kerfið á mynd 3 þar sem upplýsingar virðast við fyrstu sýn einnig glattast. Í þessu tilfalli leikur þó enginn vafi á því að allar upplýsingar, sem skráðar eru í bókina í upphafi, er að finna í geisluninni og reyknun sem berst frá brun-

¹³ Það er ekki hægt að afrita eða klóna skammtaástönd vegna þess að Schrödinger jafnan er línuleg og varpar því aldrei bylgjufalli yfir í annað veldi af sjálfu sér.

anum. Það er vissulega ekki auðvelt að lesa þær þar og slíkt krefðist endurtekinna tilrauna af sama tagi og fyrir uppgufun svarthols. Munurinn er hinsvegar sá að við brunann fer fram vel þekkt skammtafræðilegt ferli frumeinda og sameinda, sem fjarlægir upplýsingar úr bókinni og skráir þær í loga og reyk, meðan efni á leið inn í stórt svarthol virðist ekki verða fyrir neinum skakkaföllum fyrr en löngu eftir að það er komið inn fyrir sjóndeildina.

5. Andstæðulögmálið

Þriðja tillagan hér að ofan þarf að komast fyrir tvenns konar vanda. Annars vegar þarf að útskýra hvernig upplýsingarnar um upphaflegt skammtaástand kerfisins eru skráðar í Hawking geislunina þegar ekkert í útreikningum Hawkings bendir til þess að svo sé. Á hinn bóginn þarf að koma því heim og saman hvernig upplýsingarnar geti verið á útleið með Hawking geisluninni fyrst ekkert virðist geta komið í veg fyrir að þær berist inn í svartholið með efninu sem hrynur saman. Svonefnt *andstæðulögmál um svarthol* (e. principle of black hole complementarity)¹⁴ var sett fram til að greiða úr síðara atriðinu [21]. Það staðhæfir einfaldlega að fjarlægur athugandi, sem ályktar að allar upplýsingar um upphaflegt skammtaástand kerfisins séu skráðar í Hawking geislunina og hljóti þar af leiðandi að þurrkast út úr efninu við myndun svartholsins, og athugandi á innleið í frjálsum falli, sem upplifir ekkert slíkt á leið sinni inn fyrir sjóndeildina, hafi báðir rétt fyrir sér. Þó að það virðist í fyrstu fjarstæðukennt þá brýtur andstæðulögmálið ekki í bága við nein hreyfingarlögmál efnis við venjulegar aðstæður en það krefst þess að efnið hegði sér á framandi hátt þegar hreyfiorka þess er himinhá, mun hærrí en við höfum nokkra reynslu af í tilraunum [22].

5.1. Þanin sjóndeild svarthols

Stjarneldisfræðingar sem fást við svarthol með massa á við sólina eða stærri í fræðum sínum styðjast stundum við hugtakið *þanin sjóndeild* (e. stretched horizon) þegar þeir reikna út áhrif svarthols á umhverfi sitt [23]. Það sjóndeildin er himna sem maður hugsar sér að sé staðsett utan við sjóndeildina sjálfa. Þessi himna

hefur ýmsa stórsæja eiginleika, til dæmis rafleiðni og seigju, og hún hefur líka ákveðið hitastig sem tengist Hawking hitastigi svartholsins. Það er merkileg staðreynd að slík himna getur að öllu leyti komið í stað svartholsins sjálfs frá sjónarhóli fjarlæggra athugenda og það einfaldar til muna ákveðna útreikninga í stjarneldisfræði.

Það sjóndeildin gegnir lykilhlutverki þegar fjallað er um andstæðulögmálið því hún gerir okkur kleyft að gera okkur mynd af uppgufun svarthols frá sjónarhóli þeirra sem fylgjast með úr öruggri fjarlægð. Í þessu tilviki hugsum við okkur að himnan sé staðsett mun nær sjóndeildinni heldur en tíðkast í stjarneldisfræði. Þar er nóg að hún sé nálægt svartholinu samborið við aðra hnetti í kerfinu, sem verið er að skoða, en hér er fjarlægð himnunnar frá sjóndeildinni um það bil ein Planck lengd, sem er $1,6 \times 10^{-35}$ m. Himnan er við Planck hitastigið og sendir frá sér varmageislun í samræmi við það en aðeins líttill hluti af ögnunum, sem himnan geislar frá sér, nær að sleppa frá svartholinu og það eru þessar agnir sem mynda Hawking geislunina. Vegna þyngdarrauðviksins er Hawking hitastigið, sem mælist fjarri svartholinu, miklu lægra en Planck hitastig himnunnar rétt fyrir utan sjóndeildina, sem sendir geislunina út.

