

Fysikaalisen maailmankuvan kehitys

Reijo Rasinkangas

22. lokakuuta 2009

Kirjoittaja varaa tekijänoikeudet tekstiin ja kuviin itselleen; muuten työ on kenen tahansa vapaasti käytettävissä sekä opiskelussa että opetuksessa. Oulun yliopiston Fysikaalisten tieteiden laitoksen käyttöön teksti on täysin vapaata.

Esipuhe

Fysikaalinen maailmankuva pitää sisällään käsityksemme ympäröivästä maailmasta, maailmankaikkeuden olemuksesta aineen pienimpiin rakenneosiin ja niiden vuorovaikutuksiin. Kun vielä kurkotamme maailmankaikkeuden alkun, näitä ääripäitä, kosmologiaa ja kvanttimekaniikkaa, ei enää voi erottaa toisistaan; tässä syy miksi fyysikot tavoittelevat — hieman mahtipontisesti mutta eivät aivan syyttä — ’kaiken teoriaa’.

Tämä johdanto fysikaaliseen maailmankuvaan etenee lähes kronologisessa järjestyksessä. Aluksi tutustumme lyhyesti kehitykseen ennen antiikin aikaa. Sen jälkeen antiikille ja keskiajalle (johon renessanssikin kuuluu) on omat lukunsa. Uudelta ajalta alkaen materiaali on jaettu aikakausien päätutkimusaiheiden mukaan lukuihin, jotka ovat osittain ajallisesti päällekkäisiä. Liitteissä esitellään mm. muutamia tieteenfilosofisia käsitteitä.

Fysiikka tutkii luonnon perusvoimia eli -vuorovaikutuksia, niitä hallitsevia lakeja sekä niiden välittömiä seurauksia. ’Puhtaan’ fysiikan lisäksi tässä käsitellään lyhyesti myös muita tieteenaloja. Tähtitiede on melko hyvin edustettuna, koska sen kehitys on liittynyt läheisesti fysiikan kehitykseen (toisaalta jo käytetty lukujako estää kunnollisen tähtitieteen historian esityksen tässä työssä). Alkuaineista ja elektronien luomista kemiallisista sidoksista puhuttaessa kyse on tietenkin enemmän kemiasta kuin fysiikasta; sen mukanaolo auttaa kuitenkin ymmärtämään myös fysiikan kehityksen taustoja. Matematiikkaa on esitetty varsin rajoitetusti, mutta joitain suuria nimiä etenkin antiikista ja keskiajalta on nostettu esiin. Koska fysiikan teoriat ovat matemaattisia malleja, ilman matematiikkaa ei olisi fysiikkaakaan. Geofysiikka taas on sen verran erillinen alue, että siihen viitataan vain satunnaisesti. Samoin biofysiikan esitys jää yhteen mainintaan. (Fysiikan eri osa-alueiden kehityksestä olisikin kiinnostavaa nähdä vastaavanlaisia, erillisiä lyhyitä esityksiä; sopivia otsikoita olisivat esim. Avaruusfysiikka, Spektroskopia, jne.)

Rakenteellisesti kehitystä seurataan tärkeiden tutkijoiden työn kautta. On kuitenkin huomattava, että kyse ei ole varsinaisesta historiikista, vaan tavasta esittää fysikaalisten tieteiden *ideoiden* kehitys mahdollisimman selkeässä ja kompaktissa muodossa. Materiaalia voi lähestyä aluksi kursorisella lukemisella; yleiskuvan hahmottuessa voi käydä myös yksityiskohtien kimppuun. *Todella* lyhyt oppimäärä aiheesta voitaisiin kiteyttää seuraaviin nimiin:

ARKHIMEDES (n. 287-212 eaa.) – Historian ensimmäinen fyysikko. NEWTON (1642-1727) – Nk. klassisen fysiikan perustaja mekaniikan laeillaan ja gravitaatioteoriallaan. MAXWELL (1831-1879) – Modernin fysiikan alku sähkömagneettisen säteilyn keksimisen myötä; vaikutti myös kineettisen teorian syntyyn. EINSTEIN (1879-1955) – Kvanttimekaniikan alkuvaiheen pioneeri ja suhteellisuusteorioiden kehittäjä. FEYNMAN (1918-1988) – Ensimmäisen kvanttikenttäteorian luoja. WEINBERG (s. 1933) – Ensimmäisen luonnon perusvuorovaikutuksia yhdistelleen teorian luoja.

Itse teksti antaa kuitenkin paremman kuvan siitä, miten fysikaalisten tieteiden kehitys ei ole ollut kiinni yksittäisten 'sankareiden' vallankumouksellisesta työstä, vaan on kumuloituvaa ymmärrystä todellisesta maailmasta.

Reijo Rasinkangas

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Antiikki	3
2.1	Thales (n. 624-546 eaa.)	3
2.2	Pythagoras (n. 580-500 eaa.)	4
2.3	Anaksagoras (n. 500-428 eaa.)	5
2.4	Empedokles (n. 483-423 eaa.)	5
2.5	Demokritos (n. 460-370 eaa.)	5
2.6	Platon (n. 427-347 eaa.)	6
2.7	Eudoksos (n. 390-335 eaa.)	6
2.8	Aristoteles (n. 384-322 eaa.)	6
2.9	Eukleides (n. 300 eaa.)	8
2.10	Aristarkhos (n. 310-250 eaa.)	9
2.11	Arkhimedes (n. 287-212 eaa.)	9
2.12	Eratosthenes (n. 275-194 eaa.)	10
2.13	Apollonios (n. 262 - 190 eaa.)	11
2.14	Hipparkhos (n. 190-120 eaa.)	12
2.15	Geminus (n. 50 eaa.)	13
2.16	Heron (n. 61 - 150)	13
2.17	Ptolemaios (n. 100-170)	13
2.18	Diofantos (200-luvulla)	14
2.19	Hypatia (370-415)	14
3	Keskiaika	15
3.1	Aryabhata (n. 476-550)	15
3.2	Brahmagupta (n. 625)	16
3.3	al-Khwarizmi (n. 780-844)	16
3.4	Alhazen (n. 965-1039)	16
3.5	Fibonacci (n. 1180-1250)	16
3.6	Peregrinus (n. 1250)	17
3.7	Bacon (n. 1214-1294)	17
3.8	Ockham (n. 1285-1349)	17
3.9	Oresme (n. 1323-1382)	18

3.10	Kopernikus (1473-1543)	19
3.11	Brahe (1546-1601)	20
3.12	Gilbert (1544-1603)	21
4	Mekaniikka	23
4.1	Galilei (1564-1642)	23
4.2	Kepler (1571-1630)	25
4.3	Huygens (1629-1695)	26
4.4	Newton (1642-1727)	27
4.5	Halley (1656-1742)	30
4.6	Kant (1724-1804)	31
4.7	Lagrange (1736-1813)	32
4.8	Cavendish (1731-1810)	32
4.9	Herschel (1738-1822)	33
4.10	Laplace (1749-1827)	34
5	Alkuaineet	35
5.1	Helmont (1577-1644)	35
5.2	Pascal (1623-1662)	35
5.3	Boyle (1627-1691)	36
5.4	Hales (1677-1761)	37
5.5	Priestley (1733-1804)	37
5.6	Lavoisier (1743-1794)	37
5.7	Dalton (1766-1844)	38
5.8	Gay-Lussac (1778-1850)	38
5.9	Berzelius (1779-1848)	39
5.10	Mendelejev (1834-1907)	40
6	Sähkö	43
6.1	Franklin (1706-1790)	43
6.2	Coulomb (1736-1806)	44
6.3	Volta (1745-1827)	44
6.4	Gauss (1777-1855)	44
6.5	Ørsted (1777-1851)	45
6.6	Ampère (1775-1836)	45
6.7	Ohm (1787-1854)	46
6.8	Faraday (1791-1867)	46
6.9	Henry (1797-1878)	47
7	Kineettinen teoria	49
7.1	Bernoulli (1700-1782)	49
7.2	Black (1728-1799)	50
7.3	Thompson (1753-1814)	50
7.4	Fourier (1768-1830)	51

7.5	Carnot (1796-1832)	51
7.6	Joule (1818-1889)	52
7.7	Clausius (1822-1888)	52
7.8	Boltzmann (1844-1906)	54
8	Sähkömagneettinen säteily	57
8.1	Rømer (1644-1710)	57
8.2	Young (1773-1829) ja Fresnel (1788-1827)	58
8.3	Biot (1774-1862)	59
8.4	Fraunhofer (1787-1826)	59
8.5	Doppler (1803-1853)	59
8.6	Kirchhoff (1824-1887)	60
8.7	Maxwell (1831-1879)	61
8.8	Rayleigh (1842-1919)	63
8.9	Michelson (1852-1931)	64
8.10	Hertz (1857-1894)	64
8.11	Röntgen (1845-1923)	65
8.12	Planck (1858-1947)	65
8.13	W. H. (1862-1942) ja W. L. (1890-1971) Bragg	66
9	Aineen hienorakenne	67
9.1	Kekulé (1829-1896)	68
9.2	Arrhenius (1859-1927)	68
9.3	Thomson (1856-1940)	69
9.4	Zeeman (1865-1943)	70
9.5	M. (1867-1934) ja P. (1859-1906) Curie	71
9.6	Rutherford (1871-1937)	72
9.7	Bohr (1885-1962)	76
9.8	Lewis (1875-1946)	78
9.9	Uhlenbeck (1900-88) ja Goudsmit (1902-78)	78
9.10	Fermi (1901-1954)	79
10	Kvanttimekaniikka ja suhteellisuusteoria	83
10.1	Einstein (1879-1955)	83
10.2	Heisenberg (1901-1976) ja Schrödinger (1887-1961)	88
10.3	Dirac (1902-1984)	89
10.4	Pauling (1901-1994)	90
11	Tähdet ja kosmologia	93
11.1	Eddington (1882-1944)	93
11.2	Hubble (1889-1953)	94
11.3	Langmuir (1881-1957)	95
11.4	Bethe (s. 1906)	96
11.5	Gamow (1904-1968)	96

11.6	Hoyle (1915-2001)	98
11.7	Penrose (s. 1931) ja Hawking (s. 1942)	99
11.8	Guth (s. 1945) ja Linde	100
12	Kaiken teoria	103
12.1	Feynman (1918-1988)	103
12.2	Gell-Mann (s. 1929)	104
12.3	Weinberg (s. 1933)	105
12.4	Green (s. 1946) ja Schwartz (s. 1941)	107
12.5	Witten (s. 1951)	107
A	Luonnontieteiden filosofia	109
A.1	Tiede, maailmankuva ja filosofia	109
A.2	Estetiikka	109
A.3	Etiikka	110
A.4	Metafysiikka	110
A.5	Tietoteoria	111
A.6	Totuus	112
A.7	Teorianmuodostus	114
B	Tieteentutkimuksesta	117
B.1	Tieteen eetos	118
B.2	Tieteellinen keksiminen	119
B.3	Tieteellinen realismi ja totuus	119
B.4	Determinismi ja kausaalisuus	120
B.5	Reduktionismi ja materialismin lajit	121
B.6	Tieteiden ykseys	123
C	Tiedonhankinnan kyselymalli	125
C.1	Kyselymallin rakenne	126
C.2	Taustaoletukset	126
C.3	Induktio ja <i>a priori</i> -tieto	127
C.4	Informaatio, tieto ja totuus	128
C.5	Kyselymallin merkitys	129
C.6	Lähteet	130
D	Fysiikan osa-alueet ja mittakaavat	133
E	Fysiikan perussuureet	135
F	Fysiikan perusvakiot	137

Luku 1

Johdanto

Kivikausi alkoi ihmiskunnan historiassa, kun esi-isämme *homo habilis* oppi kivien käytön työkaluna n. kaksi miljoonaa vuotta sitten. Noin 700 000 vuotta sitten *homo erectus* otti käyttöön tulen, jolla oli merkitystä lämmön antajana ja suojana eläimiä vastaan. Se sai myös tärkeän osan ruuanvalmistuksessa, ja voidaan puhua alkeellisesta kemiasta. Nykyihminen kehittyi n. 200 000 vuotta sitten.

