

Skammtafræði í ljósi vísindasögu og heimspeki

Þorsteinn Vilhjálmsson

Raunvísindastofnun Háskólans, Háskóli Íslands

Vefútgáfa: 27. janúar 2010

Ágrip — Segja má að aðdragandi skammtafræðinnar hafi byrjað í upphafi 19. aldar þegar atómhugtak nýaldar fór að mótast og er fróðleg saga þess rakin nánar í greininni. Kringum aldamótin 1900 hófst svo það sem kalla má fyrra skeiðið í þróun skammtafræðinnar. Þá komust menn að því að atómið er ekki einsleit kúla heldur er það samsett á ákveðinn hátt úr kjarna og rafeindum. Um svipað leyti kom í ljós að tiltekin atriði í svarthlutargeislun og ljósröfun verða ekki skilin nema með því að gera ráð fyrir einhvers konar skömmtun og agnareðli rafsegulgeislunar. Atómlíkan Bohrs frá 1913 tengdi saman marga þræði þessarar þróunar. – Eftir það hófst síðara þróunarskeiðið og rúmum áratug síðar varð skammtafræðin fullorðin í höndum manna eins og Heisenbergs og Schrödingers. Þeir settu þessa mikilvægu grein eðlisfræðinnar fram í þeirri mynd sem við þekkjum hana nú á dögum. Með framlögum þeirra verður til þjálft, fjölhæft og fullgilt tæki eða kenning sem hefur reynst ótrúlega öflugt. – Þróunin síðan er eins konar eftirmáli. Þó að skammtafræðin ráði ekki við verkefni sem varða afstæðiskenningu Einsteins hefur hún orðið afar mikilvæg í ýmiss konar hátækni í samfélögum nútímans. – Þessi saga er rakin í grófum dráttum í greininni og rædd með hliðsjón af vísindasögu og vísindaheimspeki.

1. Inngangur

Þegar ég segi nemendum mínum frá tilkomu skammtafræðinnar,¹ hvort sem er í námskeiði um vísindasögu eða nútíma eðlisfræði, er ég vanur að skipta sögunni í fjögur skeið. Fyrsta skeiðið kalla ég þá aðdraganda skammtafræðinnar, og nær það frá fyrstu rötum hennar til aldamótaársins 1900 þegar einkennisfasti skammtafræðinnar, stuðull Plancks, birtist í fyrsta sinn í útreikningum og túlkunum eðlisfræðinga.² Á þessu skeiði mótast það sem nú á dögum er yfirleitt kallað kreppa, með tilvísun í kenningar

bandaríska vísindasagnfræðingsins Thomasar Kuhns um vísindabyltingar.³

Þróun skammtafræðinnar, sem um leið felur í sér lausn kreppunnar, má síðan skipta í tvö skeið. Hið fyrra nær þá frá 1900 til 1913, þegar danski eðlisfræðingurinn Niels Bohr (1885–1963) setti fram atómímynd þá sem við hann er kennd.⁴ Með henni voru ráðnar ýmsar gátur en þó var öllum ljóst að ekki var um neina endanlega lausn að ræða, því að enn var ósvarað ýmsum tilteknum spurningum sem verða ræddar nánar hér á eftir.

Tilraunum manna til að finna heildstæðari lausnir var því haldið áfram á síðara skeiðinu, frá 1913 til 1926, meðal annars af Bohr sjálfum og að frumkvæði hans. Hin endanlega lausn, sem við búum að

¹ Greinin er að hluta byggð á erindi sem höfundur tók saman í tilefni 100 ára afmælis Nielsar Bohrs í október 1985.

² Kuhn, 1978, fjallar um mikilvæga þætti aðdraganda-skeiðsins, einkum þá sem snúa að svarthlutargeislun. – Heilbron, 1986, er mikilvægasta ævisaga Plancks á ensku á síðari árum, en einnig hafa komið út ævisögur á þýsku. Finna má skrá um nokkrar þeirra í þýskri útgáfu vefritsins Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Max_Planck.

³ Kuhn, 1970, 7. kafli. – Þessi merka bók hefur fengið mikla útbreiðslu og haft mikil áhrif á alla hugsun manna um sögu og heimspeki vísinda, og raunar fleira, allar götur síðan hún kom fyrst út árið 1962. Hún hefur verið þýdd á íslensku og er fyrirhugað að hún komi út í Lærdómsritum Bókmenntafélagsins á næstunni.

⁴ Pais, 1993, er örugglega sú ævisaga Bohrs sem hentar best eðlisfræðingum og öðrum lesendum þessa tímarits.

enn þann dag í dag, fannst svo á árunum 1925–6 er þýski eðlisfræðingurinn Werner Heisenberg og Austurríkismaðurinn Erwin Schrödinger settu fram skammtakenningar sínar. Þær eru yfirleitt taldar leysa úr öllum gátum er varða óafstæðilega skammtafræði sem svo er kölluð og fjallar um hegðun smásærra efnisagna þar sem afstæðiskenningin kemur ekki við sögu.

Fjórða skeiðið í sögu þessa fræðasviðs má því kallast eftirmáli, en þá gerðu menn ýmsar uppgötv-anir sem urðu til að styrkja hina nýju kenningu í sessi uns hún náði sömu stöðu og aðrar grundvallarkenn-ingar njóta í heimi eðlisfræðinnar. En jafnframt þess-ari styrkingu skýrðust takmarkanir skammtafræðinn- ar fyrir mönnum. Þannig reyndist það þrautin þyngri að flétta hana saman við afstæðiskenninguna, þó að mönnum hafi að vísu orðið talsvert ágengt í því.

Við hugum nú eilítið nánar að þessum fjórum skeiðum hverju um sig.

2. Aðdragandi skammtafræðinnar

Að sjálfsgöðu er það nokkurt álitamál, hvenær og með hvaða hætti beri að telja að aðdragandi skammtafræð- innar hafi byrjað. Niðurstaða mín um þetta er sú, að best fari á því að rekja þennan aðdraganda til þess er atómhugmynd 19. aldar fór að þróast í byrjun ald- arinnar. Þessi grundvallarhugmynd fæddi af sér þeg- ar frá leið ýmis atriði sem urðu trauðla skilin innan ramma hefðbundinnar eðlisfræði, en fengu hins vegar eðlilegar skýringar með tilkomu skammtafræðinnar. Að vísu er hægt að hugsa sér tilvist atóma á hugtaka- grunni klassískrar aflfræði, og Newton sjálfur setti fram hugmyndir í þá veru, raunar fremur óljósar.⁵ Á hinn bóginn varð þróun atómhugtaksins á 19. öld þó öll á þann veg að torvela klassíska túlkun þess og skapa í staðinn jarðveg fyrir skýringar skammtafræð- innar eftir að þær komu fram. Þetta skýrist vonandi hér á eftir.

Þegar minnst er á atóm, vilja margir hverfa aftur til forngrísku spekinganna Levkipposar og Demókrítosar um 400 fyrir Krist⁶ og fjalla fjálgum orðum um hugmyndir þeirra um atómið, sem og um áhrif þeirra hugmynda á síðari tímum. Ekki síst þyk- ir ýmsum raunvísindamönnum gott að krydda mál sitt með því að nefna hina forngrísku atómsinna þeg- ar þeir fjalla um vísindasöguleg efni. Ég tel þó fyrir

mína parta að oft sé gert of mikið úr þessum hug- myndum á rómantískum stundum. Sannleikurinn er nefnilega sá að atómhugmynd grískrar fornaldar var aðeins ein af mörgum hugmyndum um alheiminn og náttúruna, sem voru *lagðar í sjóð* á þessu frjóa skeiði í sögu mannegrar hugsunar. Hugmyndin um ódeil- anlega grunneiningu efnisins, atómið, var hins veg- ar ekki betur rökstudd en svo á þeim tíma, að hún varð ekki hluti af áhrifamestu og heildstæðustu hug- myndakerfum sem Forngríkkir skiluðu til eftirkom- enda sinna í verkum manna eins og Aristótelesar, Ptólemafosar eða Platons. Að þessu leyti er staða hennar svipuð og sólmiðjuhugmyndarinnar sem gríski spekingurinn Aristarkos setti fram á öndverðri 3. öld fyrir Krist. Þeirri ágætu hugmynd var einnig hafnað í fornöld af þeim sem gerst vissu í þá daga, með góðum rökum er studdust við aðrar hugmyndir þeirra tíma.

Saga þess atómhugtaks sem við búum enn að hófst með skoska efnafræðingnum *John Dalton* (1766–1844). Þegar hann var að rannsaka samsetn- ingu andrúmsloftsins tók hann eftir því að efni ganga í sambönd í ákveðnum massahlutföllum. Árið 1803 birti hann fyrstu skrána um það sem við mundum kalla afstæðan atómmassa ýmissa frumefna. Sumir starfsbræður Daltons tóku þessari hugmynd fagnandi og margir urðu til að auka og endurbæta skrá hans. Flestir starfandi efnafræðingar fóru þó gætilega í sak- irnar, einkum varðandi túlkun á massahlutföllunum. Afstaða þeirra hefur að ýmsu leyti verið skiljanleg og vísindaleg því að atómhugtak Daltons var lengi vel ekkert annað en hjálparhugtak í efnafræði sem skorti þau tengsl við raunverulegar mælingar sem raunvísindamönnum er tamt að krefjast. Þannig var til dæmis aðeins hægt að segja til um innbyrðis hlutföll atómmassanna, en stærð eða massi einstakra atóma var með öllu óákveðinn.