Þyngdarrauðvikið kemur einnig fram í því að séð úr fjarlægð virðist klukka athuganda, sem er rétt fyrir utan sjóndeild svarthols, ganga hægt. Þetta tímaþan vex upp úr öllu valdi eftir því sem nær dregur sjóndeildinni þannig að samkvæmt almennu afstæðiskenningunni sjá fjarlægir athugendur aldrei neitt efni fara inn í svartholið. Þeir sjá það hægja á sér þegar það nálgast sjóndeildina og það nær aldrei að fara inn fyrir hana. Þyngdarrauðvikið veldur því að það teygist jafnframt sífellt meira á allri geislun, sem berst frá þessu efni til fjarlæggra athugenda, uns ekki er lengur hægt að greina hana og af þessum sökum er svarthol alveg svart í almennu afstæðiskenningunni. Skammtafræðin breytir þessari mynd á athyglisverðan hátt. Þegar svart-hol myndast sjá fjarlægir athugendur efnið, sem fellur saman, vissulega hægja á sér þegar það nálgast sjóndeildina en það lendir á þöndu sjóndeildinni áður en það stöðvast alveg. Það sjóndeildin er funheit himna, sem brennir upp allt efni sem á henni lendir, en vegna þyngdarrauðviksins sjá fjarlægir athugendur þennan bruna sýndan hægt. Það sem meira er, þeir sjá aðeins daufan glampa sem svarar til mun lægra hitastigs því varmageislunin þarf að yfirvinna þyngdaráhrif svart-

¹⁴ Nafnið er dregið af andstæðulögmáli skammtafræðinnar sem segir að efnisögnum sé stundum betur lýst sem bylgjum en ögnum. Þessar andstæðu lýsingar eru tvær hliðar á sama fyrirbærinu og í raun er hvorug réttari en hin.

holsins áður en hún berst til athuganda í fjarlægð. Samkvæmt þessu berast upplýsingarnar um upphaflegt skammtaástand efnisins aldrei inn í svartholið. Þær fara aldrei lengra en inn að þöndu sjóndeildinni þar sem þær eru skráðar í Hawking geislunina á samþærilegan hátt og gerðist í bókarbrunum hér að ofan.

5.2. Nýtt afstæðislögmál

Andstæðulögmálið birtist í því að ofangreind mynd af uppgufun svarthols, sem nokkurs konar bruna við heita þanda sjóndeild, á eingöngu við þegar horft er á svartholið úr fjarlægð. Athugandi, sem nálgast svart-holið í frjálsum falli, sér enga himnu og verður ekki fyrir neinni varmageislun. Ef svartholið er nógu stórt kennir hann sér einskis meins þegar hann fer í gegnum sjóndeildina en hann fær ekki umflúið sérgildið og endar ævi sína þar. Þegar horft er á þennan sama athuganda úr fjarlægð er ferlið með allt öðrum hætti. Hann virðist hægja á sér þegar hann nálgast þöndu sjóndeildina. Merki frá honum verða fyrir rauðviki og dofna. Samtímis þessu virðist hann verða fyrir varmageislun frá funheitri himnunni. Geislunin hitar efnid, sem hann er úr, upp í Planck hitastigið þannig að hann leysist í sundur. Fjarlægur athugandi sér þetta allt saman sýnt hægt og frekar ógreinilega því það eina, sem hann hefur úr að móða, er Hawking geislunin frá svartholinu. Hún inniheldur upplýsingar um ástand athugandans, sem féll inn í svartholið, til viðbótar upplýsingum um efnid sem myndaði svartholið í upphafi.