Vakavampi luonnon tarjoamien mahdollisuuksien hyötykäyttö alkoi metallien myötä. Kuparin käyttö alkoi Lähi-idässä noin 8000 eaa., suunnilleen samaan aikaan maanviljelyn alun ja kaupunkien synnyn kanssa. Pronssikausi alkoi vasta kun tinaa opittiin lisäämään kupariin, mikä tapahtui Kreetalla n. 2300 eaa. Metallurgia oli syntynyt, ja seuraava vaihe oli raudan valmistus, Kreikassa n. 1000 eaa. alkaen; tämä osoitti jo suurta tulen käytön taitoa. Kuten mihin tahansa inhimilliseen toimintaan, metalleihin liitettiin erilaisia uskomuksia. Niiden esimerkiksi uskottiin kasvavan ja kehittyvän arvokkaammiksi maaperässä. Tämä liittyi myös alkemiaan, jossa esim. uskottiin mahdolliseksi nopeuttaa keinotekoisesti vähäarvoisten metallien muuntumista kullaksi.

Tiettyjen aineiden, esim. magneettisen malmin (magnetiitti, Fe_3O_4) ja meripihkan (kreik. *elektron*), erikoisominaisuudet tunnettiin jo varhain (meripihka on fossilisoitunutta puun mahlaa, joka tuottaa staattista sähköä karvalla hangatessa). Nämä uteliaisuuden kohteet olivat kuitenkin tieteen ulottumattomissa vielä vuosituhansia, ja antoisampi tutkimuskohde löytyi taivaalta, josta oli kiintotähtien lisäksi tunnistettu seitsemän merkittävintä Aurinkokuntamme taivaankappaletta, Aurinko, Kuu, Mars, Merkurius, Jupiter, Venus ja Saturnus. Ne liitettiin usein perusmetalleihin kulta, hopea, rauta, elohopea, tina, kupari ja lyijy; jälleen osoitus halusta etsiä syvempiä 'totuuksia' paljaiden havaintojen takaa. Planeettoja käytettiin jo varhain ennustusten apuna, astrologiaan. Niiden säännönmukaista käyttäytymistä saattoi kuitenkin käyttää muutenkin hyväksi, esim. ajanlaskun apuna, ja tämä liitti ne yhteen matematiikan kehityksen kanssa.

Muinaiset babylonialaiset ja egyptiläiset vaikuttivat suuresti kreikkalaisen kulttuurin kehitykseen. Babylonialaisten tiedetään esim. piirtäneen karttoja jo 2300 eaa., ja egyptiläiset tunsivat aurinkokellon jo 1500 eaa. Babylonialaiset tunsivat myös nk. Saros-jakson, jonka avulla auringonpimennykset voitiin ennustaa aikaisempien auringon- ja kuunpimennysten keskinäisestä järjestyksestä. Myös matematiikka oli näissä keskuksissa kehittynyttä; esim. nk. Pythagoraan teoreema oli Babyloniassa tunnettu jo pitkään ennen kreikkalaista keksintöä. Luvulle π babylonialaiset tunsivat arvon $3\frac{1}{8}$ (3,125) jo 2000 eaa. (*Vanha Testamentti* tuntee likiarvon 3). Myös kiinalainen matematiikka oli kehittynyttä ja olisi muuttanut historian kulkua, jos olisi saavuttanut antiikin Kreikan. Tästä huolimatta kreikkalaisten panos oli omaa luokkaansa sekä matematiikassa että tähtitieteessä, ja he ottivat myös ensimmäiset askeleet fysiikan tutkimuksessa.

Luku 2

Antiikki

Varsinainen tieteellinen ajattelu kehittyi antiikin Kreikassa. Kreikkalainen matematiikka, etenkin geometria, oli vertaansa vailla ja synnytti historian ensimmäisen aksiomaattisen järjestelmän. Tähtitieteilijät luokittelivat tähtiä ja määrittivät vuoden pituutta suurella tarkkuudella; edes Maapallon koon mittausta ei ollut heidän taitojensa ulottumattomissa. Luonnonfilosofit aloittivat rationalististen kosmogonioiden etsinnän ja Arkhimedes varsinaisen fysiikan tutkimuksen. Valitettavasti antiikin ajattelutapa ei arvostanut käytännön taitoja niin paljon, että fysiikan ja tekniikan saavutuksia olisi osattu hyödyntää ja tutkimus olisi ruokkinut itseään. Rooman kaudella alkanut rappio vei Euroopan varhaiskeskiajan pimeyteen (Luku 3).

2.1 Thales (n. 624-546 eaa.)

Thales oli ensimmäinen tunnettu luonnonfilosofi. Luonnonfilosofia pyrki löytämään kaiken alun, *arkhen*, ja korvaamaan myytit rationalistisella kosmologialla eli teorialla maailmankaikkeuden alkuperästä. Etenkin jonkinlaisen alkumateriaalin etsintä oli muodissa; Thalesin mukaan kaikki oli perimmältään vettä [ks. Empedokles].

Antiikin matematiikan ja tähtitieteen katsotaan alkaneen Thalesista, vaikka hänen teoksiaan ei ole säilynyt jälkipolville. Kreikkalaiset kehittivät babylonialaisten ja egyptiläisten vanhempaa matematiikkaa ja abstrahoivat sen loogiseen asuun määritelmän, aksiooman ja todistuksen kautta. Kreikkalaisten oman perinteen mukaan Thales ja Pythagoras tekivät tässä päätyön. Tähtitieteessä Thalesin nimi liitettiin vuoden pituuden määrittämiseen n. 365 päivään, ja hänen kerrotaan ennustaneen auringonpimennyksen ajankohdan. Hänestä tehtiin 'hajamielisen professorin' perikuva jo antiikin aikana, ja kaskun mukaan hän kuoli pudottuaan kaivoon tähtiä havainnoidessaan!

- Tosiasiassa vuoden pituus oli tunnettu jo pitkään. Sama koski tähtitieteilijä Metonin v. 432 eaa. uudelleen tekemää havaintoa Saros-jaksosta: 19 vuotta vastasi n. 235 kuunkiertoa [ks. Hipparkhos]. Meton teki havaintoja myös auringonpilkuista, joita kiinalaiset seurasivat tarkemmin n. 200 eaa. alkaen [ks. Galilei].

Luonnonfilosofinen ajattelu kukoisti etenkin Jooniassa; sivistyksen painopisteen siirtyessä Ateenaan [ks. Platon] filosofit siirtyivät luonnon pohdiskelusta ihmisen tutkimukseen. Thalesin ohella muita varhaisia luonnonfilosofoja olivat mm.

- Thalesin oppilas Anaksimandros (n. 610-546 eaa.), joka korvasi Thalesin perimmäisen veden abstraktilla äärettömän ajatuksella; se piti sisällään kaikki vastakohtaisuudet. Ideana oli, että perusaines ei voinut olla kuumaa, kuivaa, kylmää eikä märkää. Hän piirsi myös 'maailmankartan' [ks. Eratosthenes] ja kehitti aurinkokelloa.
- Edellisen oppilas Anaksimenes (n. 585-525 eaa.), jonka mukaan kaikki aine on eri tavoin harventunutta tai tiivistynyttä ilmaa. Hän myös kehitti materian ja energian säilymislakeja ("*Tyhjästä ei voi syntyä mitään*").
- Ksenofanes (n. 570-470 eaa.), joka Thalesin tapaan uskoi kaiken syntyneen vedestä.
- Herakleitos (n. 540 - 475 eaa.), jonka filosofiassa tulella oli merkittävä asema.

2.2 Pythagoras (n. 580-500 eaa.)

Pythagoras uskoi matematiikan olevan todellisuuden perustan [ks. Platon]; hänen sanotaan keksineen termit matematiikka ('*se mikä on opittua*') että filosofia ('*viisauden rakkaus*').

Pythagoras kehitti geometriaa ja havaitsi musiikin ja matematiikan välisen yhteyden. Lukuteoriassa hänen ryhmänsä keksi irrationaaliset luvut; jatkossa antiikki tulikin pitämään aritmetiikkaa jotensakin epäilyttävänä etenkin geometriaan verrattuna [ks. Eukleides; Diofantos].

- Rationaaliluvut ovat joko kokonaislukuja tai murtolukuja, so. positiivisten kokonaislukujen (nk. luonnollisten lukujen) osamääriä tyyliin a/b . Ne voidaan siis kuvata yksinkertaisen polynomiyhtälön $a - bx = 0$ juurina. Irrationaalilukuja (esim. $\sqrt{2}$ tai π eli ympyrän kehän suhde sen

halkaisijaan) ei voi esittää tällä tavalla. Rationaali- ja irrationaaliluvut muodostavat nk. reaalitylukujen joukon, joka jaettiin myöhemmin toisellakin tavalla, algebrallisiin lukuihin ja transsendentaalilukuihin. Edelliset ovat minkä tahansa polynomiyhtälön juuria, eli ne ovat paljon yleisempiä kuin rationaaliluvut. Jälkimmäisiä ei voi palauttaa polynomiyhtälöihin.

Pythagoras esitti Maan olevan pallon muotoisen [ks. Aristoteles].

- Maapallon pyöreyttä tukivat monet havainnot: **(1)** Tähtitaivas muuttuu matkustettaessa pohjois-eteläsuunnassa. **(2)** Loittonevasta laivasta katoaa ensin runko ja viimeiseksi maston huippu. **(3)** Kuunpimennyksen aikainen Maan varjo Kuun pinnalla on ympyränmuotoinen. **(4)** Aurinko ja Kuu ovat ympyränmuotoisia. Filosofisesti ottaen pallo on myös täydellinen symmetrinen kappale.

2.3 Anaksagoras (n. 500-428 eaa.)

Anaksagoras ei uskonut Auringon ja Kuun jumalaisuuteen, vaan piti edellistä punaisenhehkuvana kivenä ja oletti jälkimmäisen koostuvan maallisista aineista ja vain heijastavan Auringon valoa. Hänen mukaansa emme tunne tähtien lämpöä niiden suuren etäisyyden vuoksi. Lisäksi Anaksagoras esitti Kuun olevan Peloponnesosta suuremman (käsitys oli syntynyt mallilaskuista, joissa Maan oletettiin olevan litteän) ja arveli siellä olevan vuoria ja rotkoja. Hän selitti myös Auringon ja Kuun pimennykset oikein.

2.4 Empedokles (n. 483-423 eaa.)

Empedokles osoitti, ettei ilma ollut tyhjiyttä vaan näkymätöntä ainetta, ja määritteli neljä alkuelementtiä: maa, vesi, ilma ja tuli [ks. Thales; Aristoteles].

2.5 Demokritos (n. 460-370 eaa.)

Leukippos (s. n. 470) esitti, että kaikki aine koostuu keskenään identtisistä, näkymättömistä ja jakamattomista hiukkasista, atomeista (*atomos* = jakamaton). Demokritos kehitti ajatusta edelleen, ja vain hänen töitään on jäänyt jälkipolville. Satunnaisesta tuesta (esim. epikurolaisuus) huolimatta oppi ei saavuttanut suosiota; mm. siihen sisältyvä ajatus atomien välisestä tyhjästä tilasta, so. tyhjiöstä, herätti kiivasta vastustusta.

2.6 Platon (n. 427-347 eaa.)

Platon tunnetaan idealistisesta teoriastaan 'perimmäisestä olevaisuudesta' eli aineettomien ideoiden maailmasta, jota aistimaailma vain heijastelee. Koska ideat ovat empiirisen tutkimuksen ulottumattomissa, ne voidaan tajuta vain järjen avulla; tietoteoreettisesti Platon oli siis rationalisti. Hän jakoi pythagoralaisen näkemyksen maailmasta lukusuhteiden hallitsemana kokonaisuutena ("*maailma on kirjoitettu matematiikan kirjaimin*").

Havaintojen tekoa idealistit eivät pitäneet tärkeänä. Luonnontieteissä Platon piti matematiikkaakin vain eräänlaisena 'ilmiöiden pelastamisena' [ks. Geminus], ei todellisena tietona. Hän antoi mm. tähtitieteilijöille tehtäväksi kehittää geometriaa siten, että taivaankappaleiden liikkeet 'palautuisivat' taasisiksi ympyräliikkeiksi.