Árið 1811 setti ítalski eðlis- og efnafræðingurinn *Amedeo Avogadro* (1776–1856) fram þá tilgátu sem við hann er kennd, að tiltekið rúmmál mismunandi frumefna í gasham við sömu eðlisfræðilegu skilyrði hafi ætíð að geyma sama fjölda *sameinda*, en sam- eind sé efnisögn samsett úr tveimur eða fleiri frum- eindum eða atómum. Avogadro komst að þessari til- gátu með því að tengja saman tvenns konar athugan- ir sem þá voru þekktar. Annars vegar notfærði hann sér athuganir á því hvernig gös ganga í efnasambönd hvert við annað, en þær sýna að rúmmál gastegund- anna eru í einföldum heiltöluhlutföllum. Hins vegar

⁵ Þorsteinn Vilhjálmsson, 1987, 259–261.

⁶ Þorsteinn Vilhjálmsson, 1986, undirkafla 3.4.

ELEMENTS					
○	Hydrogen	1	○⊕	Strontian	46
◐	Azote	5	⊕	Barytes	68
◑	Carbon	5	⊕	Iron	50
○	Oxygen	7	⊕	Zinc	56
◐	Phosphorus	9	⊕	Copper	56
⊕	Sulphur	13	⊕	Lead	90
◐	Magnesia	20	⊕	Silver	190
◑	Lime	24	⊕	Gold	190
◐	Soda	28	⊕	Platina	190
◑	Potash	42	⊕	Mercury	167

Mynd 1. Frumefni Daltons frá 1803. Myndin sýnir hugmyndir Daltons frá árinu 1803 um frumefnin og massatölur þeirra ásamt tillögum hans um tákni fyrir þau. Fátt af því sem myndin sýnir hefur haldið fullu gildi nema það að frumefni eru til og að öll efnin sem nefnd eru í töflunni eru enn talin til frumefna. Tíu árum síðar bætti sænski efnafræðingurinn Jöns Jakob Berzelius (1779–1848) verulega við kerfi Daltons og færði táknerfið miklu nær því sem við þekkjum. Þannig fékk gull táknið Au og silfur Ag, í stað tákna G og S hjá Dalton. http://www.wired.com/science/discoveries/news/2008/09/dayintech_0903

byggði Avogadro á athugunum Daltons á hlutföllum atómmassanna þegar efni almennt ganga í efnasambönd. Tilgáta Avogadros stangaðist á við hugmyndir eðlisvísindamanna á þeim tíma um eðli varma og fleira. Hún þótti því út í hött og náði ekki upp á pallborðið fyrir en um 1860.

Mikilvægt er að gera sér ljóst að þessi tilgáta Avogadros er fyrsta hugmyndin sem felur í sér að frumeindir og sameindir séu raunverulegir hlutir með tiltekna mælanlega eiginleika eins og massa og jafnvel rúmmál, en ekki aðeins hjálpartæki í hlutfalla-reikningum efnafræðinnar.

Næst gerist það á árunum 1815-16, að enski lækurinn *William Prout* (1785-1850), sem var mikill áhugamaður um efnafræði, bendir á það í nafnlausum greinum, að atómmassi frumefnanna virðist oft-

ast vera heilt margfeldi af atómmassa vetnis. Á þeim grundvelli setur hann fram tilgátu sem við hann er kennd þess efnis að öll frumefni séu sett saman úr vetni, og það sé því eins konar „frumefni frumefnanna“ með stórum staf. Þessi tilgáta er í ætt við þann einfaldleika sem vísindin leita yfirleitt að og kann að vera tengdur eingyðistrú.⁷ Hún þótti því aðlaðandi og reyndist afar frjó. Þó að þessi tilgáta sé ekki talin „rétt“ nú á dögum, þá felst í henni viss sannleikskjarni sem kristallaðist smám saman og átti jafnframt þátt í gengi hennar á 19. öld.

Fróðlegt er að taka eftir því að Prout sjálfur ætlaði tilgátu sinni og atómkenningunni takmarkað gildi:

Ég hef ævinlega vanist því að líta á [atómkenninguna] í svipuðu ljósi og ég held að flestir grasfræðingar líti nú á kerfi Linnés; þ.e. sem byggingu sem er háð samkomulagi og hentar afar vel til ýmissa hluta en sem lýsir ekki náttúrunni.⁸

Svo skemmtilega vill til eftir þessa tilvitnun að talið berst að grasfræðingi, og er það ekki í eina skiptið sem uppgötvun í einni vísindagrein verður áhrifamikil í annarri grein. Það var breski grasfræðingurinn *Robert Brown* (1773-1858) sem var í sakleysi að rannsaka frjókorn í vatni undir smásjá árið 1827. Hann tók þá eftir undarlegu flakki þeirra fram og aftur undir smásjánni. Hann skoðaði einnig „ryk og söt sem sest svo mjög á alla hluti, einkum í London“, eins og hann kemst að orði, sem og steinryk úr bergi og jafnvel ögn úr *Sfinxinum* í Egyptalandi. Í stuttu máli fann hann svipaða hegðun hjá öllum ögnum sem voru nógu smáar til að haldast svífandi í vatninu en á hinn bóginn nógu stórar til að sjást í smásjá. Þessi tegund hreyfingar er kölluð *hreyfing Browns* og tóku menn nú til við að rannsaka hana allrækilega í tilraunum það sem eftir lifði aldarinnar. Fullnægjandi skýring á fyrirbærinu fékkst hins vegar ekki.

⁷ Þorsteinn Vilhjálmsson, 1987, 290, 311

⁸ „The light in which I have always been accustomed to consider it [the atomic theory] has been very analogous to that in which I believe most botanists now consider the Linnean system; namely, as a convenient for many purposes but which does not represent nature.” (Pais, "Subtle ...", 82. – Vegna þess að Einstein lagði svo mikinn skerf til skammtafræðinnar er þessi ævisaga hans drjúg heimild um sögu hennar, einkum fyrri partinn, og hún hentar eðlisvísindamönnum vel eins og ævisaga Bohrs eftir sama höfund sem nefnd var hér á undan).



Mynd 2. Skoski grasfræðingurinn Robert Brown (1773–1858) sem varð fyrstur til að sjá tilviljunarkennda hreyfingu smásærra einda í vatni. Hægt er að sjá eftirlíkingar af þessari hreyfingu á veraldarvefnum með því að setja leitarorðin "Brownian motion"inn í leitarvél.

Við segjum nú á dögum að Brown hafi séð áhrif þess er sameindir vatnsins rekast á svifagnirnar. Mætti ætla að sú skýring hefði fundist allsnemma, en hér er ekki allt sem sýnist, því að sameindir vatnsins eru miklu þéttari en svo að um einfalda árekstra á einstakar slíkar agnir geti verið að ræða. Þótt mönnum yrði að vísu nokkuð ágengt í skýringum þegar frá leið, kom smiðshöggvið ekki fyrir en eftir aldamót eins og síðar verður frá sagt.

Lengi fram eftir 19. öld komst ekkert skipulag á það, hvernig menn lýstu nánar tiltekið hlutföllum atómmassanna, heldur notaði hver einstakur vísindamaður sitt kerfi. Sömuleiðis var flokkun frumefnanna mönnum mikil ráðgáta. Eftir að hugmyndir Avogadros voru endurvaktar um 1860, fóru menn þó að sjá hvernig ýmsir eiginleikar atómanna breyttust lotubundið þegar þeim er raðað eftir vaxandi massa. Þótt ýmsir legðu hönd á plóginn, er *lotukerfið* venjulega kennt við rússneska efnafræðinginn *Dimitri Ivanoff Mendeljeff* (1834-1907). Það er vissulega verðskuldað eins og haft er eftir Sigmund Freud: „Aðrir höfðu kynnst lotulögmálinu, en hann kvæntist því.” Með því er auðvitað átt við að hann freistaði þess

að nota lotukerfið sem lykil að allri efnafræði, þannig að hann skildi eftir eyður þar sem vantaði frumefni í, sagði fyrir um eiginleika þeirra frumefna sem vantaði og svo framvegis.

Forsagnir Mendeljeffs komu heim við mælingar manna, eftir að hin nýju frumefni fundust. Árið 1895 fann breski eðlisefnafræðingurinn *William Ramsay* (1852-1916) heila röð frumefna eða dálk í kerfinu og hafði ekkert þeirra fundist áður. Þetta voru svokölluð *eðalgös*, og tókst von bráðar að fella þau inn í lotukerfið með eðlilegum hætti þó að Mendeljeff hefði ekki getað sagt fyrir um þau.

Engu að síður er saga lotukerfisins í heild gott dæmi um það hvernig nýmæli í vísindum eru metin og hagnýtt: Hér sem oftast eru það forsagnir og forsagnargildi hinnar nýju kenningar sem skipta sköpum um gengi hennar áður en lýkur.

