

Albert Einstein og greinar hans frá 1905

Einar H. Guðmundsson
Raunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 3, 101 Reykjavík

Maður tuttugustu aldarinnar

Albert Einstein (1879–1955) er tvímælalaust einn merkasti vísindamaður allra tíma. Jafnframt er hann einn þekktasti einstaklingur sögunnar og má í því sambandi nefna að í árslok 1999 valdi bandaríska tímaritið *TIME* hann mann tuttugustu aldarinnar. Þá hafa verið ritaðar hundruðir bóka og þúsundir tímaritsgreina og bókakaflla um Einstein og verk hans. Vísindalegar niðurstöður hans eru fyrir löngu orðnar sameign alls mannkyns og eðlisfræði nútímans er að verulegu leyti mótuð af kenningum hans, aðferðum og hugmyndafræði [1, 2, 6].

Árið 2005 er þess minnst að hundrað ár eru liðin frá því Einstein birti nokkrar vísindaritgerðir, sem áttu eftir að hafa afgerandi áhrif á hugmyndir manna um eðli rúms og tíma, ljóss og efnis. Þær ollu þáttaskilum í þróun eðlisfræðinnar á tuttugustu öld.

Einstein varð 26 ára hinn 14. mars árið 1905. Þrátt fyrir að hann hefði þá þegar birt nokkrar greinar um rannsóknir sínar í varmafræði og safneðlisfræði, hafði hann ekki enn hlotið doktorsnafnbót og var nær óþekktur í heimi eðlisfræðinnar. Hann starfaði ekki við háskóla heldur vann sem sérfræðingur við svissnesku einkaleyfisstofnunina í Bern. Tímamótageinarnar frá 1905 voru því að mestu unnar í hjáverkum, þótt aðdragandinn að þeim flestum hafi verið talsverður.

Fyrsta greinin fjallar um hina þekktu kenningu Einsteins um ljósskammta, sem hann beitir meðal annars til þess að útskýra svokallað ljósraffos. Fyrir hana hlaut hann Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði árið 1921. Næst koma tvær greinar þar sem hann notar safneðlisfræði og atómkenningu til þess að ákvarða Avogadrostölu og stærð sameinda. Sú fyrri var doktorsritgerð hans við Háskólann í Zürich. Í seinni greininni útskýrir hann svokallaða Browns–hreyfingu. Síðast en ekki síst eru svo greinarnar tvær um takmörkuðu afstæðiskenninguna, hinar nýju hugmyndir Einsteins um eðli rúms og tíma. Í seinni greininni leiðir hann út formúluna $E = mc^2$.

Einstein varð smám saman þekktur meðal eðlisfræðinga fyrir hugmyndir sínar. Hann hóf háskólakennslu í Bern árið 1908, varð síðan prófessor, fyrst í Zürich 1909, þá í Prag 1911 og aftur í Zürich 1912. Árið 1914 tók hann svo við stöðu prófessors án kennsluskyldu við þrússnesku vísindaakademíuna í Berlín. Þar lagði hann lokahönd á það meistaraverk sem gengur undir nafninu almenna afstæðiskenningin. Hann birti sviðsjöfnur sínar fyrir þyngdarsviðið ásamt nokkrum lausnum á þeim í árslok 1915 og í byrjun næsta árs kom út eftir hann vönduð yfirlitsgrein um kenninguna.



Mynd 1: Albert Einstein ásamt konu sinni Milevu og syninum Hans Albert árið 1904

Á næstu árum beitti Einstein almennu afstæðiskenningunni á snilldarlegan hátt til þess að segja fyrir um ýmis fyrirbæri sem nú eru viðfangsefni mikilvægra rannsókna í eðlisfræði og heimsfræði. Þar má til dæmis nefna þyngdargeislun, þyngdarlinsur og heimsfasta (hulduorku).

Þó að sérstakur ljómi stafi af afrekum Einsteins árin 1905 og 1915 þá er vert að hafa í huga önnur framlög hans til eðlisfræðinnar. Hann stundaði meðal annars mikilvægar rannsóknir á undirstöðum safneðlisfræði og geislunarfræði og útskýrði til dæmis svokallaða óþal-ljómun. Þá beitti hann fyrstur manna skammtakenningu til að reikna út eðlisvarma fastra efna við lágt hitastig og einnig líkindi þess að ákveðnar breytingar verði á orkuástandi skammtakerfa. Rannsóknir hans á undirstöðum skammtafræðinnar, meðal annars í skoðanaskiptum við Niels Bohr, skiptu sköpum fyrir skilning manna á þeirri merku kenningu og ýmsar hugmyndir hans á því sviði eru enn til umræðu meðal fræðimanna. Til marks um framlag Einsteins til annarra sviða eðlisfræðinnar en afstæðiskenningarinnar má nefna að í kennslubókum um skammtafræði, safneðlisfræði og eðlisfræði þéttefnis er nafn hans tengt ýmsum mikilvægum fyrirbærum, svo sem *Einstein–Podolsky–Rosen (EPR) þversögninni*, *Einstein–de Haas hrifum*, *Einstein–stuðlum*, *Einstein–hitastigi*, *Bose–Einstein dreifingu* og *Bose–Einstein þéttingu*.