- Platon vaikutti Ateenassa, josta oli tullut kreikkalaisen sivistyksen keskus. Sivistys tuli Platonin ja muiden filosofien toimesta tarkoittamaan käytännöllistä toimintaa halveksuvaa elitismiä; esim. teknologia häpäisi materialismillaan geometriaa [ks. kuitenkin Arkhimedes; Heron]. On myös esitetty, että kreikkalaiset eivät tarvinneet koneita, koska heillä oli orjia!

2.7 Eudoksos (n. 390-335 eaa.)

Eudoksosta pidetään integraalilaskennan edelläkävijänä, sillä hän kehitti ns. ekshaustio- eli tyhjennysmenetelmän pinta-alojen ja tilavuuksien määrittämiseksi. Hänen työnsä oli todennäköisesti yksi tärkeimpiä lähteitä Eukleideen kirjoittaessa *Alkeensa*.

Eudoksoksen väitetään havainneen ensimmäisenä, että aurinkovuosi oli itse asiassa n. kuusi tuntia pidempi kuin 365 päivää, eli 365.25 päivää pitkä [ks. Thales; Hipparkhos]. Hän kehitti myös teorian 27:stä Maapallon ympärillä olevasta samankeskisestä, liikkuvasta pallonkuoresta, joihin taivaankappaleet oli kiinnitetty [ks. Aristoteles].

2.8 Aristoteles (n. 384-322 eaa.)

Aristoteles oivalsi, että loogisen ajattelun pätevyys on laadultaan muodollista, sisällöstä riippumatonta. Lisäksi, koska looginen ajattelu ei ole luontevaa ihmisille, jonkinlainen apuväline olisi tarpeen. Voidaan sanoa, että deduktiivisen päättelyn idea vakiintui Aristoteleen formaalin logiikan syntyessä. Logiikkaa käsittelevät teokset koottiin myöhemmin otsikon *Organon* (*Työkalu*) alle. (Myöhemmin huomattiin, että Aristoteleen nk. syllogistiikka

on vain yksi loogisen päättelyn laji.) Aristoteleen filosofiassa jokainen teoreettinen tiede oli aksiomaattinen järjestelmä [ks. Eukleides] eli hyödynsi logiikkaa. Kaikki tieto alkaa kuitenkin empirismin periaatteiden mukaisesti kokemuksesta, aistihavainnoista.

- Aistihavainnoista johdetaan induktion avulla käsitteitä ja periaatteita, jotka nostetaan aksiomien asemaan. Aksiomeista johdetaan teoreemoja deduktion avulla. Aristoteleen näkemyksen mukaan teorian aksiomien tuli olla sekä tosiksi tiedettyjä että itsestään selviä. Nykyaikaisemmassa hypoteettis-deduktiivisessä menetelmässä teorian peruslauseiden luotettavuutta arvioidaan myös teorian seuraamusten totuudellisuuden kautta.
- Tutkijana Aristoteles kunnostautui lähinnä biologina sekä yhteiskunnallisissa ja humanistisissa tieteissä; tähtitieteen ja fysiikan puolella hänen teoriansa tulivat kuuluisaksi mutta eivät juuri edistäneet tiedettä. Tämä ei olekaan yllättävää, sillä matematiikka ei kuulunut hänen filosofiassaan luonnontieteisiin [ks. Pythagoras; Platon]. Lisäksi ongelman tuotti Aristoteleen 'syyoppi', jossa nk. finaalisuus oli vaikuttavaa syytä merkittävämpi.

Fyysikkona Aristoteles lähinnä filosofoi alkuaineiden ja liikkeen ominaisuuksilla. Teoksessa *Fysika* hän hyväksyi Empedokleen neljä alkuainetta ja määritteli niille neljä 'peruslaatua': tuli oli lämmintä ja kuivaa, ilma lämmintä ja kosteaa, vesi kylmää ja kosteaa sekä maa kylmää ja kuivaa. Tämä mahdollisti aineen jatkuvan muutoksen ja antoi teoreettista tukea alkemialle. Kullakin alkuaineella oli oma luonnollinen liikkeensä: maa pyrki alimmaksi, sitten tulevat vesi ja ilma, ja tuli pyrki liekkien tavoin ylimmäksi.

- Luonnollisen liikkeen lisäksi on olemassa keinotekoisia liikettä, esim. kiveä heitettäessä. Antiikin aikana ei kuitenkaan voitu ymmärtää, miksi heitetty kivi jatkaa liikerataansa. Aristoteleen mielestä liikkeen ylläpitämiseksi tarvittiin jatkuvasti vaikuttava voima. Vasta keskiajalla esitettiin ensimmäisiä ideoita [ks. Ockham], jotka vieläkin myöhemmin johtivat hitauden eli inertian käsitteen keksimiseen [ks. Newton].

Alkuaineiden luonnollisen liikkeen perusteella oli helppo kuvitella Maa pallonmuotoiseksi kohteeksi maailmankaikkeuden keskelle, mutta hitauskäsitteen puutteen takia ajatus sen pyörimisestä akselinsa ympäri tuntui väärältä: miksi ylös heitetty kivi ei jää jälkeen liikkuvasta maankamarasta? Teoksessa *De caelo* (*Taivaasta*) Aristoteles kehitti Eudoksoin maakeskistä planeettamallia, jossa ympyräliike oli erikoisasemassa; sitä kutsuttiinkin myöhemmin aristoteeliseksi. Hän jakoi maailman myös kuunyliseen ja kuunaliseen osaan. Kuunylinen maailma koostui pelkästään uudesta 'taivaiden aineesta', *quinta*

essentia, jota kutsutaan myös eetteriksi. Taivaankappaleet — Kuu mukaan lukien — eivät siis voineet olla millään tavalla Maan kaltaisia. Kuunylisen maailman oletettiin pysyvän muuttumattomana; näin Aristoteleen mallissa esim. komeettojen täytyi olla ilmakehään liittyviä ilmiöitä [ks. Brahe]. Kuunalinen maailma koostui sekä perinteisistä alkuaineista että eetteristä; jälkimmäistä tarvittiin kumoamaan tyhjiö ja takaamaan luonnonlakien toiminta!

- Aristoteles teki myös arvioita Maapallon koosta: hän oli tietoinen yötaivaan eroista eri leveysasteilla, ja päätteli siitä Maapallon olevan, ei vain pallon, vaan suhteellisen pienikokoisen pallon [ks. Eratosthenes].
- Aristoteellinen avaruus oli äärellinen, eli uloimman pallonkuoren takana ei ollut mitään. Tähän liittyi Arkhytaan (n. 410-340 eaa.) kosmisen reunan arvoitus: mitä tapahtuu keihäälle, joka heitetään maailmankaikkeuden reunan yli? Epikuroraiset kannattivat äärettömän avaruuden käsitettä, ja stoalaisuus edusti kantaa, jonka mukaan avaruudella ei ollut aristotelelaisten postuloimaa reunaa, vaan tähtien muodostaman kehän takana oli ääretön tyhjiys. Myöhemmin tällä virheellisellä mallilla selitettiin myös yötaivaan pimeys: tähtien välistä näemme kaukaisen tyhjiyden [ks. Kopernikus].
- Aristoteleen planeettamalli 'selitettiin' matemaattisesti roomalaiskaudella [ks. Ptolemaios] ja kanonisoitiin keskiajalla Tuomas Akvinolaisen (1225-1274) toimesta.

2.9 Eukleides (n. 300 eaa.)

Eukleides formalisoi geometrian teossarjassa *Alkeet* (*Stoikheia*, lat. *Elementa*). Hän kokosi aikansa tietämyksen [ks. Eudoksos] ensimmäiseksi tunnetuksi aksiomaattiseksi järjestelmäksi [ks. Aristoteles], ja häntä onkin kutsuttu paitsi geometrian, niin myös matemaattisen täsmällisyyden isäksi.

Eukleideen aksioomat, joista neljä ensimmäistä muodostavat nk. absoluuttisen geometrian: **(1)** Kahden pisteen kautta voidaan piirtää suora. **(2)** Jana voidaan jatkaa suoraksi. **(3)** Annetun pisteen ja annetun janan avulla voidaan piirtää ympyrä. **(4)** Kaikki suorat kulmat ovat yhtä suuria. **(5)** Suoran ulkopuolella olevan pisteen kautta voidaan piirtää vain yksi sen kanssa yhdensuuntainen suora. Viimeisen aksioman poistaminen on myöhemmin johtanut nk. epäeuklidisiin geometrioihin [ks. Einstein].

Vaikka Eukleides kehitti myös lukuteoriaa [ks. Pythagoras], geometrian merkitys matematiikassa oli erittäin suuri aina uudelle ajalle asti. Osittain tämä

oli seurausta kömpelöstä kirjaimiin perustuvasta numerojärjestelmästä [ks. Diofantos].

Eukleides kirjoitti myös näkemisen geometriasta, perspektiivistä, ja kehitti jo Empedoklesin ja Platonin hahmottelemaa nk. ”emissioteoriaa”: näkeminen perustuu silmästä lähteville, kohdetta analysoiville säteille (*Optiikka*). Vaikka Aristoteleen päinvastainen teoria pääsi lopulta voitolle, Eukleideen käsitys valonsäteiden suoraviivaisesta liikkeestä oli edistysaskel.

2.10 Aristarkhos (n. 310-250 eaa.)

Aristarkhos ehdotti ensimmäisenä Maan kiertävän Aurinkoa. Malli ei kuitenkaan saavuttanut suosiota, vaan maakeskistä [ks. Eudoksos; Aristoteles] kuvaa pyrittiin mieluummin parantelemaan [ks. Apollonios]. Kuunpimennysaikojen avulla Aristarkhos arvioi sen etäisyyden suurin piirtein oikein, n. $60 R_E$ [Maan sädettä, ks. Eratosthenes]. Myös Kuun koolle hän sai oikean arvon, eli säde on n. neljäsosa Maapallon säteestä.

- Herakleides Pontoslainen (n. 390-310 eaa.) oli jo esittänyt sekamallia, jossa osa planeetoista kiertää Maata, osa Aurinkoa; Brahekin kannatti vastaavaa mallia vielä uuden ajan kynnyksellä, vaikka Kopernikus oli jo julkaissut oman työnsä. Herakleides uskoi Maan myös pyörivän akselinsa ympäri.

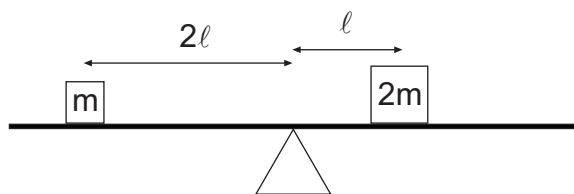
2.11 Arkhimedes (n. 287-212 eaa.)

Arkhimedes oli matemaatikko, fyysikko (ensimmäinen alallaan) ja insinööri. Hän käytti ensimmäisenä matematiikkaa luonnon ymmärtämiseen ja pystyi työssään keksimään teorianmuodostukselle välttämättömiä uusia, abstrakteja käsitteitä kuten painopiste. Empiiriset ja formaaliset menetelmät eivät riidelleet vaan tukivat toisiaan: ’tiede’ oli syntynyt.

Tarinan mukaan Arkhimedeen piti selvittää kuninkaan uuden kruunun kullan puhtaus, ja hän keksi ratkaisun kylvyssä (*”Heureka!”*): uusi tapa mitata tilavuutta — ja samalla tiheyden käsite — oli keksitty. Jatkossa syntyi hydrostaatiikan peruslaki eli Arkhimedeen laki. Statiikan alalla Arkhimedes määritteli nk. kultaisen säännön (Kuva 2.1).

- Arkhimedeen laki: Nesteessä oleva kappale on sen verran kevyempi kuin sen syrjäyttämä nestemäärä painaa (pätee myös kaasuille). Tämä määrittelee nk. nosteen.

- Kultainen sääntö: Kaksi kappaletta on tasapainossa, kun niiden etäisyys tukipisteestä on käänteisessä suhteessa niiden massaan.



Kuva 2.1: Kultainen sääntö. Kaksi kappaletta on tasapainossa, kun niiden etäisyys tukipisteestä on käänteisessä suhteessa niiden massaan.