Í framhaldi af tilgátu Avogadros um tiltekinn fjölda sameinda í ákveðnu rúmmáli af gasi, skilgreindu menn á ofanverðri 19. öld svokallaða *tölu Avogadros*, sem segir einmitt til um hversu margar frumeindir eða sameindir séu í tilteknu efnismagni. Ef þessi tala er þekkt, er auðvelt að reikna út til að mynda, hversu þung hver sameind eða frumeind muni vera. Þess vegna rennir skilgreining hennar og ákvörðun einni fyrstu raunverulegu stöðinni undir þá skoðun að frumeindir og sameindir eigi sér sjálfstæða, raunverulega tilvist. Þegar leið að lokum 19. aldar höfðu mönnum hugkvæmst ýmsar snjallar en mismunandi aðferðir til að mæla þessa tölu eða lesa hana úr tiltækum gögnum. Mismunandi aðferðum bar í rauninni þokkalega vel saman þótt úrslitánákvæmni fengist ef til vill ekki fyrir en á fyrstu áratugum tuttugustu aldar.

Auk þess sem þessi mikilvæga tala var mæld, beittu kenningasmiðir eðlisfræðinnar á þessum tíma atómhugmyndinni óspart í smíðum sínum. Þetta á til að mynda við um skoska eðlisfræðinginn *James Clerk Maxwell* (1831-1879), sem lagði grunninn að þeirri rafsegulfræði sem við búum að enn þann dag í dag. Hann lagði einnig drjúgan skerf til svokallaðrar *safn-eðlisfræði* þar sem það er hreinlega ein aðalforsendan að efnið sé samsett úr frumeindum og sameindum. Þessi eðlisfræðikenning varð til að skýra niðurstöður varmafræðinnar og gefa henni djúpstæðari merkingu en áður.

Þrátt fyrir allt þetta efuðust ýmsir í lengstu lög eins og postulinn Tómas. Meðal þeirra var austurríski



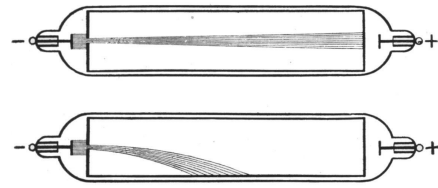
Mynd 3. Myndin sýnir skoska eðlis- og stærðfræðinginn James Clerk Maxwell (1831–1879), sem kalla má höfund rafsegulfræðinnar. Hugmyndir hans um rafsvið, segulsvið og samruna þeirra í rafsegulsviði hafa gerbreytt hugsun eðlisfræðinga um krafta og víxlverkanir milli hluta í náttúrunni. Hann sagði meðal annars fyrir um tilvist og eðli rafsegulbylgna og kvað upp úr um að ljósið væri einmitt ein tegund slíkra bylgna.

eðlisfræðingurinn og heimspekingurinn *Ernst Mach* (1838–1916), einn helsti boðberi raunstefunnar eða pösítífismans:

Það hæfir ekki eðlisvísindum að sjá í breytilegum verkfærum, sem þau hafa sjálf smíðað sér til hægri verka, sameindum og frumeindum, einhvern raunveruleika að baki fyrirbæranna ... atómin hljóta að verða einber verkfæri áfram ... eins og föll stærðfræðinnar.⁹

Það hafði frá upphafi vega verið megineinkenni atómhugmyndarinnar að atómið væri ódeilanlegt; sú er einmitt merking gríska orðsins *atomos*. Á 19. öld höfðu eðlisfræðingar komist að því að þeim nægði að hugsa sér atómin án nokkurra innri eiginleika: Þau væru aðeins ódeilanlegir punktmassar sem stöfuðu frá sér kröftum. Það var einmitt þessi einfalda mynd sem reyndist svo frjósöm í eðlisfræði á síðari hluta 19.

⁹ „It would not become physical science to see in its selfcreated, changeable, economical tools, molecules and atoms, realities behind phenomena ... the atom must remain a tool ... like the function of mathematics.” (Pais, 2005, 83).



Mynd 4. Tilvist rafeinda. Myndin sýnir kjarnann í tilraunum J.J. Thomsons (1856–1940) þar sem hann sýndi fram á tilvist rafeindarinnar. Við sjáum á efri myndinni rafeindabunu sem fer um lofttæmt bakskautshylki. Á neðri myndinni er hylkið í segulsviði og þá beygir rafeindabunan vegna þess að rafeindirnar hafa rafhleðslu. Krappi beygjunnar segir til um hlutfallið milli hleðslu og massa rafeindanna.

aldar. Það kom því eins og þruma úr heiðskíru loft, einmitt þegar eðlisvísindamenn voru loksins almennt reiðubúnir að trú á atómið sem efnislegan raunveruleika, að það skyldi þá einmitt reynast vera deilanlegt, og raunar hafa verið í pörtum í höndunum á mönnum um langa hríð án þess að þeir hefðu hugmynd um það. Breski eðlisfræðingurinn *Joseph John Thomson* (1856–1940) hafði uppgötvað *rafeindina* (electron) árið 1897 og lýsti því yfir tveimur árum síðar að

röfun [þ.e. jónun] felst í reynd í því að atóm klofnar og hluti af massa atómsins losnar frá upphaflega atóminu.¹⁰

Í framhaldi af uppgötvun rafeindarinnar setti Thomson fram hugmynd sína eða líkan um gerð atómsins, sem við getum kallaða *jólakökulíkan*. Samkvæmt því var atómið einfaldlega eins og jólakaka þar sem rafeindirnar gegna hlutverki rúsínanna.

Menn höfðu einnig uppgötvað *geislavirkni* árið 1896 og varð fljótlega ljóst að þar voru hin „ódeilanlegu” atóm einnig að skipta sér. Þannig skrifaði pólsk-franski efna- og eðlisfræðingurinn *Marie Curie* (1867-1934) árið 1900:

Atóm [geislavirkra efna], sem eru ódeilanleg frá efnafræðilegu sjónarmiði, eru hér deilanleg.¹¹

¹⁰ „Electrification [that is, ionization] essentially involves the splitting of the atom, a part of the mass of the atom getting free and becoming detached from the original atom.” (Pais, 2005, 85).

¹¹ „Atoms [of radioactive elements], indivisible from the chemical point of view, are here divisible.” (Pais 85).

Hún bætti því við að alvarlega væri grafið undan lögmálum efnafræðinnar með þeirri skýringu á geislavirkni, að þar væri um að ræða hluta úr atómum sem efnið sendi frá sér.

Þá var nokkuð um liðið síðan menn höfðu byrjað skipulegar rannsóknir á litrófi frumefna. Fyrstur til að koma einhverjum skikk á litrófslínur var svissneski menntaskólakennarinn *Johann Jakob Balmer* (1825-1898), sem rannsaði sýnilegt litróf vetnis og fann ákveðna reglu í bylgjulengdum þeim sem þar komu fyrir. Hins vegar höfðu menn lengi vel alls engar skýringar á þessari reglu.

Tveimur árum síðar uppgötvuðu nokkrir þýskir eðlisfræðingar svokallaða *ljósröfun* (photoelectric effect), sem er í því fólgin að ljós eða önnur rafsegulgeislun getur losað rafeindir til dæmis úr málmum. Þessi röfun fylgir einkennilegum og torskildum reglum þegar betur er að gáð, en margar þeirra fundust ekki í tilraunum fyrr en nokkru síðar. Þegar tímar liðu fram hefur ljósröfun orðið mjög mikilvæg í ýmiss konar tækni því að hún er til dæmis notuð í flestum gerðum *ljósnema* (photocells).

3. Fyrra skeið skammtafræðinnar

Hinn 14. desember árið 1900 flutti þýski eðlisfræðingurinn *Max Karl Ernst Ludwig Planck* (1858-1947) frægan fyrirlestur í Þýska eðlisfræðifélaginu. Er alls ekki úr vegi að segja að þann dag hafi skammtafræðin fæðst, og hefur það þá gerst býsna snögglega eins og ýmis þau hvörf sem hún fjallar um. Í þessum fyrirlestri, sem síðan var birtur á prenti, setur Planck fram lögmálið sem við hann er kennt um *svarthlutargeislun* (black body radiation. Nánar tiltekið er þá átt við litróf eða orkudreifingu í rafsegulgeislun frá svokölluðum svarthlut, en það merkir á máli eðlisfræðinnar hlut sem gleypir alla geislun sem á hann fellur og endurkastar engu beint. Samkvæmt fyrri hugmyndum hefðbundinnar eðlisfræði hafði ekki tekist að ná neinum fullnægjandi tókum á þessari geislun, heldur var hún og tilvist hennar óleyst gáta.

Planck „leysti“ gátuna með því að taka sér þá forsendu, nánast úr lausu lofti, að orkan (eða réttara sagt óreiðan) í sveiflum svarthlutarins væri skömmtuð og stærð skammtanna væri í réttu hlutfalli við tíðnina. Átti síðar eftir að koma í ljós að þess konar skömmtun er einmitt dæmigerð fyrir skammtafræðina og fyrirbæri þau er tengjast henni. Hlutfallsstuðullinn hefur allar götur síðan verið nefndur *stuðull* eða *fasti*

Plancks og hefur reynst vera einn mikilvægasti fasti náttúrunnar, á borð við ljóshraðann og stuðullinn í þyngdarlögmáli Newtons. Jafnframt er þessi stuðull eins konar gunnfáni skammtafræðinnar: Hann kemur þar mjög víða fyrir og á hinn bóginn sést hann ekki annars staðar en þar sem skammtafræði er eða hefur verið beitt. Einnig er hægt að nota stærð hans sem prófstein á það hvort nauðsynlegt sé að beita aðferðum skammtafræðinnar á einhvern tiltekinn vanda, eða hvort unnt sé að láta sér nægja hinar einfaldari og kunnuglegri aðferðir hefðbundinnar eðlisfræði.