Í árslok 1932 yfirgaf Einstein Þýskaland vegna uppgangs nazista. Hann settist að í Princeton í Bandaríkjunum þar sem hann bjó til æviloka og starfaði sem prófessor án kennsluskyldu við fræðasetrið Institute for Advanced Study. Seinni hluta ævinnar

vann hann ötullega að því að búa til sviðskenningu er gæfi sameinaða lýsingu á þyngdarafli og rafsegulfræði. Von hans var sú, að slík kenning myndi á endanum gefa fullnægjandi lýsingu á eiginleikum efnis og orku og útskýra skammtaeiginleika þessara fyrirbæra. Þótt honum tækist ekki þetta ætlunarverk sitt, lifir draumur hans um allsherjarkenningu enn góðu lífi, einkum í tengslum við svonefnda strengjafræði.

Sú saga hefur gengið um Einstein að með árunum hafi hann gerst mjög íhaldsamur og jafnvel ellíær, honum hafi til dæmis ekki tekist að skilja skammtafræðina og því snúist gegn henni. Eins og í mörgum frásögnum af þessu tagi er hér farið afar frjállega með sannleikann og raunveruleikinn er mun flóknari.

Staðreyndin er sú að Einstein varð fyrstur manna til þess að taka skammtahugtakið alvarlega. Það var í greininni um ljósskammtana árið 1905. Á árunum þar á eftir átti hann einnig verulegan þátt í því að móta hugmyndir hinnar nýju skammtakenningar, sem með tímanum varð að skammtafræði í höndum manna eins og N. Bohrs, W. Heisenbergs, E. Schrödingers, M. Borns, P. Jordans, W. Paulis, P.A.M. Diracs og fleiri. Einstein varð einnig fyrstur til þess að beita aðferðum líkindafræðinnar í skammtakenningunni. Hins vegar sætti hann sig aldrei við afleiðingarnar eins og þær birtust í óvissulögmáli Heisenbergs og líkindatúlkun Borns á bylgjufallinu. Hann taldi þær leiða til innri mótsagna í kenningunni, til dæmis fannst honum nauðsynlegt að halda í orsakalögmálið, sem væri sniðgengið í lýsingu skammtafræðinnar á tilviljanakenndum breytingum. Þá leit hann svo á að skammtafræðin væri ófullgerð kenning, hún gengi alls ekki nógu langt og gæti því ekki verið hin endanlega lýsing á raunheimi. Í þeim efnum má segja að hann hafi viljað kafa dýpra en yngri mennirnir. Mikilvægt er að hafa í huga að þetta var eitt af þeim vandamálum sem hann var að reyna að leysa í leit sinni að sameinaðri sviðskenningu. Hitt er svo önnur saga, að þróun eðlisfræðinnar á tuttugustu öld bendir til þess að Einstein hafi sennilega haft rangt fyrir sér í þessu efni.

Greinar Einsteins frá 1905

Ritsmíðar Einsteins frá 1905 eru fimm að tölu. Þær birtust allar í þýska tímaritinu *Annalen der Physik*, þar á meðal doktorsritgerðin, sem reyndar kom einnig út sérprentuð. Þar sem allar greinarnar er að finna á frummálinu hjá [3] og í nýrri enskri þýðingu hjá [4], er ekki hirt um það hér að gefa upp blaðsíðutal þeirra í *Annalen der Physik*. Hins vegar er þess getið hvenær greinarnar voru tilbúnar frá hendi höfundar.

Til þess að einfalda umfjöllunina verður ekki farið ítarlega í aðferðir eða röksemdafærslur Einsteins. Í staðinn er reynt að skýra lauslega frá helstu forsendum og niðurstöðum. Byrjað verður á kenningu Einsteins um ljósskammta eða ljóseindir. Þá verður rætt um það efni er tengist atómkenningunni og loks um greinarnar tvær um takmörkuðu afstæðiskenninguna. Þeim sem vilja kafa dýpra í efni þessara merku ritsmíða er bent á [3] eða [4].