Matematiikassa Arkhimedes pyrki kokeellisesti määrittämään kartioleikkauksista syntyviä pinta-aloja ja tilavuuksia, ja jatkoi näin integraalilaskennan kehittämistä [ks. Eudoksos]. Hän kehitti myös menetelmän, jolla π voitiin laskea mielivaltaisen tarkasti ja ratkaisi ympyrän pinta-alan kaavan.

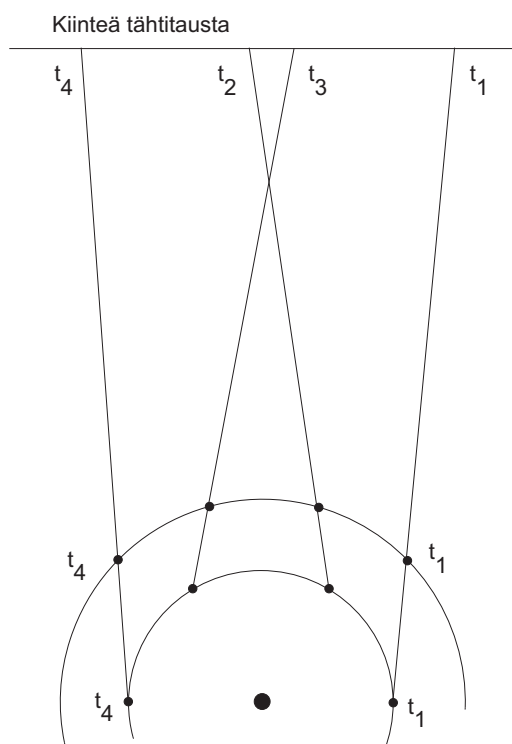
- Arkhimedes laski ympyrän sisään jäävän säännöllisen n -kulmion kehästä minimiarvon, ympyrän sisäänsä jättävästä n -kulmion kehästä maksimiarvon, ja n :ää kasvattamalla sai arvot lähenemään toisiaan. Tulokseksi hän sai nykyaikaisin merkinnöin $\pi = 3,141$.

Insinöörinä [vrt. Platon] Arkhimedes keksi mm. monimutkaisia taljoja, hydraulisen ruuvin, polttopeilejä ja erilaisia sotakoneita; hän kehitti myös vesikel-loa.

- Polttolaseista löytyy viittauksia lähes kaksi vuosisataa varhaisemmalta ajalta [ks. myös Ptolemaios].
- Muita ajan keksijöitä olivat mm. Ktesibios (n. 308 - 246 eaa.), joka oli hyvin lähellä höyrykoneen käytännön toteutusta ja kehitti sotakoneita, vesipumppua, vesiurkuja ja vesikelloa; Straton (288-n. 268 eaa.), joka tunnettiin 'Fyysikkona' [ks. Heron]; Filon Bysanttilainen (n. 200 eaa.), joka tunnettiin koneiden rakentajana.

2.12 Eratosthenes (n. 275-194 eaa.)

Eratosthenes tunnetaan maantieteen perustajana. Hän piirsi aikansa tunnetun maailman kartan [ks. Thales], otti siinä käyttöön leveys- ja pituuspiirit, sekä määritteli kolme ilmastovyöhykettä, trooppisen, lauhkean ja napavyöhykkeen. Eratosthenes aloitti myös vakavan geodesian, maanmittauksen, tutkimuksen tarkentaessaan nerokkaalla geometrisellä menetelmällä Aristoteleen arviota Maapallon koosta. Maapallon säde on $R_E = 6371$ km [muodosta, ks. Newton].



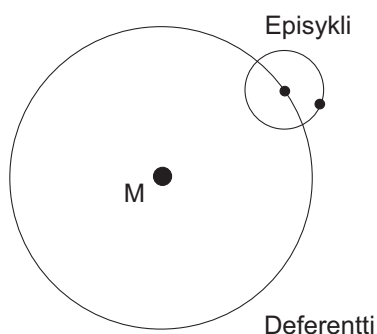
Kuva 2.2: Planeettojen taantuva liike. Maan etäisyys Auringosta on n. 150 miljoonaa km, Marsin n. 230 Mkm. Mars kiertää Auringon ympäri 687 vuorokaudessa, joten puolessa vuodessa (n. 183 vrk), jolloin Maa kiertää 180° , Mars kiertää vain kulman $183/687 \times 360^\circ = 96^\circ$ ($t_1 \rightarrow t_4$). Kiinteään tähtitaivaaseen verrattuna Marsin rataliike muuttaa ajoittain suuntaansa. Ilmiö on helppo selittää kuvan aurinkokeskisellä mallilla, jossa myös Maan liike vaikuttaa havaintoihin. Maakeskisessä systeemissä piti tukeutua nk. episykleihin.

2.13 Apollonios (n. 262 - 190 eaa.)

Apollonios kehitti etenkin geometriaa ja määritteli kartioleikkauksia [ks. Arkhimedes] tutkimalla mm. ellipsin, paraabelin ja hyperbelin käsitteet. Eukleideen, Arkhimedeeseen ja Apollonioksen aikaa kutsutaan kreikkalaisen matematiikan kultakaudeksi.

- Kartioleikkausten käytännön merkitys taivaanmekaniikassa kävi ilmi vasta 2000 vuotta myöhemmin painovoimateorian yhteydessä [ks. Newton]. Usean muunkin matemaattisen teorian kävi samoin, eli sovellutukset löytyivät paljon teorianmuodostuksen jälkeen ja usein yllättäviltäkin suunnilta.

Käytössä ollut maakeskinen maailmankuva [ks. Eudoksos; Aristoteles] ei pystynyt selittämään planeettojen nk. taantuvaa liikettä: yötaivaalla kiintotähtien suhteen liikkuvat planeetat vaihtavat ajoittain suuntaansa (Kuva 2.2). Apollonios kehitti tätä väärää teoriaa nk. episykliä avulla [ks. Hipparkhos; Ptolemaios]. Planeettojen oletettiin kiertävän omaa ympyrärataansa, jonka keskipiste kiertää Maata (Kuva 2.3).



Kuva 2.3: Planeettojen taantuvan liikkeen maakeskisessä mallissa 'selittävä' episykli.

2.14 Hipparkhos (n. 190-120 eaa.)

Hipparkhos laati ensimmäisen tunnetun tähtiluettelon (850 tähteä) ja jakoi — myös ensimmäisenä — tähdet kuuteen ryhmään niiden kirkkauden mukaan. Hän taulukoi myös trigonometrisia jäniteitä ja kehitti Apollonioksen episykliteoriaa [ks. Ptolemaios].

- Hipparkhos on ensimmäinen tähtitieteilijä, jonka tiedetään käyttäneen astrolabiksi kutsuttua kulmanmittauslaitetta. Laite oli käytössä vielä renessanssiajalla navigoinnin apuna; myöhemmin sen korvasi sekstantti.

Hipparkhos laski Kuun [ks. Aristarkhos] kiertoajan, 29.53 d, erittäin tarkasti. Vuoden pituudelle hän laski vain n. 7 minuuttia liian pitkän ajan, n. 365 d 5 h 56 min [ks. Eudoksos]. Virallisen ajanlasku ei huomionnut tähtitieteilijöiden löytöjä ja kehittyi siten hitaammin.

- Nykyisin nk. trooppisen vuoden eli aurinkovuoden pituus on 365 d 5 h 48 min 46 s = 365.2422 d; tämä lasketaan kevättasauspisteestä toiseen. Maapallon kiertoliikkeen hidastuessa jokainen vuosi on n. 0.0053 s edellistä lyhyempi. Maan pyörimisakseli ei ole kohtisuorassa planeetan ratatasoon nähden, vaan on n. 23° kallellaan. Tästä aiheutuu vuodenaikojen vaihtelu, sillä akselin suunta ei muutu vuotuisen kierroksen aikana; esim. pohjoisen pallonpuoliskon kesä ajoittuu ajalle, jolloin akselin pohjoispää osoittaa Auringon suuntaan (kesäpäivän seisaus 21. tai 22.6). Kevätpäivän tasauksen aikaan (20. tai 21.3) päivä on kaikkialla Maapallolla yhtä pitkä akselin ollessa suosimatta kumpaakaan pallonpuoliskoa. Talvipäivänseisaus on 21. tai 22.12 ja syyspäiväntasaus 22. tai 23.9.
- Vuonna 45 eaa. kalenteria uudistettiin Gaius Julius Caesarin (100-44 eaa.) toimesta siirtymällä 365.25 päivän vuoteen siten, että joka neljäs vuosi — nk. karkausvuotena — päiviä oli 366, muulloin 365. Tämä nk.

juliaaninen kalenteri oli käytössä n. 1600 vuotta, ennen kuin jäljelle jäänyt reilun 11 minuutin vuosivirhe kumuloitui häiritseväksi [ks. Brahe].

Hipparkhos havaitsi, että tähtien vuotuiset asemat muuttuvat systemaattisesti ajan kuluessa. Ilmiö selitettiin myöhemmin Maan pyörimisakselin prekessioliikkeellä.

- Prekessioliike johtuu Auringon ja Kuun gravitaatiovaikutuksesta Maan päiväntasaajapullistumaan [ks. Newton], mikä saa Maan akselin kääntymään pyörivän hyrrän akselin tavoin täyden kierroksen n. 25 725 vuodessa. Prekession vaikutuksesta seisaus- ja tasauspäivät muuttavat hitaasti tähtien avulla mitattua paikkaansa. Sen johdosta myös tähtien suhteen laskettu nk. sideerinen vuosi, 365.2564 d, on pidempi kuin aurinkovuosi.

2.15 Geminus (n. 50 eaa.)

Geminus teki ensimmäisenä eron tieteellisen realismin ja instrumentalismin välille. Realismin mukaan maailmaa kuvaavat teoriat ovat joko tosia tai epätosia, instrumentalismin mukaan ne vain joko toimivat tai eivät toimi syistä, jotka eivät olleet tärkeitä. Etenkin tähtitieteilijöiden matemaattisten mallien ei oletettu kertovan mitään planeettojen todellisesta liikkeestä [ks. Ptolemaios].

2.16 Heron (n. 61 - 150)

Heron keksi mm. nostureita, suorakulman mittauslaitteen, puristimia, suihkulähteitä ja vesipumpun, sekä pyörivän höyryturbiinin; hän sai liikanimen *ho mekhanikos* eli 'mekaanikko' [ks. Arkhimedes]. Koska hän ei ajalleen tyypillisesti ollut kiinnostunut keksintöjensä soveltamisesta todelliseen tarpeeseen [ks. Platon], ne jäivät vain kuriositeeteiksi. Heron esitti kaasujen koostuvan hyvin pienistä hiukkasista, jotka täyttävät tyhjiötä vain osittain [ks. Demokritos].

2.17 Ptolemaios (n. 100-170)

Ptolemaios kehitti episykleihin [ks. Apollonios; Hipparkhos] perustuvan maailmanmallin huippuunsa teoksessaan *Megiste syntaksis* (*Maailmanjärjestys*, tunnetaan parhaiten keskiaikaisella arabialaisella nimellä *Almagest*). Kirja oli tähtitieteen perusteos 1500-luvulle asti; etenkin kristillinen kirkko tuli

puolustamaan siinä esitettyä mallia, koska se 'pelasti' [ks. Geminus] aristoteelisen, maakeskisen maailmankuvan.

- Ptolemaios kehitti työssään trigonometriaa parannellen mm. Hipparkhosin taulukoita. Hän hyödynsi myös aikalaisensa Menelaosin pallotrigonometriaa.

Ptolemaios tutki myös geometrista optiikkaa [ks. Arkhimedes]; esim. polttolasien käyttö suurennuslaseina oli jo tunnettua hänen aikanaan. Hän yritti johtaa kokeellisesti myös valon taittumislakia, päätyen kuitenkin väärään tulokseen [ks. Huygens]. Optiikka kehittyi lisää vasta keskiajalla [ks. Alhazen].

2.18 Diofantos (200-luvulla)

Diofantosta on kutsuttu algebran isäksi [ks. al-Khwarizmi]. Hän muodosti mm. Heronin ja Pappoksen (300-luvulla) kanssa kreikkalaisen matematiikan nk. hopeakauden, jonka keskus oli Alexandriassa. Diofantos oli varsin tietoinen käytössä olleen, kirjaimiin perustuvan numerojärjestelmän soveltumattomuudesta algebraan [ks. Eukleides], ja spekuloi sen uudistamisella [ks. Aryabhata].