Það er því ekki að ástæðulausu sem við kjósum að segja að hin eiginlega saga skammtafræðinnar hefjist árið 1900 þó að vissulega hafi þá enn verið langt í land til endanlegrar kenningar.

Tveimur árum síðar færði nýsjálensk-breski eðlisfræðingurinn *Ernest Rutherford* (1871-1937) ásamt öðrum sönnur á það að geislavirkni hefði í för með sér breytingar úr einu frumefni í annað, eða með öðrum orðum úr einni tegund atóma í aðra. Þess má geta til gamans, þó ekki væri nema til að koma nær jörðinni á köflum, að uppgötvun geislavirkinnar gerbreytti í einni svipan hugmyndum manna um orkugjafa sólar og um orkuna í iðrum jarðar sem við verðum áþreifanlega vör við í eldgosum, jarðhita og jarðskjálftum. Jafnframt margfaldaðist sá tími sem þessir hnettir áttu að hafa verið til samkvæmt eðlisfræðinni. Um aldamótin höfðu áhrifamiklir eðlisfræðingar eins og *Kelvin lávarður* (William Thomson, 1824-1907) verið á góðri leið með að ganga af þróunarkenningu Darwins dauðri vegna þess að jörðin virtist ekki geta verið nógu gömul til að þróunin hefði getað átt sér stað. Tilkoma geislavirkinnar varð þarna Darwin og fylgismönnum hans til bjargar á hættustund.¹²

Árið 1905 er með merkustu árum í sögu eðlisfræðinnar, nánast eingöngu fyrir tilverknað eins manns, svissnesk-bandaríska eðlisfræðingsins *Alberts Einsteins* (1879-1955). Auk þess sem hann setti þá fram takmörkuðu afstæðiskenninguna, birti hann þrjár aðrar greinar um eðlisfræði sem hefðu hver um sig getað dugað honum til drjúgrar frægðar.¹³ Raunar dugði ein þeirra honum til Nóbelsverðlauna 17 árum síðar, því að Sænska vísindaakademífan var svo seinheppin að treystast ekki til að verðlauna afstæðiskenninguna.

¹² Burchfield, 1975.

¹³ Sjá nánar hjá Stachel, 2005. – Nú er unnið að því að þessar greinar Einsteins komi út í íslenski þýðingu.



Mynd 5. Marie Curie (1867–1934). Pólsk-franski eðlis- og efnafræðingurinn Marie Sklodowska Curie fæddist í Varsjá sem var þá í rússneska keisaradæminu en er nú höfuðborg Póllands. Marie fór til náms í París 1891 og fékk síðar franskan ríkisborgararétt. Hún var brautryðjandi í rannsóknum á geislavirkni og fyrsti vísindamaðurinn sem hlaut tvönn Nóbelsverðlaun. Einnig var hún fyrsti kvenprófessorinn við Parísarháskóla.

Tvær af þessum greinum Einsteins koma við sögu hér. Sú fyrri fjallaði um hreyfingu Browns sem áður var getið, og sýnir Einstein þar með útreikningum hvernig skýra má hreyfinguna til fulls með því að vatnssameindir séu að rekast á svifagnirnar. Með öðrum orðum rennir hann enn einni stöðinni undir raunverulega tilvist frumeinda og sameinda.

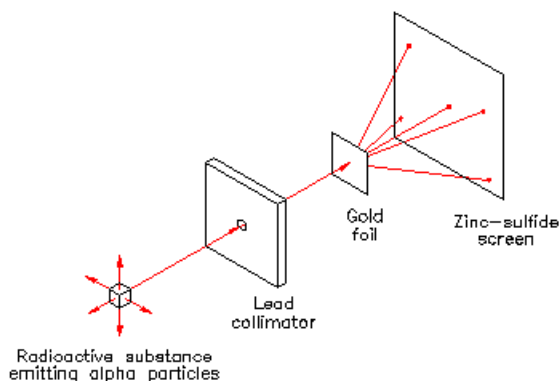
Síðari greinin var sú sem síðar varð fyrir valinu í Stokkhólmi sem tilefni Nóbelsverðlauna. Hún fjallar um ljósröfunina sem áður var nefnd og gefur skýringar á því sem þar er á seyði út frá þeirri grunnforsendu að orka ljóssins eða rafsegulgeislunarinnar sé skömmtuð með svipuðum hætti og Planck hafði áður gert ráð fyrir: Orkan í hverjum skammti, sem við köllum nú á dögum *ljóseind*, sé í beinu hlutfalli við tíðni geislunarinnar, og hlutfallsstuðullinn sé einmitt fasti Plancks. Með þessari einföldu forsendu, sem verður engan veginn rökstudd eða skilin á grundvelli hefðbundinnar eðlisfræði, gat Einstein gert grein fyrir ýmiss konar tilraunum og athugunum sem höfðu þá þegar verið gerðar með ljósröfun. Auk þess voru gerðar nánari athuganir á næstu árum, sem urðu ekki skýrð-

ar nema út frá þessari grunnforsendu hans og styrktu hana því enn frekar.

Næsti meiri háttar viðburður í sögu skammtafræðinnar varð árið 1911 og átti upptök sín í tilraun. Það var Nýsjálendingurinn Rutherford sem lét svokallaðar α -eindir (alfa-eindir) falla á gullþynnu til að athuga hvernig þær beygdu þegar þær rækjust á atómin í gullinu. Niðurstöður tilraunarinnar sýndu svo að ekki varð um villst, að jólakökulíkan Thomsons um atómið fékk ekki staðist, heldur væri atómið samsett úr örlitlum en þungum *kjarna* (nucleus) og léttum rafeindum sem sveimuðu á brautum um hann. Rafkraftarnir milli jáhlaðins kjarna og neihlaðinna rafeinda áttu að halda atóminu saman.

En hér fór sem oftast að ekki verður bæði sleppt og haldið. Þetta líkan Rutherfords fól í sér nýjar þversagnir samkvæmt viðteknum hugmyndum. Hlöðnu rafeindirnar sem sveimuðu um kjarnann áttu samkvæmt grunnhugmyndum rafsegulfræðinnar að geisla frá sér orku í sífellu, þannig að brautirnar færu minnkandi uns þær lentu alveg inni í kjarnanum. Með öðrum orðum átti atóm af þessu tagi ekki að geta verið stöðugt sem kallað er. Menn höfðu hins vegar séð að aðrar hugmyndir um atómið fengu varla staðist og voru byrjaðir að sjóast í furðum skammtafræðinnar og atómanna, þannig að ýmsir féllust á líkan Rutherfords þegar hann setti það fram. Áhrifamiklir eðlisfræðingar höfðu sem sé gert sér ljóst um þetta leyti, að hefðbundinni aflfræði og rafsegulfræði yrði ekki beitt við hegðun atóma og innviði þeirra.

Hér er það sem Daninn *Niels Bohr* (1885–1962), kemur til skjalanna, og á þó enn nokkur ár í þrí-tugt. Fyrsta og jafnframt eitt frægasta framlag hans til skammtafræðinnar er svonefnt *atómlíkan Bohrs*, sem hann setti fram árið 1913. Þar gerir hann sér lítið fyrir og beitir skömmun við rafeindir vetnisatómsins, svipað og þeir Planck og Einstein höfðu áður gert við rafsegulgeislun. Hann tekur sér þá forsendu að rafeindirnar geti aðeins verið á nánar tilteknum brautum sem hlíti ákveðnum skilyrðum um orku, hverfþunga og annað þess háttar, og ástand rafeindar á slíkri braut sé stöðugt, utan hvað atómið kunni að senda frá sér rafsegulgeislun um leið og rafeindin fer af hærra orkustigi á lægra stig. Tíðni slíkrar geislunar er þá jöfn orkumismuninum deilt með stuðli Plancks, sem kemur hér fyrir einu sinni enn og einmitt í hliðstæðu hlutverki og áður.



Mynd 6. Myndin sýnir meginatriðin í tilraun nýsjálenska eðlisfræðingsins Ernest Rutherford (1871–1937) þar sem hann sýndi fram á tilvist atómkjarnans. Alfa-eindum er beint að gullþynnu þar sem þær rekast á atóm gullsins. Ef atómið væri "jólakaka" eins og fyrri niðurstöður bentu til, þá ættu árekstrarnir ekki að geta sveigt alfaeindirnar eins mikið og myndin sýnir. Rutherford túlkaði þetta þannig að í atómnum væri örmár kjarni og alfa-eindirnar væru að rekast á hann. http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/nats102/mario/images/rutherford_exp.gif

Dirfska Bohrs er fyrst og fremst í því fólgin að hann tekur sér þá forsendu að rafeindin, sem ætti að verða fyrir stöðugri hröðun á hringsóli sínu, sendi ekki frá sér rafsegulgeislun af þeim sökum eins og henni bar að gera samkvæmt rafsegulfræðinni. Á þessari forsendu, sem Bohr tók sér, gat hann hins vegar ekki gefið neina skýringu.