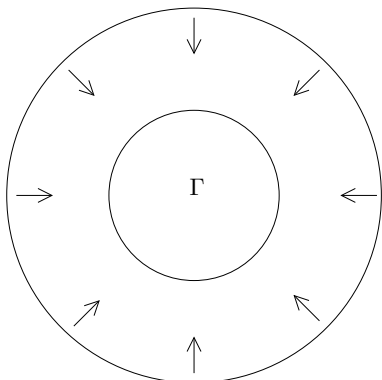
Samkvæmt þessu álykta fjarlægir athugendur að ævi ólánsams ferðalangs, sem fellur inn í svarthol, ljúki við þöndu sjóndeildina. Ferðalangurinn sjálfur kippir sér ekkert upp við að fara í gegnum sjóndeildina og telur vandræði sín ekki byrja fyrr en hann tekur að nálgast sérgildið inni í svartholinu. Slíkur afstöðumunur er afleiðing af andstæðulögmálinu um svarthol, sem við innleiddum til að varðveita reglur skammtafræðinnar um tímaþróun, en hann er óhugsandi í almennu afstæðiskenningu Einsteins. Þannig hafa skammtaáhrif í tengslum við svarthol rekið okkur til að innleiða aukið afstæði í eðlisfræði rúms og tíma. Ef þessar hugmyndir eru lagðar til grundvallar er ljóst að kenning, sem sameinar þyngdarfræði og skammtafræði, hlýtur að fela í sér *óstaðbundin* (e. non-local) áhrif yfir stórsæjar vegalengdir í tíma og rúmi. Þessi óstaðbundnu áhrif koma hinsvegar ekki fram nema við mjög sérstakar aðstæður þegar bera þarf saman athuganir, sem gerðar eru í mjög ólíkum viðmiðunarkerfum. Við höfum

ekki hróflað við þeirri grunnforsendu afstæðiskennningarinnar að *lögmál* eðlisfræðinnar séu hin sömu fyrir alla athugendur. Athugendur þarf hinsvegar ekki að bera saman um framvindu mála að öllu leyti.

Það er kunnuglegt úr afstæðiskenningu að gangur tímans fer eftir hraða athugandans og sveigju tímarúmsins og að tveir athugendur geta verið ósam-mála um röð tiltekinna atburða í tíma ef atburðirnir gerast ekki á sama stað í rúminu. Í afstæðiskenningu gildir hinsvegar að þegar tveir atburðir gerast bæði á sama stað og á sama tíma samkvæmt mælingum einhvers athuganda þá hljóta allir aðrir athugendur að komast að sömu niðurstöðu. Staðbundinn atburður gerist í einhverjum punkti í tímarúmi afstæðiskennningarinnar. Mismunandi athugendur nota hver sitt hnitakerfi til að staðsetja þennan punkt en ef tveir atburðir gerast í sama punktinum í tímarúminu þá eru þeir þar báðir óháð því hvaða hnitakerfi er valið. Andstæðulögmálið segir okkur að í þyngdarskammtafræði séu atburðir ekki lengur staðbundnir í þessum skilningi. Í hnitakerfinu, sem fjarlægir athugendur nota til að lýsa tímarúmi svarthols, gerast eftirfarandi tveir atburðir á sama stað og tíma: (a) ferðalangur lendir á sjóndeildinni, og (b) ferðalangurinn deyr. Í hnitakerfinu, sem ferðalangurinn notar, gerast þessir tveir atburðir hvorki á sama stað né sama tíma.

6. Heilmyndun

Við höfum rætt þrjár mismunandi tillögur að lausn á upplýsingagátunni. Í hverju tilfelli um sig þarf að breyta einhverjum af þeim lögmálum sem liggja til grundvallar skammtafræði og þyngdarfræði. Hawking freistaði þess að breyta reglum skammtafræðinnar á þann veg að hreint skammtaástand geti þróast yfir í blandað ástand en kenning hans leiðir af sér niðurstöður, sem ekki eru í neinu samræmi við það sem við sjáum í umhverfi okkar. Önnur tilraun til að leysa gátuna fólst í því að svarthol skilji eftir sig leif, sem geymir upplýsingar um upphaflegt skammtaástand efnisins. Þessi tillaga lendir sömuleiðis á hálum ís því að óendanlega margar mismunandi leifar geta myndast og það veldur alvarlegum vandræðum þegar kemur að því að bera skammtafræðilegra útreikninga saman við niðurstöður tilrauna. Þriðji kosturinn var að gera ráð fyrir því að allar upplýsingar um ástand efnis, sem fer inn í svarthol, skili sér smátt og smátt aftur til umheimsins með Hawking geisluninni. Þessi tillaga er í góðu samræmi við reglur skammtafræðinnar en samkvæmt



Mynd 4. Kúluskel fellur saman utan um skammtakerfi Γ og myndar svarthol.

andstæðulögmálinu um svarthol hlýtur eðlisfræðin að vera óstaðbundin í tíma og rúmi en það samræmist ekki almennu afstæðiskenningunni.