Skammtakenningin

Premur dögum eftir 26 ára afmælið lauk Einstein við þá ritsmíð sem hann taldi sjálfur vera byltingakenndasta framlag sitt til eðlisfræðinnar. Það var greinin um ljósskammtana, „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ (Ný sýn á sköpun og ummyndun ljóss; 17. mars 1905), sem hann hlaut Nóbelsverðlaunin fyrir árið 1921.

Einstein byrjar á því að minna lesendur á þá staðreynd að rafsegulfræði Maxwells, sem grundvölluð sé á bylgjueiginleikum rafsegulgeislunar og samfelldri dreifingu rafsegulorku, geti ekki útskýrt alla mælanlega eiginleika slíkrar geislunar. Hann nefnir sérstaklega svarthlutargeislun, flúrljómun og myndun bakskaupsgeisla með útbláu ljósi. Einnig bendir hann á, að forsendan um samfellda orkudreifingu stangist á við hugmyndir samtímans um að orka hluta sé summan af orku hins endanlega fjölda frumagna sem hlutirnir eru samsettir úr. Hann setur síðan fram þá tilgátu, að þegar ljós breiðist út frá punktlind dreifist orkan ekki með samfelldum hætti um sívaxandi rúmmál, heldur sé hún bundin í endanlegum fjölda strjálra orkuskammta. Þessir skammtar myndist sem sjálfstæðar einingar og verði aðeins gleyptir í heilu lagi. Einstein rökstyður tilgátuna með því að sýna fram á að formúlan fyrir óreiðu geislunar með ákveðna (og tiltölulega háa) tíðni sé eins og formúlan fyrir óreiðu kjörgass. Hann dregur þá ályktun, að geislun með tíðni ν hegði sér í varmafræðilegum skilningi eins og hún sé samsett úr óháðum og frjálsum orkuskömmtum með orku $h\nu$, þar sem h er Plancksstuðull. Í greininni studdist Einstein við niðurstöður M. Plancks frá 1900, en rétt er að hafa í huga, að á sínum tíma innleiddi Planck orkuskammtana eingöngu sem stærðfræðilega brellu til að fá fram niðurstöðu sem gæti staðist. Tilgangur hans var sá einn að leiða út formúluna, sem tilraunaeðlisfræðingar höfðu áður fundið með mælingum og lýsir styrk rafsegulgeislunar frá svarthlut sem falli af tíðni. Svo virðist sem Planck hafi aldrei trúað því að orkuskammtarnir væru raunverulegir.

Það gerði Einstein hins vegar, og í greininni frá 1905 notar hann ljósskammtana til þess að útskýra ýmislegt sem sígild eðlisfræði ræður ekki við. Þar er um að ræða fyrirbæri eins og flúrljómun, röfun gass með útbláu ljósi og ljósrafflos.

Þar sem Einstein varð fyrstur til þess að taka skammtahugtakið alvarlega, virðist sanngjarnt að líta svo á að hann og Planck séu báðir upphafsmenn skammtakenningarinnar. Gagnstætt Planck beitti Einstein kenningunni oft til lausnar á eðlisfræðilegum vandamálum og hann átti einnig verulegan þátt í því að móta hugmyndafræði kenningarinnar á árunum eftir 1905. Það er hins vegar athyglisvert að tilgáta hans um ljósskammta átti lengi örðugt uppdráttar og jafnvel Niels Bohr var ósáttur við hugmyndina, allt þar til bandaríski tilraunaeðlisfræðingurinn A. Compton sýndi fram á tilvist ljóseinda með óyggjandi hætti árið 1923. Í lokin er rétt að minna á, að enska orðið photon (ljóseind) birtist fyrst á prenti árið 1926. Höfundur þess var bandaríski eðlisefnafræðingurinn G.N. Lewis.