Með hjálp líkansins gat Bohr hins vegar skýrt línurnar í litrófi vetnis: í fyrsta lagi það að litrófið skyldi vera samsett úr línunum en ekki samfellt, í öðru lagi regluna sem Balmer hafði fundið árið sem Bohr fæddist, í þriðja lagi aðrar hliðstæðar reglur sem aðrir höfðu fundið síðan og átta eftir að finnast á næstu árum með kenningu Bohrs að leiðarljósi, og í fjórða lagi gat hann reiknað svokallaðan stuðul Rydbergs, sem kom fyrir í litrófsreglunum, út frá öðrum þekktum stærðum atómvísindanna. Einnig gat hann rakið stærð vetnisatómsins með sama hætti til annarra grundvallarstærða náttúrunnar.

Bohr gerði því ennfremur skóna að geislavirkni ætti sér stað í atómkjarnanum og að það væri hleðsla kjarnans sem endurspegladist í röðun lotukerfisins, enda tölum við nú á dögum um *sætistölu* (atomic number) í því samhengi. Eðlisfræðilegt hlutverk þeirr-

ar tölu efldist enn með rannsóknum breska eðlisfræðingsins *Henry Gwyn-Jeffreys Moseley* (1887–1915) um sama leyti (1913–14) á því hvernig Röntgengeislun færi eftir frumefnum. Bohr ýjaði einnig að skýringum á lotulögmáli efnafræðinnar sem áður var getið, en gat ekki gert því nein fullnægjandi skil.

Þó að líkan Bohrs væri vissulega mikilvægur áfangi sem vísaði veginn á næstu árum, og því sé rétt að tala hér um tímamót í uppveiti skammtafræðinnar, þá er hinu ekki að leyna að það fól í sér miklar veitur eða takmarkanir sem voru mönnum raunar ljósar að meira eða minna leyti frá byrjun. Líkanið fjallaði aðeins um lotubundin kerfi, sagði ekki til um líkindi á hvörfum milli orkustiga í atómum og dugði aðeins á atóm með einni rafeind. Það þótti þá þegar, og þykir enn þann dag í dag, gefa ófullnægjandi samhengi og skilning.

4. Síðara skeið skammtafræðinnar

Á næstu 10-15 árum varð skammt stórra höggva í milli í sögu þessarar nýstárlegu greinar á meiddi eðlisfræðinnar. Bæði gerðu tilraunaeðlisfræðingar nýjar athuganir og mælingar sem vörpuðu sífellt nýju ljósi á furður atómsins, og kenningasmíðirnir settu fram nýjar hugmyndir í látlausu amstri sínu við að henda reiður á þessum sömu furðum. Við verðum því miður að fara fljótt yfir sögu, enda nálgast nú þau atriði sem eru kunnari á okkar dögum.

Ráðgátur tilraunanna héldu til að mynda áfram að hlaðast upp með mælingum breska eðlisfræðingsins *James Chadwicks* (1891-1974) á orkurófi í β -geislun (beta-geislun) frá atómum, þar sem engu var líkara en orka hyrfi við geislunina. Það þótti mörgum stór biti að kyngja, en aðrir, þar á meðal Bohr, létu þetta og annað verða sér tilefni til að gæla við þá hugmynd að lögmálið um *varðveislu orkunnar* (conservation of energy) gildi ekki almennt. Nokkrum árum síðar var þessi róttæka hugmynd þó gefin upp á báttinn.

Í grein frá 1918 setti Bohr fram fullum fetum þá grundvallarhugmynd, að nýja skammtafræðin yrði að vera eðlileg alhæfing eldri kenninga, til dæmis um geislun, þannig að nýja kenningin gæfi til dæmis sömu niðurstöður og hin gamla þar sem hún hafði áður reynst vel. Þessi hugmynd nefnist *samsvörunarreglan* (correspondence principle) og er að sjálfsögðu býsna mikilvæg frá aðferðafræðilegu sjónarmiði. Í raun og veru ber að hafa slíka reglu til hliðsjónar

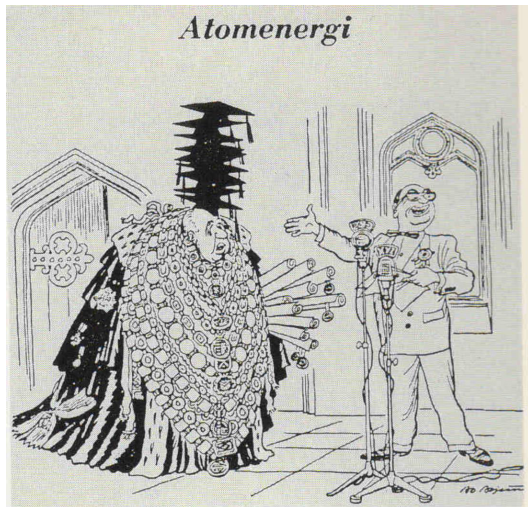


Plate 23 'And now our honored guest will give his famous lecture on chain reactions.' Cartoon by Bo Boyesen in Politiken, 1958. (Copyright: Niels Bohr Archive.)

Mynd 7. Niels Bohr (1885–1962). Þessi frægi danski eðlisfræðingur var einn af áhrifamestu vísindamönnum 20. aldar. Framlagi hans til skammtafræðinnar er lýst í meginmáli greinarinnar en auk þess gerði hann til dæmis mikilvægar rannsóknir á kjarnaklofnun og keðjuverkunum og vísar myndin til þess. Honum var sýndur margvíslegur heiður í Danmörku og erlendis. - Kynnirinn segir: "Nú mun heiðursgestur okkar halda frægt erindi sitt um keðjuverkanir. Bo Boyesen, höfundur myndarinnar, teiknaði áratugum saman myndir af þessu tagi á baksíðu dagblaðsins Politiken. – Birt með leyfi Skjalasafns Nielsar Bohrs.

hvenær sem nýjar vísindakenningar taka við af eldri kenningum sem hafa reynst vel á takmörkuðum sviðum en standast ef til vill ekki þegar reynslusviðið stækkar. – Þessi samsvörunarregla Bohrs reyndist mönnum býsna vel sem leiðarhnoða í þróun hugmyndanna á næstu árum uns hnúturinn leystist.

Árið 1923 uppgötvaði bandaríski eðlisfræðingurinn *Arthur C. Compton* (1892-1962) hrif þau sem við hann eru kennd og koma fram þegar Röntgen- og gammageislar rekast á rafeindir, til dæmis í málumum. Í slíkum árekstrum hegðar geislunin sér enn eins og agnir, og kemur það jafnvel enn skýrar fram en áður.

Árið 1925 setti austurrísk-svissneski eðlisfræðingurinn *Wolfgang E. Pauli* (1900-1958) fram *einsetulögmálið* (exclusion principle), en samkvæmt því geta til dæmis tvær rafeindir ekki verið í sama

skammtafræðilega ástandi, það er að segja haft sömu skammtatölur. Með hjálp fyrri hugmynda og þessa lögmáls gat Pauli gert grein fyrir reglum lotukerfisins sem áður var getið. Túlkun hans styrktist af þeirri uppgötvun hollensk-bandarísku eðlisfræðinganna *Samuels A. Goudsmits* (1902-1978) og *George Eugene Uhlenbecks* (1900-1988), að rafeindin hafi svokallaðan *spuna* (spin) sem er eins konar innri hverfþungi og tvöfaldar fjöldi þeirra *ástanda* (states) sem rafeindin ætti annars kost á.

Árið 1923 setti franskur eðlisfræðingurinn *Louis de Broglie* (1892-1987) fram í doktorsritgerð þá röttæku hugmynd að efnisagnir eins og rafeindin höguðu sér stundum eins og bylgjur. Það væri sem sé ekki nóg með að ljós og önnur rafsegulgeislun, sem menn höfðu áður talið vera bylgjur, hefði nú reynst koma fram sem agnir þegar svo bar undir, heldur hefðu fyrirbæri sem menn höfðu talið til efnisagna einnig bylgjueðli. Með hjálp takmörkuðu afstæðiskenningarinnar fékk hann fram jöfnur sem tengdu samans vegar orku og skriðþunga agnarinnar og hins vegar tíðni og öldulengd bylgjunnar sem fylgdi henni. Þetta virtist raunar í fyrstu einberir órar og de Broglie velti því ekkert alltof mikið fyrir sér hvort þetta bylgjueðli efnisagna mundi vera sýnilegt í tilraunum. En atburðarásin hélt áfram með undraverðum hraða.

Á árinu 1925 birtist í þýsku tímariti grein eftir kornungan þýskan eðlisfræðing, *Werner Heisenberg* (1901-76), þar sem loksins var höggvið á hnútinn, raunar á grundvelli hins þrotlausa starfs sem unnið hafði verið áratugina á undan. Þó að Heisenberg vissi það varla sjálfur í fyrstu, fólst lausn hans í því að reglur svokallaðs *fylkjareiknings* (matrix calculus) giltu til dæmis með ákveðnum hætti um líkindin á öllum hugsanlegum hvörfum í atómi. Hann og Pauli höfðu einsett sér að losna við vandamál hinnar gömlu skammtakenningar Bohrs og fleiri með því að sniðganga rafeindabrautirnar sem þar komu svo mjög við sögu. Heisenberg hélt sig því eingöngu við mælanlegar stærðir í reikningum sínum, en setti fram sérstakar og nýjar hreyfjöfnur um það, hvernig þær breyttust með tímanum og fyrir áhrif hver annarrar.