Það er erfitt að skera úr um það með vissu hver af þessum tillögum gengur næst rétttri lausn gátunnar en ýmislegt bendir til þess að það sé sú þriðja frekar en hinar tvær. Það á ekki síst við ef strengjafræði reynist vera hin rétta sameiningarkenning þyngdar- og skammtafræði. Á undanförunum árum hafa komið fram mjög athyglisverðar hugmyndir um hvernig umrita megji strengjafræði á ákveðinn hátt sem kvarðakenningu [24, 25] og ef þær reynast á rökum reistar verður ekki annað séð en að tímaþróun varðveiti ávallt upplýsingar um skammtaástand kerfis.¹⁵ Þessi umritun er jafnframt óstaðbundin í rúmi og tíma en því er ennþá ósvarað hvort hún sé óstaðbundin á sama hátt og andstæðulögmálið um svarthol segir fyrir um.

Vangaveltur um að eðlisfræði rúms og tíma sé í grundvallaratriðum óstaðbundin hafa mjög sett mark sitt á þetta fræðasvið á síðustu árum. Í framhaldi af þeirri umræðu um svarthol og skammtafræði, sem sagt hefur verið frá í þessari grein, settu 't Hoofst og Susskind hvor í sínu lagi fram tilgátur um að skammtafræðikenning, sem nái yfir þyngdaraflið, hljóti að innihalda mun færri skammtaástönd en áður var talið [26, 27]. Þeir héldu því fram að varmafræðileg óreiða kerfis, en hún er mælikvarði á fjölda mögulegra skammtaástanda, vaxi ekki í hlutfalli við rúm-

¹⁵ Kvarðakenningar koma víða við sögu í eðlisfræði. Þær eru alhæfingar á rafsegulfræði Maxwells og eiga sér skammtafræðilega framsetningu þar sem engar upplýsingar glatast við tímaþróun.

mál kerfisins, eins og við eigum að venjast í safneðlisfræði, heldur aðeins í hlutfalli við yfirborðsflatarmál kerfisins. Þessi staðhæfing virðist fráleit við fyrstu sýn. Hvernig má annað vera en að hámarksóreiðan tvöfaldaðist þegar skoðað er tvöfalt stærra kerfi? Svarið liggur í því að gæta þarf að áhrifum þyngdarafsisins.

Við endum greinina á því að skoða einfalt dæmi sem rennir stoðum undir tilgátu þeirra féлага. Hugsum okkur skammtakerfi þar sem ögn með spunatölu $1/2$ er í sérhverjum hornpunkti teningslaga grindar og fjarlægðin milli næstu nággranna er a . Skoðum nú kúlulaga rými Γ , með rúmmál V og yfirborðsflatarmál A , og spyrjum hversu mörg skammtaástönd komi til greina fyrir agnirnar í þessu rúmi. Hver ögn getur verið í tveimur skammtaástöndum þannig að halda mætti að heildarfjöldi ástanda sé einfaldlega 2 í veldinu fjöldi agna í Γ , það er að segja $2^{V/a^3}$. Hámarksóreiða kerfisins fæst með því að taka náttúrulegan logra af fjölda ástanda,

$$S_{\max} = \frac{k \ln 2}{a^3} V.$$

Eins og við mátti búast er óreiðan í réttu hlutfalli við rúmmál kerfisins enda gildir það almennt um skammtakerfi án þyngdarafsis. Þessi niðurstaða reynist hinsvegar alröng þegar þyngdaráhrifa gætir eins og sést ef við skoðum eftirfarandi ferli kennt við Susskind [27]. Hugsum okkur að kerfið Γ sé umlukið af kúluskel, sem er á innleið, eins og sýnt er á mynd 4. Kúluskelin fellur saman og myndar svarthol og við skulum gera ráð fyrir að samanlögð orka hennar og kerfisins Γ sé þannig að svartholið hafi nákvæmlega sama yfirborðsflatarmál og Γ hafði áður. Berum nú saman hámarksóreiðuna fyrir og eftir þyngdarhrunið.

$$S_{\text{fyrir}} = S_{\Gamma} + S_{\text{skel}},$$

$$S_{\text{eftir}} = S_{\text{svarthol}} = \frac{kc^3}{4G\hbar} A.$$

Samkvæmt öðru lögmáli varmafræðinnar er heildaróreiðan minni í upphafi ferlisins heldur en í lok þess. Það þýðir að hámarksóreiða kerfisins Γ , að viðbætti þeirri óreiðu sem kúluskelin ber, hlýtur að vera minni en óreiða svartholsins í lokin og sú óreiða vex í hlutfalli við flatarmálið A en ekki rúmmálið V .