- Pappoksen merkittävin panos matematiikalle oli säilyttää vanhat tulokset kahdeksan kirjaa käsittävässä matematiikan käsikirjassaan. Omaperäisyys matematiikassa — kuten monessa muussakin toiminnassa — oli häviämässä.
- On huomattava, että kiinalainen matematiikka oli ollut tässä vaiheessa algebrallista jo vuosisatoja!

2.19 Hypatia (370-415)

Hypatia on ensimmäinen tunnettu tiedenainen. Hän vaikutti Aleksandriassa, jonka Akatemian johtaja hänestä tuli. Hypatiaa syytettiin kerettiläisyydestä ja hänen uskotaan joutuneen munkkijoukon tappamaksi kirkossa(!); jälleen merkki aikojen muutoksesta. Aleksandrian kausi matemaattisen sivistyksen keskuksena päättyi tähän.

Luku 3

Keskiaika

Euroopassa Rooman valtakunnan (Luku 2) kukistumista seurannut kulttuurinen taantuma kesti satoja vuosia, mutta vähitellen teknologian — esim. vesivoiman — kehitys alkoi nostaa maanosaa jaloilleen. 1100-luvulle tultaessa ei enää voida puhua 'pimeästä keskiajasta'; yliopistolaitoskin alkoi toimia. Varhaiskeskiajalla antiikin opit unohtuivat, mutta 800-luvulta alkaen niitä oli ruvettu kääntämään arabiaksi; sivistyksen keskus siirtyikin vuosisadoiksi muslimimaailmaan, joka osasi hyödyntää myös idän hindujen ja kiinalaisten oppeja. Palatessaan Eurooppaan 1200-luvulla vanhat opit stimuloivat uutta filosofista ajattelua. Fysiikassa kehitystä tapahtui optiikan ja magnetismin alalla.

Keskiajan loppupuolen renessanssi ei rationalismin vastaisuudessaan edistänyt suuresti tieteellistä ajattelua. Se virisi uudelleen vasta uudella ajalla, kun matematiikka tuli vakavasti kuvaan mukaan (Luku 4). Tässä tarvittavia matematiikan perusteita luotiin juuri keskiajalla.

3.1 Aryabhata (n. 476-550)

Aryabhata kokosi hindujen matematiikan tietouden teokseen *Aryabhatija* (499), josta löytyvät vanhimmat viittaukset heidän kymmenjärjestelmäänsä; teos vaikutti myöhempään muslimien matematiikan kehitykseen [ks. al-Khwarizmi]. Aryabhata oli myös tähtitieteilijä ja osasi mm. selittää Auringon ja Kuun pimennykset.

- Aryabhatan teos ei ole systemaattinen matemaattinen esitys kreikkalaisten töiden tapaan, vaan eräänlainen (runomuotoinen) 'keittokirja' ratkaisuisista erilaisiin ongelmiin.

3.2 Brahmagupta (n. 625)

Brahmagupta käytti ensimmäisenä nollaa ja negatiivisia lukuja johdonmukaisesti intialaisessa matematiikassa.

3.3 al-Khwarizmi (n. 780-844)

Arabialainen Abu Jafar Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi kehitti algebrasta [ks. Diofantos] matematiikan haaran teoksessaan *Algebra* (825), jossa käsitellään mm. toisen asteen yhtälöitä. Termi 'algebra' tulee sanasta *al-gabr*, 'palauttaminen', ja tekijän nimi on pohjana sanalle 'algoritmi'.

Al-Khwarizmi laati myös trigonometrisia taulukoita. Islamilainen maailma suosi yleensäkin trigonometrian tutkimusta; se tunsikin jo 800-luvulla sekä Ptolemaioksen taulukot että intialaisten matemaatikkojen yhtä vanhat, mutta enemmän nykyistä sinifunktiota muistuttavan käytännön, ja he seurasivat jälkimmäistä. Esimerkiksi Al-Fazari oli kääntänyt intialaisen *Siddhanta*-nimisen aihetta käsitelleen teoksen arabiaksi vuonna 733.

Teoksillaan Al-Khwarizmi välitti intialaista matematiikkaa [ks. Aryabhata; Brahmagupta] myös Eurooppaan [ks. Fibonacci]. Nykyisin puhutaan hieman virheellisesti esim. 'arabialaisista' numeroista.

3.4 Alhazen (n. 965-1039)

Alhazen (oik. Abu-Ali Al-Hasan ibn al-Haitham) kirjoitti vaikutusvaltaisen teoksen, *Kitab al-Manazir*, optiikasta [ks. Arkhimedes; Ptolemaios]. Hän keksi *camera obscuran*, jossa ulkomaailman kuva saadaan projisoitua neulasilmän avulla pimeään kammioon, ja ymmärsi tämän liittyvän myös tapaan jolla silmä toimii [ks. Kepler]. Eukleideen teoria ei tuntunut enää uskottavalta.

3.5 Fibonacci (n. 1180-1250)

Leonardo Pisalaisen eli Fibonaccin teos *Liber abbaci* (1202) oli ensimmäisiä arabialaisen kymmenjärjestelmän oppaita Euroopassa ja esitteli myös nollan käsitteen [ks. al-Khwarizmi]. Fibonacci käytti negatiivisia lukuja velkojen ilmaisemiseen; laajemmin ne hyväksyttiin kuitenkin vasta 1500-luvulla, jolloin arabialaiset numerot syrjäyttivät roomalaiset numerot lopullisesti.

Murtolukujen desimaalimerkintää ei vielä oivallettu; logaritmien keksijä John Napier (1550-1617) oli merkinnän ensimmäisiä systemaattisia käyttäjiä.

3.6 Peregrinus (n. 1250)

Petrus Peregrinus kirjoitti ensimmäisen systemaattisen magnetismin tutkielman *Epistola de magnete* (n. 1269), jossa tutkitaan mm. magneetin muodostaman kentän muotoa; magneetin navat tuli näin löydettyä. Magnetismin tutkimus sai vakavaa jatkoa vasta uuden ajan kynnyksellä [ks. Gilbert].

- Varhaisin eurooppalainen kirjallinen maininta Kiinassa jo pitkään tunnetusta kompassista löytyy Alexander Neekanin (1157-1217) töistä, siis paljon ennen Marco Polon (1254-1324) matkoja.

3.7 Bacon (n. 1214-1294)

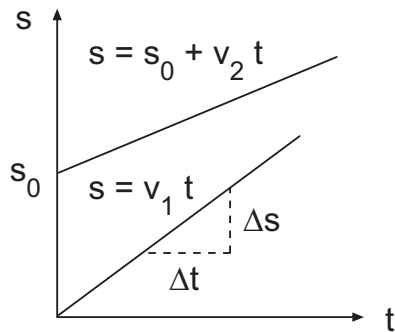
Roger Bacon oli matematiikan ja kokeellisen tieteen varhainen puolestapuhuja. Hän kehitti optiikkaa [ks. Alhazen] ja oli kiinnostunut mm. valon ja sateenkaaren tutkimuksesta.

- Silmälasit keksittiin 1200-luvun lopulla; mm. Baconin oppi-isän Robert Grossetesten (n. 1168-1253) tutkimukset optiikan alalla vaikuttivat tähän. Theoderic Freiburgilainen selitti 1304 sateenkaaren valon heijastumisena vesipisaroista niiden läpi kuljettuaan (René Descartes (1596-1650) täydensi tutkimusta myöhemmin, ja Newton toi värit mukaan selitykseen).

3.8 Ockham (n. 1285-1349)

William of Ockham vastusti aristoteelisia käsitteitä kuten substanssit, finaaliset syyt, kappaleiden luonnolliset paikat ja liikkumattomat liikuttajat. Esimerkiksi heitetyn kappaleen liikkeelle hän kehitti selityksiä, jotka ennakoivat modernia inertian eli hitauden käsitettä; näitä ajatuksia esitti myös hänen oppilaansa Jean Buridan (1300-1385). 'Ockhamin partaveitsen' nimellä kulkevan logiikan säännön mukaan yksinkertaisimmat selitykset ovat parhaita ("*Non est ponenda pluralitas sine necessitate*").

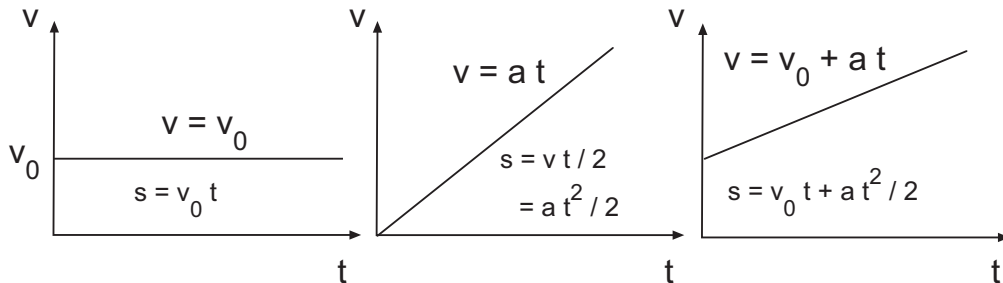
- Inertialla tarkoitetaan kappaleen massasta johtuvaa taipumusta vastustaa liiketilansa muutosta [ks. Newton].



Kuva 3.1: Vakionopeuksilla v_1 ja v_2 liikkuvien kappaleiden sijainti s ajan t funktiona, $s = s(t)$. Nopeuksia vastaa suorien kulmakertoimet, $\Delta s/\Delta t$. Tässä $v_2 < v_1$ ja hitaammalla kohteella on etumatka s_0 .

3.9 Oresme (n. 1323-1382)

Nicole Oresme kehitti matemaattisen funktion käsitettä ja sen kuvausta tasokoordinaatistossa käyrän avulla. Parhaat tulokset hän sai yksinkertaisten lineaaristen käyrien, so. suorien, tutkimuksessa. Suoralla voi mm. esittää tasaisella nopeudella v etenevän kappaleen (yksidimensioisen) sijainnin s ajan t funktiona (Kuva 3.1). Liikkeen nopeutta vastaa suoran kulmakerroin, $v = \Delta s/\Delta t$, missä Δs on ajassa Δt kuljettu matka. Jos paikka ja aika ilmaistaan metreissä ja sekunneissa, nopeuden yksikkö on m/s.



Kuva 3.2: Nopeus ajan funktiona; vasemmalla nopeus on vakio, $v = v_0$, ja keskellä tasaisesti kiihtyvä, $v = at$. Käyrien alle jäävä pinta-ala vastaa kuljettua matkaa s . Oikealla on yhdistelmäkuva; huomaa, että kiihtyvyyden arvo on muuttunut.

Oresme kuvasi graafisesti myös nopeuden muutosta (Kuva 3.2), ja tässä hän ennakoiki integrointia [ks. Newton] antaessaan kuljetulle matkalle geometrisen tulkinnan. Tasaisella nopeudella v_0 liikkuva kappale etenee ajassa t matkan $s = v_0 t$, mikä vastaa suoran $v = v_0$ alla jäävän suorakulmion pinta-alaa. Nopeuden kiihtyessä tasaisesti, $v = at$, kuvaan muodostuu kolmio, jonka pinta-ala on $s = \frac{1}{2}vt = \frac{1}{2}at^2$. Voisimme myös perustella, että hetken t tultaessa keskimääräinen nopeus on ollut $v/2$; tulos on jälleen sama. Tasaiselle kiihtyvyydelle saadaan analogisesti tasaisen nopeuden kanssa kulmakerroinmääritelmä $a = \Delta v/\Delta t$.

Yhdistämällä edellä esitettyjä tuloksia saamme tasaisesti kiihtyvälle liikkeelle

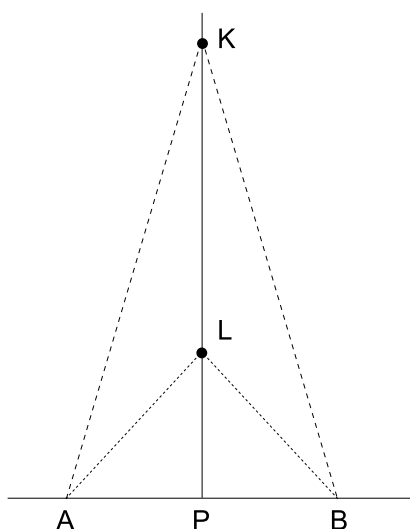
$$s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

Kaava osoittaa myöhäiskeskiajan olleen varsin luovaa aikaa. Matematiikan käyttö fysiikassa väheni renessanssiajalla, nousten uudelleen vasta Galilein töiden myötä.