Nokkrum mánuðum eftir að grein Heisenbergs kom út, birtist önnur grein um nýja heildarkenningu um skammtafræði, eftir austurríska eðlisfræðinginn *Erwin Schrödinger* (1887-1961). Hann kom að vandanum úr allt annarri átt en Heisenberg, því að hann hafði tekið hvatningu starfsbræðra sinna um að finna

bylgjujöfnuna sem bylgjur de Broglies mundu hlíta, en eðlisfræðingum þykir jafnsjálfsgagt að bylgjur hlíti einhverri tiltekinni bylgjujöfnu og venjulegu fólki að stjórnmálamönnum fylgi hávaði. Schrödinger fann þessa bylgjujöfnu og hún ber nafn hans enn þann dag í dag, og er venjulega meðal þess fyrsta sem nemendum er kennt í háskóla eða annars staðar um nútíma eðlisfræði smásærra agna. Hana má nota til að gera grein fyrir langflestum þeim fyrirbærum sem menn höfðu verið að kljást við, nánar tiltekið öllum fyrirbærum þar sem agnirnar nálgast ekki ljóshraða þannig að taka þurfi tillit til afstæðiskenningarinnar.

Þótt hið sama eigi við um kenningu Heisenbergs getur vart ólíkari kenningar eða aðferðir við fyrstu sýn en fylkjareikning hans og bylgjuaðferðir Schrödingers. Þannig leit út fyrir að eðlisfræðingar ættu fyrir höndum að gera upp á milli ólíkra kenninga sem virtust í fyrstu umferð geta gert grein fyrir sömu fyrirbærunum. Margir hafa því trúlega andað léttar þegar Schrödinger sýndi fram á eftir nokkra mánuði að kenningarnar tvær væru stærðfræðilega jafngildar: Þær tengja saman mælanlegar stærðir með nákvæmlega sama hætti, og menn geta því valið hvora þeir vilja nota eftir því sem best hentar hverju sinni. Og það hefur vissulega verið gert síðan, yfirleitt á þann veg að jafna Schrödingers þykir henta best í tiltölulega einfaldri skammtafræði, en aðferðum Heisenbergs er beitt þegar lengra er haldið og þá ekki síst þegar skammtafræðin er tengd afstæðiskenningunni.

Með ritsmíðum Heisenbergs og Schrödingers á árunum 1925-6 lýkur í rauninni sögunni af því, hvernig skammtafræðin varð til: Grunnurinn var lagður og eftir var aðeins að slípa og fægja, túlka og reikna. Sömuleiðis var eftir að gera ýmsar tilraunir og sannprófa með margvíslegum hætti hvort nýja kenningin stæðist próf reynslunnar eins og allar nýjar vísindakenningar þurfa að gera ef þær eiga að lifa. Af þessum sökum finnst mér engan veginn hægt að sleppa söguþræðinum hér, heldur verði að spinna hann þar til afdrif „söguhetjunnar“ (skammtafræðinnar) eru ráðin. Næsti kafli er ætlaður til þess.

5. Eftirmálinn

Það gerðist trúlega miklu fyrr en menn varði, að bylgjueðli rafeinda samkvæmt róttækri hugmynd de Broglies sýndi sig í beinum tilraunum. Þegar á árinu 1927 gerðu bandarísku eðlisfræðingarnir *Clinton*

Joseph Davisson (1881-1958) og *Lester Germer* (1896-1971) fræga tilraun þar sem þeim tókst að sýna fram á svokallaða *öldubeygju* (wave diffraction) rafeinda sem fóru um kristalla eða efnisþynnur. Þess konar öldubeygja er einmitt eitt þeirra fyrirbæra sem skilja milli bylgna og annarra hreyfinga; hún verður til dæmis þegar hljóðbylgjur beygja fyrir horn eins og við heyrum oft á dag án þess að hugsa endilega út í það. Ýmsar fleiri tilraunir hafa verið gerðar með hliðstæðum niðurstöðum.

Á sama ári, 1927, setti Heisenberg fram svokallað *óvissulögmál* sem er oft kennt við hann. Í því felst til að mynda að ekki sé hægt að mæla stað og skriðþunga (eða hraða) smásærrar agnar á sama tíma með hversu mikilli nákvæmni sem vera skal, heldur sé margfeldið af óvissu þessara tveggja stærða alltaf stærra en tiltekin tala. Ef við mælum til dæmis staðinn með ótakmarkaðri nákvæmni, missum við alla vitneskju um skriðþungann eða hraðann, og öfugt. Í þessu lögmáli kristallast glöggt hvernig skammtafræðin stangast á við vanabundnar hugmyndir okkar, enda er það líklega frægast af furðum skammtafræðinnar, ef til vill ásamt kenningunum um *tvíeðli bylgju og agnar* (wave-particle duality). Verður nánar vikið að þessu í kaflanum um heimspeki hér á eftir.

Árið 1928 sýndi rússnesk-bandaríski eðlisfræðingurinn *George Gamow* (1904-1968) fram á hvernig skýra mætti α -geislun frá atómkjörnum með hjálp skammtafræðinnar. Upp úr því hófust umfangsmiklar rannsóknir á innra eðli atómkjarnanna og á þeim hvörfum sem þeir taka. Þær rannsóknir drógu sannarlega dilk á eftir sér áður en lauk, atómsprengjuna sem var til dæmis bæði þeim Bohr og Einstein mikið áhyggjuefni, en er að öðru leyti ekki til umræðu hér í þessari grein.

Sama ár setti breski eðlisfræðingurinn *Paul Adrien Maurice Dirac* (1902-1984) fram fræga jöfnu sína um hegðun rafeindar samkvæmt afstæðiskenningunni. Niðurstöður Diracs fólu jafnframt í sér að tilteknar öreindir, þar á meðal rafeindin, ættu sér svo nefndar *andeindir* (antiparticles) sem væru að flestu leyti eins og upphaflega eindin utan hvað rafhleðsla eindar og andeindar hefði gagnstætt formerki. Dirac náði þarna óvæntum og undraverðum árangri í þá átt að tengja saman skammtafræði og afstæðiskenningu. Um 30 árum síðar tókst mönnum að byggja á hugmyndum hans heilsteypta kenningu sem nefnist

skammtarafsegulfræði (quantum electrodynamics).¹⁴ Hún fjallar um rafsegulvíxlverkanir öreinda í fullu samræmi við afstæðiskenninguna. Hins vegar hefur reynst þungt fyrir fæti að skapa slíka kenningu sem mundi gilda um allar víxlverkanir.

Árið 1930 lagði Pauli til þá lausn á vanda þrófinsins, að svokölluð *fiseind* (neutrino) myndaðist í hvörfunum ásamt rafeind og nýjum kjarna, og tæki fiseindin upp þá orku sem annars virtist hverfa, raunar ásamt öðru sem til þyrfti. Mér þykir þessi tilgáta Paulis alltaf sérlega athyglisverð frá þekkingarfræðilegu og aðferðafræðilegu sjónarmiði, en því miður er ekki svigrúm til að fara nánar út í þá sálma hér.

Árið 1932 fann bandaríski eðlisfræðingurinn *Carl David Anderson* (1905-1991) svokallaða *jáeind* (positron) sem er andeind rafeindarinnar samkvæmt forsögn Diracs. Sama ár fann fyrrnefndur Chadwick *nifteindina*, sem er ásamt róteind og rafeind ein af grunneiningum atómsins. Með þeirri uppgötvun má því segja að komnir séu fram allir helstu drættirnir í þeirri mynd sem við gerum okkur af atóminu enn þann dag í dag.

Og hér getum við látið staðar numið í eftirmál-anum þó að sitthvað eigi eftir að gerast. Þegar hér er komið sögu er skammtafræðin orðin viðtekin kenning innan nútíma eðlisfræði, kenning sem menn beita í veröld atómanna og þaðan af smærri einda og virðist gefa fullnægjandi lýsingu á þeim athugunum sem menn gera á þeim, að því marki sem agnirnar nálgast ekki ljóshraðann. Skammtafræðin kemst smám saman á sama stall og aðrar viðurkenndar og skilvirkar kenningar hafa í vísindum, sama stall og affræði Newtons hafði áður skipað ásamt til dæmis rafsegulfræði Maxwells, og sama stall og afstæðiskenning Einsteins skipar einnig. Annar kafli tekur svo við í sögu eðlisfræðikenninganna, kafli um heildarkenningu sem sameini skammtafræði og afstæðiskenningu, en honum er sem fyrr segir enn ekki lokið og því rekjum við ekki söguna lengra að þessu sinni.

6. Lærdómar af sögunni

Af sögu skammtafræðinnar má draga ýmsa lærdóma sem varða þróun vísinda almennt, ekki síst þá atburði eða atburðarásir sem Thomas Kuhn (1922-1996) kallar *vísindabyltingar* (scientific revolutions), þar á meðal *kreppurnar* (crises) sem eru undanfarar þeirra. Það er raunar ekki tilviljun að tilkoma skammtafræðinnar

fellur býsna vel að þessum hugmyndum Kuhns, því að hann er nákunnugur skammtafræðinni og hefur meðal annars skrifað bók um aðdraganda hennar og fyrsta skeið, eins og áður er getið.