Þetta segir okkur að einni færri rúmvídd þurfi til að lýsa kerfum í skammtafræði með þyngdaráhrifum heldur en í venjulegri skammtafræði. Svo virðist sem hægt sé að skrá allar upplýsingar um þrívítt kerfi á tvívíðan flöt og með vísun í nútíma ljósfræði er þessi

niðurstaða kölluð *heilmyndunarlögmálið* (e. holographic principle)¹⁶. Þetta lögmál skýtur upp kollinum víða þegar fjallað er um skammtafræði þyngdarinnar en enn er óljóst hvaða sess það mun skipa í kenningum framtíðarinnar.

Þakkir: Rannsóknir höfundar eru styrktar af Rannsóknasjóði Vísinda- og tækniráðs, og Rannsóknasjóði Háskóla Íslands. Kristján Rúnar Kristjánsson aðstoðaði við gerð töflu og mynda.

Heimildir

- [1] Gunnlaugur Björnsson, *Sólir og svarthol í Undur veraldar*, Þorsteinn Vilhjálmsson ritstj., Mál og menning, Reykjavík, 1998.
- [2] S. Hawking og R. Penrose, *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A314** (1970) 529.
- [3] Lárus Thorlacius, *Commentationes Physico-Mathematicae 166/2004*. The Finnish Society of Sciences and Letters, 2004.
- [4] S.W. Hawking, *Saga tímans*, Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík, 1990.
- [5] A. Einstein, *Afstæðiskeningin*, Hið íslenska bókmenntafélag, Reykjavík, 1979.
- [6] K. Schwarzschild, *Sitzber. Deut. Akad. Wiss. Berlin*, Kl. Math.-Phys. Tech. (1916) 189.
- [7] R.H. Price, *Phys. Rev.* **D5** (1972) 2419.
- [8] S.W. Hawking, *Phys. Rev. Lett.* **26** (1971) 1344.
- [9] J.D. Bekenstein, *Phys. Rev.* **D7** (1973) 2333.
- [10] J.D. Bekenstein, *Phys. Rev.* **D9** (1974) 3292.
- [11] S.W. Hawking, *Commun. Math. Phys.* **43** (1975) 199.
- [12] A. Strominger og C. Vafa, *Phys. Lett.* **B379** (1996) 99.
- [13] B. Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton & Co., New York, 1999.
- [14] B. Zwiebach, *A First Course in String Theory*, Camb. Univ. Press., 2004.
- [15] S.W. Hawking, *Phys. Rev.* **D14** (1976) 2460.
- [16] T. Banks, L. Susskind og M. Peskin, *Nucl. Phys.* **B244** (1984) 125.
- [17] Y. Aharonov, A. Casher og S. Nussinov, *Phys. Lett.* **B191** (1987) 51.
- [18] T. Banks, M. O’Loughlin og A. Strominger, *Phys. Rev.* **D47** (1993) 4476.
- [19] D.N. Page, *Phys. Lett.* **B95** (1980) 244.
- [20] G. ’t Hooft, *Phys. Scripta* **T36** (1991) 247.
- [21] L. Susskind, L. Thorlacius og J. Uglum, *Phys. Rev.* **D48** (1993) 3743.
- [22] L. Susskind og L. Thorlacius, *Phys. Rev.* **D49** (1994) 966.
- [23] R.H. Price og K.S. Thorne, *Phys. Rev.* **D33** (1986) 915.
- [24] T. Banks, W. Fischler, S.H. Shenker og L. Susskind, *Phys. Rev.* **D55** (1997) 5112.
- [25] J. Maldacena, *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** (1998) 231.
- [26] G. ’t Hooft, *Dimensional Reduction in Quantum Gravity* í *Salamfestschrift: a collection of talks*, A. Ali, J. Ellis og S. Randjbar-Daemi ritstj., World Scientific, Singapore, 1993.
- [27] L. Susskind, *Jour. Math. Phys.* **36** (1995) 6377.

Um höfundinn: Lárus Thorlacius er prófessor í eðlisfræði við Háskóla Íslands. Hann lauk B.S. prófi frá Háskóla Íslands árið 1984 og PhD gráðu frá Princeton University árið 1989.

Raunvísindastofnun Háskóla Íslands
Dunhaga 3
IS-107 Reykjavík
lth@raunvis.hi.is

Móttakin: 4. október 2004

¹⁶ Fleiri rök fyrir heilmyndunarlögmálinu eru færð í [3].