3.10 Kopernikus (1473-1543)

Kopernikus haastoi maakeskisen maailmankuvan [ks. Ptolemaios] teoksessaan *De revolutionibus orbium coelestium* (*Taivaallisten kehien kierto-
liikkeestä*, 1543). Hän selitti kaikkien planeettojen kiertävän paikallaan pysyvää Aurinkoa [ks. Aristarkhos]; teoria auttoi mm. selittämään planeettojen taantuvan liikkeen [ks. Apollonios, Kuva 2.2] aikaisempaa yksinkertaisemmin. Kopernikus sijoitti myös Kuun oikealle paikalleen Maan satelliitiksi.

- Galilei tuli esittämään ensimmäiset mallia tukevat havainnot, ja Keplerin tarkennukset tekivät siitä tieteellisen teorian.



Kuva 3.3: Kohteen K (kaukana) tai L (lähellä) etäisyys pisteestä P voidaan laskea trigonometrisesti pisteistä A ja B havaittujen suuntakulmien avulla. Tyypillisesti A ja B ovat Maapallon sijainnit puolen vuoden välein radalla Auringon P ympäri. Toisaalta jopa aurinkokunnan liikettä tähtienvälisen avaruuden läpi voidaan hyödyntää.

Kopernikus uskoi kiintotähtien olevan kiinnitetyn paikallaan pysyvään kehään. Hän ei kuitenkaan pystynyt mittaamaan teoriansa ennustamaa kiintotähtien parallaksia, ja hänen täytyi olettaa niiden etäisyyden hyvin suureksi verrattuna planeettojen ja Auringon etäisyyksiin [ks. Huygens; Newton].

- Thomas Digges sirotteli 1576 tähdet Aurinkokuntamme ulkopuolella sijaitsevaan äärettömään avaruuteen. Hän keksi myös nk. pimeyden arvoituksen, joka on myöhemmin tunnettu Olbersin paradoksina: miksi avaruus on pimeä, vaikka tähtiä on ääretön määrä [ks. Aristoteles]. Itse hän oletti tämän johtuvan suurista etäisyyksistä: kaukaiset tähdet ovat liian himmeitä silmin nähtäviksi. Oikea syy on tähtien rajallinen elinaika.
- Parallaksi-ilmiö perustuu Maan muuttuvaan sijaintiin puolen vuoden välein Auringon eri puolilla: mitä suurempi radan säde, sitä kauempana olevien kohteiden etäisyyksiä pystyy mittaamaan. Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) määritteli 1838 ensimmäisenä tähden (61 Cygni) etäisyyden tarkalla parallaksimittauksella. Menetelmä ei kuitenkaan toimi esim. kaukaisten galaksien tapauksessa [ks. Eddington; Hubble].

3.11 Brahe (1546-1601)

Tyko Brahe oli suurin ja viimeisin paljain silmin havaintoja tehnyt tähtitieteilijä. Hän näki uuden tähden synnyn 1572 [kyse oli nk. supernovasta; ks. Hoyle], ja osoitti viisi vuotta myöhemmin, että komeetat eivät ole ilmakehän ilmiöitä vaan avaruuden kohteita. Molemmat havainnot olivat ristiriidassa aristoteelisen käsityksen kanssa kuunylisen eetteriavaruuden muuttumattomuudesta, ja siten filosofisesti kiinnostavia. Brahen myöhemmillä mittauksilla etenkin Marsin radasta oli suuri merkitys planeettojen liikkeen teoreettiselle selvittämiselle [ks. Kepler].

- Brahe keräsi havainnoistaan myös merkittävän tähtikartan, ja vertaamalla tuloksiaan antiikin mittauksiin hän pystyi johtamaan tarkan arvon, $51''$ /vuosi, Maan prekessioliikkeelle [ks. Hipparkhos]. Hän johti myös arvon valon taittumiselle ilmakehässä; ilmiön oli havainnut jo Bernard Walther (1430-1504).

Brahen mittaukset olivat osaltaan paljastamassa myös juliaanisen kalenterin [ks. Hipparkhos] sisältyvän virheen, joka vaikutti mm. pääsiäisen ajankohdan määrittämiseen. Nykyinen, nk. gregoriaaninen kalenteri otettiin katolisissa maissa käyttöön 1582; siinä karkausvuosien määrää vähennettiin niin, että vuoden keskimääräiseksi pituudeksi saatiin 365.2425 päivää; poikkeama todellisesta aurinkovuoden pituudesta on 26 s.

- Muissa kuin katolisissa maissa kalenteri otettiin käyttöön paljon myöhemmin; esim. Suomessa vasta 1753.

3.12 Gilbert (1544-1603)

William Gilbert julkaisi v. 1600 tutkielman *De Magnete*, jossa hän tote- si Maapallon olevan ison magneetin (*"magnus magnes ipse est globus ter- restris"*). Kompassin [ks. Peregrinus] toiminnan lisäksi hän pyrki teorial- laan selittämään myös Maapallon liikkeen Auringon ympäri [ks. Kopernikus]. Lisäksi Gilbert esitteli teoksessaan käsitteen 'electric force'; sähkön ja mag- netismin välistä yhteyttä ei vielä havaittu [ks. Ørsted].

- Gilbertin teorianmuodostusta helpotti Robert Normanin 1576 tekemä havainto magneettikentän inkliinaatiosta eli sen poikkeamasta vertikaal- isuunnasta. Magneettisen ja maantieteellisen pohjoisnavan suunnan välinen ero, deklinaatio, tunnettiin jo 1400-luvulla. Henry Gellibrand osoitti deklinaatiotutkimuksilla 1634, että Gilbertin löytämä Maan sisäinen magneettikenttä ei ollut pitkällä aikavälillä vakio.
- Gilbertiä pidetään yhtenä varhaisimmista empirismin puolustajista. Tunnetuin puolustaja, Francis Bacon (1561-1626), ei itse noudattanut omaa filosofiaansa, eikä näin myöskään vaikuttanut suuresti tieteen ke- hitykseen.

Luku 4

Mekaniikka

Luonnontieteet alkoivat kehittyä toden teolla taivaanmekaniikan myötä 1600-luvun lähestyessä. Makroskooppisessa maailmassa mekaniikka on luontevin kohde aloittaa fysiikan tutkimus, ja Aurinkokunta tarjosi ensimmäisen 'laboratorion', jossa suorittaa tarpeeksi tarkkoja mittauksia. Juuri matematiikan merkityksen hyväksyminen luonnontieteessä — kauhistus keskiajan päättäneelle renessanssille (Luku 3) — loi pohjaa edistykselle. Maapallo ei pelkästään menettänyt asemaansa maailmankaikkeuden keskuksena, vaan luonnon ymmärrettiin myös toimivan *yleisten lakien* alaisena. *Materiasta* tuli tieteellinen termi, kun gravitaation havaittiin pudottavan omenan puusta ja pitävän planeetat radoillaan. Gravitaation merkitys ymmärrettiin pian myös Aurinkokunnan ulkopuolisten kohteiden selityksessä, ja mekaniikan kulta-aika jatkui aina 1800-luvun alkuvuosiin asti. Siihen perustuvat systeemit ovat yhä vieläkin tähtitieteen kiinnostuksen kohteina: nykyaikaisin tietokonesimulaatioin tutkitaan hyvin erikokoisten systeemien kehitystä, planeettarenkaista galaksiryhmiin.

Kehitys johti myös tiedeseurojen syntyyn, ensimmäisenä jo v. 1603 perustettu Accademia del Lincei, joka tuki matematiikan ja luonnontieteiden tutkimusta Italiassa. Myöhemmin valtion tukemia seuroja syntyi mm. Englantiin (The Royal Society of London, 1662) ja Ranskaan (Académie des Sciences de Paris, 1666).

4.1 Galilei (1564-1642)

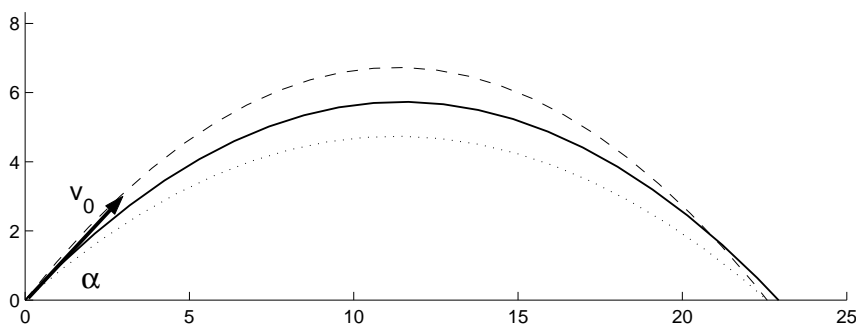
Galileo Galilei tutki uudella keksinnöllä, kaukoputkella, Kuun vuoria, Venuksen vaiheita, Jupiterin kuita ja auringonpilkkuja [ks. Thales], ja herätti suurta huomioita havainnoista kertovilla julkaisuillaan, esim. *Tähtien sanansaattaja* (*Siderius Nuncius*, 1610). Havaintoihinsa perusteella hän kannatti Kopernikuksen aurinkokeskistä teoriaa teoksessaan *Dialogi kahdesta suuresta maailmanjärjestyksestä*

(*Dialogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo, Tolemaico e Copernicano*, 1632), vaikka katolinen kirkko oli asettanut teorian pannaan v. 1616.

- Kaukoputki oli hollantilaisen Hans Lippershey (1587-1619) nimiin 1608 pantu keksintö, jota Galilei paranteli 1609.
- Auringonpilkkuihin liittyvä 11 vuoden jaksollisuus havaittiin vasta 1800-luvun puolivälissä [ks. Gauss].

Galilein mukaan luontoa voitiin selittää matemaattisesti kausaalisiin syihin nojaten; Aristoteleen suosimat päämääräsyöt saivat väistyä. Pääteoksessaan *Kaksi uutta tiedettä* (*Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali*, 1638) hän osoitti erimassaisten pallojen vierivän kaltevalla tasolla samalla, tasaisesti kiihtyvällä nopeudella, $v = gt$, ja putoamismatkan olevan verrannollinen ajan neliöön, $h = \frac{1}{2}gt^2$ (putoamisliikkeen kiihtyvyyttä merkitään a :n sijaan g :llä). Näin jo keskiaikaisille laskuille tasaisesta kiihtyvyydestä löytyi luonnosta suora vastineensa [ks. Oresme]. Kun esim. mitattiin kappaleiden putoavan yhdessä sekunnissa n . viisi metriä, voitiin laskea, että $g \approx 10 \text{ m/s}^2$.

- Simon Stevin (1548-1620) oli todennut jo 1586 eripainoisten lyijypainojen putoavan maahan yhtäaikaan. Legenda Galileista samoissa kokeissa Pisan tornissa n. 1590 ei siis tee hänelle oikeutta: Galilein maine lepää myöhempien kokeiden kvantitatiivisessa tarkkuudessa.



Kuva 4.1: Heittoliikkeen ratoja, kun $\alpha = 40, 45$ ja 50° ja $v_0 = 15 \text{ m/s}$. Ilmanvastusta ei ole huomioitu.

Soveltaessaan Oresmen kaavaa heittoliikkeen analyysiin, Galilei osoitti kappaleen radan olevan paraabelin (kuva 4.1). Olettaessaan horisontaalisen liikkeen jatkuvaksi hän ennakoiki jo inertialakia [ks. Ockham; Newton]; toisaalta vielä hänkin oletti taivaanmekaniikassa ympyräliikkeen luonnolliseksi, jos vaikuttavia voimia ei ollut.

- Ennen Newtonia Descarteskin esitti suoraviivaisen liikkeen olevan luonnollista myös Aurinkokunnassa.