Kreppan sem fór á undan skammtafræðinni er í mínum huga tiltölulega augljós og hefur vonandi komið fram að einhverju leyti í frásögninni hér á undan. Hún fólst meðal annars í því að mönnum var svara fátt við mikilvægum og eðlilegum grundvallarspurningum eins og þessum:

- Hvers vegna eru öll atóm sama frumefnis nákvæmlega eins?
- Hvers vegna ganga sum frumefni í sambönd en önnur ekki, með öðrum orðum: Hvernig stendur á mismunandi efnafræðilegu gildi frumefnanna?
- Hvernig stendur á þeim reglum sem frumefnin lúta samkvæmt lotukerfi Mendeljeffs?
- Hvers vegna er litróf rafsegulgeislunar frá efnunum í sundurlausum línum?
- Hvernig stendur á reglunum sem þessar línur hlíta?
- Hver er skýringin á undarlegri hegðun ljósröfunar?
- Hvaðan kemur geislavirknin?
- Hvernig stendur á því að hefbundin eðlisfræði nær ekki utan um litróf svarthlutar, heldur gefur niðurstöður sem eru út í hött?

Þannig mætti æra óstöðugan með spurningum sem hafa leitað á huga eðlisvísindamanna á árunum kringum aldamótin 1900. Og fyrstu skrefin í átt til svara vöktu jafnvel nýjar og síst þægilegri spurningar, eins og þegar atómlíkan Rutherford's vakti spurninguna um stöðugleika hins nýja atóms gagnvart rafsegulgeislun.

Hvað snertir byltinguna sjálfa þá er skammtafræðin sérlega gott dæmi um það sem kallað er að nýja og gamla kenningin séu *ósammælanlegar* (incommensurable). Með því er átt við að engin bein samsvörun sé milli nýju kenningarinnar og hinnar gömlu. Jafnvel þótt sömu orð séu notuð um hugtökin í nýju kenningunni, þá hafa þau öðlast nýja merkingu. Þannig mundi Kuhn líklega segja að hugtökin staður og hraði eða skriðþungi hafi nýja merkingu eða séu notuð í nýju samhengi í skammtafræðinni, meðal annars af því að þau hlíta nú óvissulögmáli Heisenbergs.

Að því er varðar mannlegu hliðarnar í sögu skammtafræðinnar er hún gott dæmi um það sem

¹⁴ Sjá til dæmis Feynman, 2000.

Kuhn bendir á meðal annarra, að það eru oft fyrst og fremst ungir menn sem standa að byltingum í vísindum og fylgja þeim eftir. Flestar aðalpersónur sögunnar sem hér er rakin eru um þrítugt eða innan við það þegar þær koma fram á sjónarsviðið og setja þá einmitt fram sínar frægustu hugmyndir. Þetta á til dæmis við um Rutherford, Einstein, Moseley, Bohr, Pauli, de Broglie, Heisenberg, Gamow, og Dirac. Það á hins vegar ekki við um Planck, sem var orðinn 42 ára þegar frægasta afurð hans, stuðull Plancks, varð til. Það er kannski dæmigert að Planck átti alla tíð mjög erfitt með að setta sig við ýmislegt af því sem fylgdi í kjölfarið á þessum fræga og mikilvæga stuðli. Ef til vill er það einnig táknrænt að Schrödinger, sem var kominn hátt á fertugsaldur þegar jafna hans varð til, átti sömuleiðis erfitt með að setta sig við furður skammtanna.

Enn vil ég nefna þann lærdóm af sögu skammtafræðinnar, að hún verður til í stöðugu samspili milli tilrauna og nýrra hugmynda eða kenninga. Tilraunirnar verða til að styrkja kenningarnar, vel að merkja þær kenningar sem „lifa af“. Hinar hugmyndirnar, sem kannski voru fullt eins vel rökstuddar þegar þær voru settar fram, falla í gleymsku eftir að dómur tilraunanna fellur, eða jafnvel eftir að í ljós kemur að þær samrýmast öðrum viðteknum hugmyndum ekki eins vel og keppinauturinn.

Þetta vill oft gleymast þegar menn „skrifa söguna aftur á bak“ sem kalla má, það er að segja skrifa söguna frá sjónarhóli síðari tíma. Þess konar söguritun er raunar sérlega villandi þegar um er að ræða hugmyndasögu eins og hér, þar sem hugmyndunum vindur sífellt fram. Hver hugmynd er þá auðvitað sett fram á grundvelli þess sem þá var vitað en ekki þeirra hugmynda sem áttu eftir að koma fram. Þetta þarf stöðugt að hafa í huga þegar fjallað er um hugmyndir fyrri tíma, sem kunna að virðast barnalegar eða einfaldar í ljósi nútíma þekkingar. Sem dæmi um þetta úr sögu skammtafræðinnar má nefna jólakökulíkan Thomsons af atóminu, sem átti fullkominn rétt á sér á sínum tíma og varð raunar frjósamur grundvöllur frekari rannsókna í nokkur ár, þó að Rutherford gerði síðan út af við jólakökuna. Og einmitt í túlkun örlagaríkra tilrauna er oft mikilvægt að fyrir liggi margar mismunandi kenningar eða tilgátur, sem hægt er að bera saman til að velja þá sem best fellur að niðurstöðunum.

Þá er fróðlegt að taka eftir því, hvernig menn tóku atómímynd Bohrs, sem var í rauninni eins og skref út

í myrkrið, því að hún var meingölluð þegar í byrjun. Sumir mundu segja að hún hafi verið röng þá þegar, eða „hrakin“ eins og austurrísk-breski heimspekingurinn *Karl Raimond Popper* (1902-1994) mundi kalla það. Hvernig stóð þá á því að menn tóku þessari tilgátu fegins hendi og heiðruðu höfund hennar sem mest þeir máttu? Ætli það hafi ekki verið meðal annars af því að menn voru langþreyttir á því að hafa engin tæki til að kljást við vandann og skynjuðu að þarna væri þó alltént um að ræða skref í rétta átt? Við segjum stundum í hálfkæringi að betra sé að veifa röngu tré en öngu, og kannski felst í því meiri speki en okkur er tamt að ætla, að minnsta kosti ef orðið „rangur“ er skilið „réttum“ skilningi.

Svo mikið er víst að við getum prísað okkur sæl fyrir það að á þessum tíma var ekki til nein lögregla sem vildi banna vísindamönnum að veifa sínu ranga tré. Andstæðingar hinna nýju hugmynda áttu heldur ekki kost á neinum dómstól sem væri reiðubúinn að taka ófullburða reifabarn skammtafræðinnar til viðeigandi meðferðar með áfrýjunum og málastappi.

Eitt sérkennilegasta atriðið í sögu skammtafræðinnar, sem hún ber merki um enn þann dag í dag, er það að jafngildar kenningar þeirra Heisenbergs og Schrödingers, sem báðar leystu vandann hvor á sinn hátt, skyldu koma fram því sem næst á sama tíma. Í sjálfu sér er nokkuð ljóst, hvað gerst hefði ef kenningarnar hefðu ekki reynst jafngildar þegar í upphafi máls: Þá hefðu menn gert sér far um að gera upp á milli þeirra með öllum ráðum vísindanna, með tilraunum og með kennilegum athugunum á innra samræmi og samræmi við aðrar tengdar hugmyndir. Úr því að þær höfðu hins vegar reynst jafngildar var engin ástæða til slíks uppgjörs. Kenningarnar reyndust einnig hafa verulegt notagildi, hvor með sínum hætti, og þess vegna lifa þær báðar í kennslubókum um skammtafræði enn þann dag í dag.

Hitt er ekki síður forvitnilegt að hugleiða hvernig farið hefði ef aðeins önnur kenningin hefði komið fram á þessum umbrotatíma þegar samfélag eðlisfræðinnar beið með óþreyju eftir snjallri og heildstæðri lausn á gátum atómagna og orkuskammta. Hér spyr sá sem ekki veit, eins og vera ber, en ég dreg ekki dul á það hugboð mitt að þá væri aðeins ein kenning í kennslubókunum í dag: Þá hefðu menn náð að venjast nýrri kenningu, sannfærast um gildi hennar og svo framvegis, áður en önnur kenning hefði ef til vill komið fram, og þá hefði fáum þótt ástæða til að gaumgæfa

hana líka. Þannig er óvíst að síðari kenningin hefði nokkurn tímann náð upp fyrir þann þröskuld sem vísindakenningar þurfa að komast yfir til að verða viðteknar og fullgildar í heimi vísindanna.

Af þessu má draga þann lærdóm um aðrar ríkjandi kenningar í vísindum, að vel má vera að hægt sé að búa til aðrar jafngildar þeim eða betri, en á það reynir þó yfirleitt ekki fyrr en hin ríkjandi kenning lendir í erfiðleikum. Í vísindastörfum gildir sama vinnulag heilbrigðrar skynsemi og í venjulegum smíðum, að menn spara sér að smíða ný áhöld og venjast þeim þar til þau gömlu reynast ófullnægjandi.