Safneðlisfræði og atómkenning

Í doktorsritgerð sinni „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“ (Ný ákvörðun á stærð sameinda) frá 30. apríl 1905 mótar Einstein tölfræðilega kenningu um vökva sem samsettir eru úr sameindum. Um er að ræða útvíkkun á kvikfræði gasa sem tengist atómkenningunni. Með því að beita kenningunni ásamt sígildri vökvafræði leiðir Einstein út formúlur, er tengja Avogadrostölu og stærð vökvasameinda við mælanlegar stærðir eins og seigjustuðul og sveimstuðul vökvans. Þó að þessar niðurstöður hafi fallið talsvert í skugga annarra afreka Einsteins árið 1905, að minnsta kosti í almennri umfjöllun um verk hans, þá eru þær ekki aðeins mikilvægur stuðningur við atómkenninguna, heldur má beita aðferðum hans á mörgum öðrum sviðum. Þar ber hæst ýmsar tæknilegar hagnýtingar, til dæmis í steypuðnaði, mjólkuriðnaði og mengunarrannsóknum. Þetta hagnýta gildi doktorsritgerðarinnar gerir það að verkum að oftast er í hana vitnað í vísinda- og tækniritum en allar aðrar ritsmíðar Einsteins.

Ellefu dögum eftir að Einstein lagði fram doktorsritgerðina lauk hann við hina frægu grein sína „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ (Um hreyfingu lítilla agna í kyrrstæðum vökvum samkvæmt kvikfræði sameinda; 11. maí 1905). Greinin er að hluta byggð á þeim grunni sem lagður er í doktorsritgerðinni, en Einstein beitir jafnframt ferskum aðferðum til þess leiða út nýjar sem gamlar niðurstöður, meðal annars um sveim og seigju. Þá kannar hann hvaða áhrif varmahreyfing sameinda í kyrrstæðum vökva hefur á stöðu kúlulaga agna í vökvunum, ef agnirnar eru umtalsvert stærri en sameindirnar. Niðurstaða hans er sú, að vegna árekstra sameindanna við agnirnar hrekist agnirnar um vökvann með tilviljanakenndum hætti á svokallaðri slembigöngu. Í lokin leiðir Einstein út formúlu, sem tengir meðalfjarlægð dæmigerðrar agnar frá upphafsstað sínum við hitastig vökvans, seigjustuðul hans, stærð sameindanna, gasstuðulinn, Avogadrostölu og ferðatíma agnarinnar. Ef agnirnar eru sýnilegar, til dæmis í smásjá, þannig að hægt sé að fylgjast með hreyfingu þeirra, má því á einfaldan hátt reikna út stærð sameindanna, að því gefnu að hinar stærðirnar séu þekktar. Þessi niðurstaða útskýrir meðal annars hina óreglulegu hreyfingu frjókorna í vatni sem skoski grasafraðingurinn R. Brown uppgötvaði fyrstur manna árið 1827 og er við hann kennd. Þarna er jafnframt komin tiltölulega einföld aðferð til þess að sýna fram á tilvist sameinda og þar með atóma. Mælingar leiddu fljótlega í ljós að aðferðafræði Einsteins var rétt og niðurstaðan reyndist í fullu samræmi við atómkenninguna. Síðar skrifaði hann fleiri greinar um þetta efni og almennt er talið að það hafi fyrst og fremst verið umfjöllun hans um Browns-hreyfingu sem á endanum sannfærði flesta vísindamenn um tilvist og stærð atóma.

Takmarkaða afstæðiskenningin

Takmarkaða afstæðiskenningin varð til vegna örðugleika sem upp komu í lok nítjándu aldar, þegar ljóst varð að rafsegulfræði Maxwells og affræði Newtons voru ósamrýmanlegar kenningar. Margir merkir vísindamenn glímdu við lausn þessa erfiða vandamáls, meðal annars hollenski eðlisfræðingurinn H.A. Lorentz og franskir stærðfræðingurinn H. Poincaré. Þeir settu báðir fram stærðfræðilega lýsingu á því hvað gera þyrfti til þess að leysa vandann. Hins vegar skorti þá fullnægjandi eðlisfræðileg rök fyrir hugmyndum sínum og báðir héldu þeir fast í ljósvakann, ímyndað burðarefni rafsegulbylgna, sem þyrfti að fylla rúmið til þess að ekki kæmu fram mótsagnir við affræði Newtons.

Í einni frægustu grein vísindasögunnar, „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Um rafsegulfræði hluta á hreyfingu; 30. júní 1905), leysti Einstein vandann með því að afneita tilvist algilds tíma og algilds rúms, sem eru grunnforsendur í affræði Newtons. Hann setti þar fram nýja kenningu, sem við köllum nú takmörkuðu afstæðiskenninguna. Kenningin hvílir öll á tveimur forsendum. Annars vegar er hið svokallaða afstæðislögmál, sem þekkt hafði verið frá dögum Galíleís og segir að lögmál eðlisfræðinnar hafi sama form í öllum tregðukerfum. Hin forsendan var algjörlega ný og svo framandi að það tók marga eðlisfræðinga langan tíma að setta sig við hana. Hún segir að hraði ljóss (rafsegulbylgna) í tómi sé óháður hreyfingarástandi ljósgjafans.