Galilei havaitsi heilurin heilahdusajan riippuvan sen pituudesta, ei riipuksen massasta tai heilahduksen amplitudista; myöhemmin heilurianalyysillä saatiin myös g :n arvo entistä tarkemmin [ks. Huygens]. Galilei teki myös ensimmäiset vakavat kokeet äänen [ks. Boyle] fysiikan tutkimuksessa. Hänen ehdottamansa koejärjestely valon nopeuden mittaamiseksi ei myöhemmin toteutessaan tuottanut tulosta valon suuren nopeuden vuoksi [ks. Rømer].

4.2 Kepler (1571-1630)

Johannes Kepler kehitti aurinkokeskistä aurinkokuntamallia havaitsemalla, että planeettojen radat olivatkin ellipsejä. Testiplaneettana hän käytti Marsia, josta Brahe oli kerännyt kattavan aineiston.

- On huomattava, että vaikka Brahe ei itse ollut uskonut aurinkokeskiseen malliin, hänen mittauksensa olivat tarpeeksi neutraaleja (teoriavapaita) sopiakseen uuteen malliin.

Kepler määritteli planeettaliikkeen kolme peruslakia, kaksi ensimmäistä teoksessa *Astronomia nova* (1609) ja kolmannen teoksessa *Harmonices mundi* (1619). Samoja lakeja voidaan soveltaa myös esim. Kuuhun sekä Maata kiertäviin tekokuihin eli satelliitteihin.

- Keplerin lait: **(1)** Planeettojen radat ovat ellipsejä, joiden toisessa poltopisteessä on Aurinko. **(2)** Planeetasta Aurinkoon piirretty jana peittää yhtä suurissa ajoissa yhtä suuret pinnat. **(3)** Planeettojen kiertoaikojen neliöt suhtautuvat kuten niiden Auringosta mitattujen keski-etaäisyyksien kuutiot [ks. Newton].

Kepler tunnetaan myös näkemiseen liittyvistä tutkimuksistaan. Alhazenin tavoin Leonardo da Vinci (1452-1519) oli uskonut silmän toimivan *camera obscuran* tavoin, ja tältä pohjalta Francesco Maurolico selitti 1520-luvulla silmälasien [ks. Roger Bacon] toiminnan: ne kohdistivat valonsäteitä silmän verkkokalvolle eli retinalle. Giovanni Battista della Porta paransi 1558 *camera obscuran* kuvaa korvaamalla neulanreiän linssillä, ja juuri tältä pohjalta Kepler hahmotteli säteiden kulkua silmässä. Lopulta Descartes osoitti, että silmän verkkokalvolle todellakin muodostuu ulkomaailman ylösalaisin oleva kuva.

4.3 Huygens (1629-1695)

Christian Huygens jatkoi monella tapaa Galilein töitä. Hän vaikutti esim. kaukoputken ja mikroskoopin kehitykseen uudella linssien hiontamenetelmällä vuodelta 1655. Löydettyään Saturnuksen renkaat ja sen suurimman kunun, Titanin, hän alkoi tehdä eroa Maan lähiavaruuden ja tähtien välille [ks. Kopernikus]; Aurinkokunnan käsite oli muotoutumassa.

- Robert Hooke (1635-1703) julkaisi mikroskoopista merkittävän teoksen *Micrographia* v. 1665.
- Vuonna 1671 Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) määritteli Maan ja Marsin välisen etäisyyden, ja tästä edelleen Maan ja Auringon välisen etäisyyden. Jälkimmäistä lukua, n. 149.6 miljoonaa km, kutsutaan tähtitieteelliseksi yksiköksi (engl. *Astronomical Unit*, AU).

Huygens osoitti, että heilurin maksiminopeuden neliö oli suoraan verrannollinen sen pudotuskorkeuteen. Vuonna 1667 hän osoitti, että suure mv^2 säilyi kovien pallojen törmäyksessä. Näistä havainnoista syntyivät potentiaalienergian ja kineettisen energian käsitteet [ks. Joule].

Huygens rakensi ensimmäisen punnusten avulla käyvän heilurikellon 1656. Teoksessaan *Horologium oscillatorium* (1673) hän esitti kaavan heilurin heilahdusajan T ja pituuden l välille: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$. Kaavassa esiintyvä ja nyt aikaisempaa tarkemmin mitattavissa oleva kiihtyvyydevakio [ks. Oresme; Galilei] $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ selitettiin gravitaation [ks. Newton] avulla. Pari vuotta myöhemmin Huygens kehitti nk. liipotinjouksen parantamaan kannettavien kellojen tarkkuutta

- Ensimmäinen horologian tieteellinen kokonaisuus oli William Derhamin *Artificial Clockmaker* (1696). Vaikka kellot olivat paljon keskiaikaisia mekaanisia kelloja tarkempia, ne eivät merenkäynnistä häiriintyneinä vielä ratkaisseet vanhaa pituuspiirin määrittämisiongelmaa. Tarkkoja merellä toimivia kronometreja rakensivat vasta John Harrison (1693-1776) ja Pierre Le Roy (1717-1785).

Käyttämällä valon aaltoluonteen olettaa, nykyisin nimeään kantavaa periaatetta, Huygens johti valon taittumislain v. 1678. Hän ehdotti (*Traité de la Lumière*, 1690) valon olevan pitkittäistä aaltoliikettä maailman täyttävässä eetterissä [ks. Aristoteles]. Hän tutki myös islanninsälvässä tapahtuvaa, valon polarisaatiosta johtuvaa kaksoistaittumista, josta Erasmus Bartholinus (1625-1698) oli raportoinut 1669. Eetterin olemassaoloa Huygens perusteli mm. sillä, että tyhjiössä ääni häviää [ks. Boyle], mutta valo jatkaa häiriintymättömänä kulkuaan.

- Optiikassa Willebrord van Roijen Snell (1591-1626) oli johtanut kokeellisesti valon taittumislain n. 1621: laki kertoo, miten valonsäde muuttaa suuntaansa kahden väliaineen rajapinnassa. Laki selittää linssien ja prismojen toiminnan niissä käytetyn aineen valon kulkuun vaikuttavana ominaisuutena; puhutaan aineen taitekertoimesta (ilmiö selittyy valon nopeuden muutoksella väliaineessa).
- Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) kuvasi vuonna 1665 valon diffraktiota eli taipumista. Näitä havaintoja, jotka puhuivat aaltoteorian puolesta, ei kukaan osannut vielä hyödyntää [ks. Young ja Fresnel].

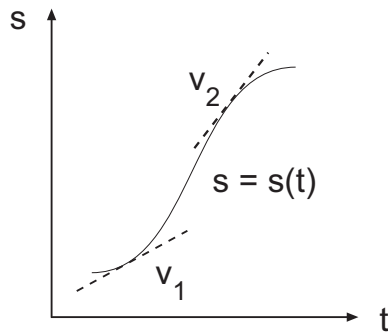
4.4 Newton (1642-1727)

Isaac Newton yhdisti ensimmäisenä maanpäällisiä ja avaruuden ilmiöitä yhteisen teorian alle [ks. Aristoteles]. Hän esitti mekaniikan kolme liikelakia ja painovoimalain pääteoksessaan *Philosophie naturalis principia mathematica* (1687). Nykyinen voiman yksikkö onkin newton (N): $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$.

- Newtonista tuli kuuluisa ja tieteestä muodikasta. Runoilija Alexander Pope (1688-1744) kirjoitti: ”*Nature and Nature’s laws lay hid in night; God said, ‘Let Newton be!’ and all was light*”.

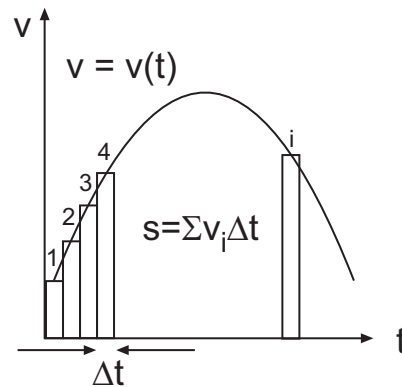
Newton säilytti uskonsa nk. absoluuttisen avaruuden olemassaoloon, vaikka uudet mekaniikan liikelait tekivätkin koko käsitteen tarpeettomaksi: koska mitään ehdottoman varmaa kiintopistettä ei ollut ja mekaniikan lait saivat saman muodon kahdessa toistensa suhteen tasaisessa liikkeessä olevan havaitsijan maailmassa, ei enää voitu sanoa missä kohdin avaruutta jokin tietty tapahtuma tapahtuu ja mikä on järjestelmän absoluuttinen liiketila. (Myöhemmin Einstein suhteellisti avaruuden ja jopa ajan käsitettä vielä radikaalimmin.) Newtonin liikelait on lueteltu alla; on huomattava, että liikkeen matemaattinen esitys kehittyi 1700-luvun aikana osittain Newtonin itsensä kehittämän differentiaali- ja integraalilaskennan ansiosta; derivaatasta ks. Kuva 4.2, integroinnista Kuva 4.3.

- **1. laki.** Kappale pysyy levossa tai jatkaa suoraviivaista, tasaista liikettä ellei siihen vaikuta jokin voima [ks. Galilei]. Kappaleen massa on myöhemmin määritelty sen inertian eli hitauden [liikkeen muutoksen vastustamisen; ks. Ockham] mitaksi.
- **2. laki.** Kappaleeseen kohdistuva voima \vec{F} synnyttää sen liikkeeseen vaikutuksen, joka on kappaleen massan m ja sen saaman kiihtyvyyden \vec{a} [ks. Galilei] tulo: $\vec{F} = m\vec{a}$.

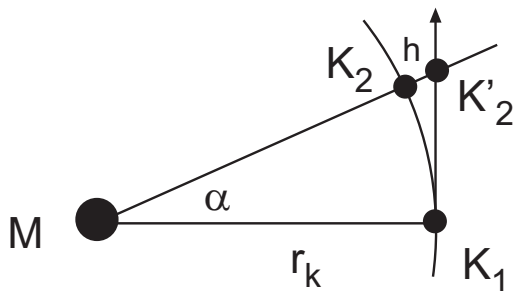


Kuva 4.2: Muuttuvalla nopeudella $v = v(t)$ liikkuvan kohteen sijainti s ajan t funktiona. Hetkellinen nopeus saadaan käyrän kulmakertoimesta eli funktion $s = s(t)$ aikaderivaatasta, $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$; kuvassa $v_2 > v_1$.

Kuva 4.3: Funktion $v=v(t)$ integrointi tarkoittaa pinta-alan laskemista summasta pieniä siivuja $v_i \Delta t$ kun $\Delta t \rightarrow 0$. Tällöin merkitään $s = \int v dt$. Vrt. Kuva 3.2.



- Erikoistapauksena kappaleen paino w on vapaassa putoamisessa massa m kohdistuvan voiman suuruus: $w = mg$, missä g on Maan nk. gravitaatiovoiman aiheuttama kiihtyvyys [ks. Huygens].
 - Siinä missä nopeus on paikan aikaderivaatta (Kuva 4.2), kiihtyvyys on nopeuden aikaderivaatta dv/dt .
- **3. laki.** Jos kappale kohdistaa johonkin toiseen kappaleeseen voiman, tämä kohdistaa ensimmäiseen kappaleeseen yhtä suuren, mutta vastakkaisuuntaisen voiman.



Kuva 4.4: Kuu putoaa. Ilman Maan aiheuttamaa gravitaatiovoimaa Kuu jatkaisi pisteestä K_1 suoraviivaisesti pisteeseen K'_2 . Todellisuudessa se putoaa jatkuvasti kohti Maapalloa, tässä pisteeseen K_2 , pysyen näin ympyräradallaan.

Painovoima- eli gravitaatiolaki antaa massapisteiden väliselle voimalle kaavan $F = Gm_1m_2/r^2$. Sen mukaan voima on suoraan verrannollinen kappaleiden massoihin m_1 ja m_2 sekä kääntäen verrannollinen niiden välisen etäisyyden r neliöön. Lakinsa avulla Newton pystyi mm. laskemaan Kuun kiertoajan Maapallon ympäri, kun esim. omenan putoamisnopeus maanpinnalla tunnettiin: Kuu siis putoaa Maata kohti saman lain alaisuudessa kuin omenakin (Kuva 4.4). Lisäksi, koska massa m kohdistuva gravitaatiovoima F Maan (massa m_E , säde R_E) pinnalla on toisen liikelain mukaan sama kuin sen paino $w = mg$, saadaan $g = Gm_E/R_E^2$. Kun sekä Maan säde [ks. Eratosthenes] että gravitaation aiheuttama kiihtyvyys g maanpinnalla [ks. Huygens] tunnettiin, kaavasta voitiin laskea myös Maan massa heti kun gravitaatiovakion G suuruus saatiin mitattua [ks. Cavendish].