7. Skammtafræðin og heimspekin

Þegar affræði Newtons og afurðir hennar á næstu öldum eru skoðaðar ofan í kjölinn, kemur í ljós að í henni felst það sem kallað er í heimspeki *nauðhyggja* (strict determinism, strict causality), það er að segja að allt sem gerist sé fyrirfram ákveðið og gerist af óhjákvæmilegri nauðsyn. Þessu er ágætlega lýst með því að vísa í hugmynd franska stærðfræðingsins og eðlisfræðingsins *Pierre Simon de Laplace* (1749-1827). Hann hugsaði sér anda sem fengi að vita um stað og hraða allra efnisagna á einhverri tiltekinni stundu. Þessi andi mundi þá geta beitt lögumálum affræðinnar til að reikna út ástand efnisins hvenær sem væri:

Ekkert væri hulið óvissu fyrir þessum anda, og bæði framtíð og fortíð stæðu honum fyrir hugskotssjónum.¹⁵

Í reynd þyrfti andinn að sjálfsögðu að gæta að nákvæmni, bæði í útreikningum sínum og forsögnum. Til þess að ná einhverri tiltekinni nákvæmni þyrfti hann ekki aðeins að reikna grannt, heldur einnig að þekkja upphafsskilyrðin með ákveðinni nákvæmni sem þyrfti að vera þeim mun meiri sem meiri kröfur væru gerðar um nákvæmni forsagnanna. Í hefðbundinni eðlisfræði er hér ekki um neitt sérstakt vandamál að ræða; eðlisfræðingar mundu bara yppta öxlum og segja að nákvæmnin í mælingum á byrjunarstöðunni sé aðeins „tæknilegt vandamál“.

Því er hins vegar ekki að heilsa í skammtafræði, og koma þar fyrst og fremst til fyrirnefnd óvissuvensl Heisenbergs. Vegna þeirra er ekki hægt að mæla bæði stað og hraða efnisagnanna í byrjun með eins mikilli

nákvæmni og vera skal, en það er einmitt nauðsynlegt að beita nákvæmni við báðar þessar stærðir fyrir hverja ögn til að fá nákvæmni í forsögnum. Andi Laplace getur því ekki fengið að vita um upphafsstöðu efnisagnanna með þeirri nákvæmni sem honum þóknast, og forsögnum hans eru því settar óhjákvæmilegar skorður um nákvæmni, sem minnkar yfirleitt þegar lengra líður frá upphafstímanum. Þegar af þessari ástæðu stangast skammtafræðin á við nauðhyggjuna í anda Laplace.

Stundum reyna menn að koma sér undan þessu eða draga úr því með því að benda á að jafna Schrödingers sé í raun og veru nauðgeng: Ef svokallað bylgjufall er þekkt í upphafi, þá segir jafnan fyrir um það fyrir hvaða tíma sem er. Þetta er í sjálfu sér rétt og það er líka rétt að það er hægt að komast að öllu sem máli skiptir um bylgjufallið í byrjun með því að mæla stærðir sem henta til þess. Hins vegar er bylgjufallið þá því aðeins þekkt um alla framtíð að við gerum engar mælingar á kerfinu, eða að minnsta kosti aðeins tilteknar mælingar úr mjög takmörkuðum hópi. Það er nefnilega eitt af einkennum skammtafræðinnar að mæling hefur áhrif á það sem mælt er og þau áhrif eru að verulegu leyti ófyrirsjáanleg.

Hér er ekki rúm til að rekja miklu nánar allt það sem rætt hefur verið og ritað um óvissulögmál skammtafræðinnar¹⁶ og hugsanlegar afleiðingar eða endurspeglanir þess á hinum ýmsustu sviðum, allt frá kviknun lífsins og stökkbreytingum erfðanna til gátunnar um frelsi eða ófrelsi viljans. En í krafti þess að við erum hér öðrum þræði að fjalla um heimspeki og ekki aðeins um eðlisfræði, vil ég að lokum segja þetta:

Í Ensk-íslenskri orðabók Arnar og Örlygs er orðið *löghyggja* (weak determinism, weak causality) haft um „þá heimspekikenningu að allt sem gerist lúti náttúrulegumálum“. Nauðhyggja er aftur á móti sögð vera „sú heimspekikennung að allt sem gerist verði af nauðsyn“. Mér virðist skammtafræðin falla undir löghyggju samkvæmt þessari skilgreiningu, en ekki undir nauðhyggju, vegna þess að lögmál skammtafræðinnar eru ekki þess eðlis að þau segi eða ætli sér að segja fyrir um alla hluti. Munurinn á löghyggju og nauðhyggju er meðal annars sá, að í heimi löghyggjunnar ríkjja að vísu ýmis lögmál og reglur um hlutina og framvindu þeirra, en þessi lögmál eru þó ekki

¹⁵ Þorsteinn Vilhjálmsson, 1987, 293. – „Rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé, serait présent à ses yeux.“ (Laplace, 1820, ij-iiij).

¹⁶ Jakob Yngvason (1987) hefur skrifað rækilega og vandada grein á íslensku um þessi efni og verður það varla betur gert í bráð.

endilega fullkomin í þeim skilningi að þau segi fyrir um alla skapaða hluti. Jafnframt sýnist mér ljóst að í slíkum heimi geta menn aldrei verið vissir um að hafa höndlað öll þau lögmál sem kunna að gilda um veruleikann. Í þeim heimi á hún vel heima spurningin sem Galíleó leggur einni af bókarpersónum sínum í munn: „Hvenær mun ég hætta að undrast?”¹⁷

Heimur nauðhyggjunnar er hins vegar allt annar. Þar ríkir hin fullkomna víska, eða menn gera að minnsta kosti ráð fyrir því að hún verði höndluð og sé þá ef til vill skammt undan. Í þeim heimi væri það blekking ein af lesandanum að halda að hann sé að lesa þessi orð af fúsum og frjálsum vilja af því að hann hafi áhuga á efni greinarinnar.

Eins og áður er sagt fellur skammtafræðin að mínu viti að heimspeki löghyggjunnar en ekki nauðhyggjunnar. Ég vil því að lokum skjóta því að lesandanum hvort við höfum ekki bara verið heppin að þeir Bohr og Heisenberg losuðu okkur undan fargi vissunnar sem fólst í anda Laplace og færðu okkur í staðinn óvissuna í Kaupmannahöfn og þá um leið væntanlega frjálssari vilja en ella.

Heimildir

- [1] Burchfield, Joe D. (1975). *Lord Kelvin and the age of the Earth*. London: Macmillan Press.
- [2] Feynman, Richard Phillips, (2000). *Ljósið*. Íslensk þýðing eftir Hjört Jónsson, inngangur eftir Þórd Jónsson. Reykjavík: Hið íslenska bókmenntafélag.
- [3] Heilbron, John L. (1986). *The dilemmas of an upright man: Max Planck as spokesman for German science*. Berkeley : University of California Press.
- [4] Jakob Yngvason (1987). „Skammtafræði og veruleiki”. Hjá Þorsteini I. Sigfússyni (ritstj.), *Í hlutarins eðli: Afmælisrit til heiðurs Þorbirni Sigurgeirssyni prófessor*. Reykjavík: Menningarsjóður.
- [5] Kuhn, Thomas (1970). *The structure of scientific revolutions*. Önnur útgáfa, aukin. Chicago: University of Chicago Press. [Fyrsta útg. 1962].
- [6] Kuhn, Thomas S. (1978). *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*. Oxford [etc.]: Clarendon Press: Oxford University Press.
- [7] Laplace, Pierre Simon de (1820). *Théorie analytique des probabilités*, 3. útg. París: Courcier.
- [8] Pais, Abraham (2005) [1982]. *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press.
- [9] Pais, Abraham (1993). *Niels Bohr's times, in physics, philosophy, and polity*. Oxford: Clarendon Press.

- [10] Stachel, John (1998). *Einstein's Miraculous Year: Five papers that changed the face of physics*. Princeton: Princeton University.
- [11] Þorsteinn Vilhjálmsson (1986). *Heimsmynd á hverfanda hveli 1*. Reykjavík: Mál og menning.
- [12] Þorsteinn Vilhjálmsson (1987). *Heimsmynd á hverfanda hveli 2*. Reykjavík: Mál og menning.

Þeim sem vilja lesa meira á íslensku um skammtafræði er bent á rit Feynmans og Jakobs Yngvasonar í skránni. Auk þess geta menn til dæmis farið inn á visindavefur.hi.is og sett orðið „skammtafræði” inn í leitavél vefsins.

Summary: The prehistory of quantum mechanics may be said to have started in the beginning of the 19th century when the atom concept of the modern era was born and began to develop. In the paper we follow its interesting history. Around 1900 people realized that the atom is not a homogeneous sphere but rather composed in a certain manner from electrons and a nucleus. In the same period it turned out that important phenomena in black body radiation and in the photoelectric effect could not be understood except by assuming some kind of quantization and particle nature of electromagnetic radiation. The atom model of Bohr from 1913 tied together many threads from this development and can be said to have finished the first stage in the growing up of quantum mechanics. In the second stage quantum mechanics grew further in the hands of people like Heisenberg and Schrödinger to become a full-fledged theory in the form we still know it at the present day – later acquiring a seminal status in various kinds of high-tech in modern society. – This story is roughly surveyed in the paper and discussed from the point of view of the history and philosophy of science.

Um höfundinn: Þorsteinn Vilhjálmsson er prófessor við raunvísindadeild Háskóla Íslands í eðlisfræði með vísindasögu sem rannsóknasvið.

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

Móttekin: 09.12.09

¹⁷ Þorsteinn Vilhjálmsson, 1987, 173.