Með því að ganga út frá þessum tveimur forsendum í greininni tekur Einstein fyrir samtímahugtakið og sýnir fram á, að bæði lengd og tími eru afstæð hugtök. Hugmyndin um ljósvakann er í mótsögn við forsendurnar og hann er því ekki hluti af kenningunni. Formúlurnar fyrir lengdarsamdrátt og tímaþan eru leiddar út og einnig hin svokallaða Lorentz–ummyndun og sýnt að Maxwelljöfnurnar halda formi sínu við slíka vörpun. Einstein fjallar um ljósvillu og Dopplervik og minnst á það fyrirbæri sem nú er stundum kallað „tvíburarþversögnin“. Í stuttu máli sagt tekur hann fyrir flest þau atriði sem nú er rætt um í kennslubókum um takmörkuðu afstæðiskenninguna fyrir byrjendur. Formúlan $E = mc^2$ er þó undanskilin. Þá niðurstöðu birti Einstein tæpum þremur mánuðum síðar í greininni „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ (Er tregða hlutar háð orkuinnihaldi hans?; 27. september 1905).

Hér gefst ekki tækifæri til að fara nánar í takmörkuðu afstæðiskenninguna eða sögu hennar. Þó er rétt að ítreka, að samkvæmt kenningunni stendur rafsegulfræði Maxwells eftir óbreytt. Hins vegar reynast hugmyndir Newtons ekki fullnægjandi þegar um affræði er að ræða. Þetta hefur verið sannreynt í fjölda tilrauna, sem sýna yfirburði afstæðiskenningarinnar. Í þessu sambandi er þó vert að hafa í huga að takmarkaða afstæðiskenningin gefur því sem næst sömu niðurstöður og affræði Newtons ef hraði þeirra hluta, sem til athugunar eru hverju sinni, er lítill miðað við

ljóshraðann. Veruleg frávík verða ekki fyrr en hraðinn fer að nálgast ljóshraðann og er þá oft talað um afstæðilegan hraða og afstæðileg hrif.

Þrátt fyrir byltingakenndar hugmyndir hvílir takmarkaða afstæðiskenningin á sígildum grunni. Þar má til dæmis nefna rafsegulfræði Maxwells. Það er því skemmtilegt umhugsunarefni, að aðeins þremur og hálfum mánuði áður en kenningin var birt setti Einstein fram tilgátu sína um ljósskammta, en hún gengur í berhögg við sígilda rafsegulfræði sem gerir ráð fyrir að ljós sé bylgjuhreyfing. Það er því nokkuð ljóst að hugmyndin um tvíeðli ljóssins, sem hafði veruleg áhrif á þróun skammtakenningarinnar, er í rauninni falin í greinum Einsteins frá 1905.

Að lokum er rétt að minna á, að hugmyndin um hið fjórvíða tímarúm afstæðiskenningarinnar er ekki frá Einstein komin. Höfundur hennar er þýski stærðfræðingnum H. Minkowski, sem kynnti hana í frægum fyrirlestri um rúm og tíma árið 1908 (sjá nánar hjá [5]). Í fyrstu var Einstein ekkert sérlega hrifinn af framsetningu Minkowskis og taldi hana óþarflega stærðfræðilega. Hann skipti þó um skoðun þegar hann fór að vinna fyrir alvöru að almennu afstæðiskenningunni og í ljós kom að þar var tímarúmshugtakið ómissandi.

Heimildir

- [1] Pais, A.: *‘Subtle is the Lord ...’: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford 1982.
- [2] Holton, G. & Elkana, Y. ritstj.: *Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives*. Princeton 1982. Endurútgefin hjá Dover 1997.
- [3] Einstein, A.: *The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 2. The Swiss Years: Writings, 1900–1909*. Ritstj.: Stachel, J. og fl. Princeton 1989.
- [4] Stachel, J. ritstj.: *Einstein’s Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Princeton 1998.
- [5] Einar H. Guðmundsson & Skúli Sigurðsson: Eðli rúms og tíma: Ólafur Dan Daníelsson og greinar hans um afstæðiskenninguna. Handrit sent tímaritinu *RAUST* til birtingar, febrúar 2005.
- [6] Vefsíður með ýmsum upplýsingum um Einstein og verk hans:
<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Mathematicians/Einstein.html>;
<http://www.alberteinstein.info/>; <http://www.einstein.caltech.edu/>.

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