- Newton johti laeistaan myös Keplerin empiiriset lait; esim. kolmas laki sai muodon $T^2 = 4\pi^2/(GM_S) \times r^3$, missä M_S on Auringon massa. Kaava mahdollistaa kiertoliikkeen keskuksen massan arvioimisen kiertoajan T ja etäisyyden r avulla. Näin punnittiin Aurinko; Maan ja Kuun systeemiin sovellettuna tämä antoi toisen tavan laskea myös Maan massan.
- Newton oli tietoinen teoriansa pienestä ongelmasta: miksi tähdet eivät kerääny painovoiman johdosta yhteen staattiseksi oletetussa maailmankaikkeudessa? Edes oletus avaruuden äärettömästä koosta ei ratkaise ongelmaa tyydyttävästi. Tarvittiin modernia kosmologiaa antamaan vastaus: maailmankaikkeus laajenee [ks. Hubble]. Newtonin teoria ei myöskään kerro miten painovoima välittyy kappaleiden kesken; kyseessä oletettiin olevan äärettömän nopeasti liikkuvan kaukovaikutuksen. Kentän käsite kehittyi myöhemmin sähkömagnetismin yhteydessä [ks. Gauss; Faraday].
- Painovoima on yksi luonnon neljästä perusvoimasta. Muut ovat sähkömagneettinen voima [ks. Ørsted; Maxwell] sekä nk. vahva [ks. Rutherford] ja heikko [ks. Fermi] ydinvoima. Voiman sijaan nykyään puhutaan mieluummin vuorovaikutuksista. Newtonkin spekuloi, että aineen rakenteeseen vaikuttaa sen atomaaristen hiukkasten väliset veto- ja poistovoimat.
- Myöhemmin painovoimalaki voitiin johtaa Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian approksimaationa.

Jean Richer (1630-1696) havaitsi 1672, että heilurikellot toimivat päiväntasaajalla hieman hitaammin kuin korkeilla leveysasteilla. Huygensin kaavan mukaan g :n täytyy siis olla pienempi, ja kellot vaativat vastaavaa heilurin

pituuden lyhentämistä. Newton sovitti tuloksen painovoimateoriaansa oletta-
malla Maapallon olevan päiväntasaajalta hieman pullistuneen, eli R_E on su-
urempi. Myöhemmin Maupertuis (1698-1759) osoitti Suomen Lapissa tehdyin
mittauksin teorian oikeaksi.

- Maan massojen synnyttämä painovoimakenttä poikkeaa ideaalisen pyö-
rähdyssellipsoidin kentästä. Todellista pintaa, johon myös valtameren
pinnat asettuvat, kutsutaan geoidiksi. Se voi poiketa ellipsoidista jopa
100 metriä; eroa mallinnetaan esim. palloharmonisilla funktioilla.

Prisman avulla Newton osoitti näkyvän 'valkoisen' valon koostuvan erivärisis-
tä komponenteista [nyk. aallonpituuksista; ks. Young ja Fresnel], jotka muo-
dostavat jatkuvan spektrin eli värien skaalan punaisesta keltaisen ja vihreän
kautta violettiin (*Opticks*, 1704; tulokset kuitenkin jo vuodelta 1666). Kos-
ka prisman erotuskyky oli heikko, Auringon valossa olevia 'pimeitä' viivoja
ei vielä havaittu [ks. Fraunhofer]. Newton kehitti myös peilikaukoputken v.
1668 ja koska — toisin kuin linssin — suuren peilin voi tukea takaa, tekniikka
mahdollisti entistä suurempien kaukoputkien rakentamisen.

- Newton hyödynsi James Gregoryyn fotometristä menetelmää tähtien
etäisyyksien mittaukseen, ja pääsi lähimpien tähtien osalta (nykyaikai-
sissa yksiköissä ilmaistuna) tulokseen 8 valovuotta, mikä on n. kaksi
kertaa oikea arvo. Menetelmässä oletettiin tähtien säteilytehon olevan
vakion, mikä ei pidä paikkaansa [parallaksista, ks. Kopernikus].

Newton korosti sekä induktion että deduktion merkitystä tieteellisessä työssä
ja puhui ”*analyysin ja synteesin metodista*”. Deduktion seuraamukset —
joiden tulee olla alkuperäisistä havainnoista riippumattomia — pitää todistaa
kokeellisesti. Nämä ovat modernin luonnontieteellisen ajattelun kulmakiviä.
Newton nojasi paljon toisten tutkijoiden teoksiin (”*If I have seen further it is
by standing on the shoulders of giants*”), ja hänen katsotaan siten aloittaneen
kollektiivisen tutkimuskäytännön.

4.5 Halley (1656-1742)

Edmund Halley laski komeettojen ratoja painovoimateorian [ks. Newton]
avulla. Hän ennusti v. 1705 nykyisin nimellään tunnetun komeetan paluun
vuodenvaihteeksi 1758-59 (edellinen Maan ohitus oli vuodelta 1682).

- Tällainen ennustus vähensi komeettoihin kohdistuneita pelkoja. Mm.
Pierre Bayle (1647-1706) oli kirjoittanut 1680-luvulla aikalaistensa komeet-
toihin liittyvistä uskomuksista.

Halley teki muitakin merkittäviä tähtitieteellisiä havaintoja. Hän mm. havaitsi Jupiterin, Saturnuksen ja Kuun kiertoajoissa muutoksia, jotka vasta Laplace pystyi selittämään Newtonin teorian pohjalta. Vuotta 1718 hän löysi tähtien ominaisliikkeen osoittamalla eräiden 'kiintotähtien' liikkuneen sitten antiikin aikojen [ks. Kant; Herschel].

Geotieteissä Halley julkaisi magneettisen [ks. Gilbert] kartan Maapallon meristä v. 1702. Revontulia hänen onnistui nähdä omin silmin vasta 1710-luvulla, mikä johtui nk. Maunderin auringonpilkkinimistä (n. 1645-1715): Auringon aktiivisuus — ja siten myös revontulien esiintyminen — oli vähäistä. Vuonna 1715 hän laski auringonpimennyksen kulkureitin ja löysi samalla jo unohtuneen Saros-jakson [ks. Thales]. Historiallisten auringonpimennysten analyysi johti hänet oletukseen, että Maapallon pyörimisliike akselinsa ympäri hidastui [ks. Kant].

4.6 Kant (1724-1804)

Immanuel Kant kuvasi nuoruudenteoksessaan *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (1755) maailmankaikkeutta kaaoksena, jossa planeetat, tähdet ja galaksit syntyivät painovoiman [ks. Newton] vaikutuksesta atomivirtojen pyörteistä; luominen ei koskaan pääty. Kantin mukaan myös monet tähtitieteilijöiden näkemät sumumaiset kohteet eivät muodostaneet vain yhtä ilmiöryhmää: ne saattoivat olla tähtijoukkoja, kaasupilviä tai jopa Linnunratamme ulkopuolisia galakseja [ks. Herschel]. Kaasupilvet voisivat olla uusien tähtien syntyalueita [ks. Laplace]. Kant spekuloi myös mahdollisuudella, että kitka veden ja valtameren kiinteiden pohjien välillä saattoi vaikuttaa Halleyyn havaitsemaan Maan pyörimisliikkeen muutokseen (*Physische Monadologie*, 1756).

- Thomas Wright (1711-1786) oli juuri kehittänyt ajatuksen keskustansa ympäri pyörivästä Linnunradasta, johon Aurinkokin kuuluu (*An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*, 1750). Myös hän spekuloi ajatuksella muista galakseista. Jan Hendrik Oort (1900-1992) osoitti Linnunradan pyörimisliikkeen differentiaaliseksi v. 1927.
- Vuorokausi pitenee noin sekunnin tuhannesosan sadassa vuodessa; vuorovesiefektin lisäksi myös ilmaston häiriöt vaikuttavat asiaan. Myös Kuun liikkeestä löytyi ominaisuuksia, joita edes Laplacen kehittyneet painovoimalaskut eivät selittäneet. Charles Delaunay (1816-1872) ratkaisi ongelman v. 1865 Kantin 'vuoksikitkan' avulla.

4.7 Lagrange (1736-1813)

Joseph Louis Lagrange vaikutti varsinkin mekaniikan kehitykseen (*Mécanique analytique*, 1788). Hän keksi viisi nk. 'Lagrangen pistettä', joissa massapiste saattoi pysyä paikoillaan suhteessa kahteen suurempaan massaan sen läheisyydessä (kyse on nk. 'rajoitetusta' kolmen kappaleen ongelmasta: jos kolmas massa on liian painava, ongelmaa ei voida ratkaista suljetussa muodossa). Hän vaikutti myös differentiaali- ja integraalilaskennassa ja lukuteoriassa. Nk. Lagrangen lauseellaan hän ennakoi ryhmäteoriaa.

- Lagrangen pisteiden (L1-L5) sovellutusalueeksi käy esim. Auringon, Maan ja avaruusluotaimen muodostama systeemi; Aurinkoa tutkiva SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory) on asettunut Maan ja Auringon väliseen L1-pisteeseen, ja MAP (Microwave Anisotropy Probe) tulee samalla janalla olevalle L2-pisteelle Maan taakse, Auringolta piiloon. Piste L3 on aina Maapallolta piilossa Auringon takana; tieteiskirjallisuudessa käytetty 'Planeetta X' voisi sijaita siellä elleivät kaikki kolme mainittua pistettä olisi epästabiileja (satelliitit pisteissä L1 ja L2 tarvitsevat säännöllisiä ratakorjauksia). Janan L3 - L1 - L2 ulkopuolella ovat eräissä (tyypillisissä) tilanteissa stabiilit pisteet L4 ja L5; esim. suurehkoja asteroideja on sijoittunut Aurinko-Jupiter -systeemissä ko. pisteisiin.
- Ryhmäteorian varsinaisena 'isänä' pidetään Évariste Galoisia (1811-1832); ala osoittautui myöhemmin tarpeelliseksi modernissa fysiikassa [ks. Gell-Mann].

4.8 Cavendish (1731-1810)

Cavendish määritteli gravitaatiovakion [ks. Newton] arvon kiertovaa'alla v. 1798: $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Näin hyvin heikko gravitaatiovoima astui laboratorioihin; aikaisemmat tutkimuksethan olivat perustuneet taivaanmekaniikkaan. Maan säteen [ks. Eratosthenes], heilurista saatavan gravitaatiokiihtyvyyden [ks. Huygens] ja G :n avulla Cavendish määritteli Maapallon massan (n. 6×10^{24} kg) ja edelleen sen tiheyden (n. 5.5 g/cm^3). Jälkimmäinen tulos, 5.5 kertaa veden tiheys, osoitti, että Maapallon sisuksen täytyi muodostua suhteellisen kevyttä (n. 3 kertaa veden tiheys) pintakerrosta tiheimmästä aineesta. Lisäksi oli ilmeistä, ettei Maapallo voinut olla ontto; tällaisellakin teorialla oli spekuloitu. [Cavendish vaikutti myös kemian puolella; ks. Hales.]

4.9 Herschel (1738-1822)

William Herschel löysi Uranuksen v. 1781 (ensimmäinen 'löydetty' planeetta), kaksi sen kuuta sekä uusia Saturnuksen kuita [ks. Huygens].

- Nk. Titiuksen-Boden laki ennusti, että ko. radalla voisi sijaita planeetta. Johann Titius oli keksinyt 1766 numeroleikin, joka 'selitti' tunnettujen planeettojen etäisyydet Auringosta, ja Johann Bode oli julkaissut sen 1772. Laki osoitti myös asteroidien paikan; Ceres löytyi v. 1801 Marsin ja Jupiterin väliseltä, tyhjäksi luullulta alueelta. Laki pettää kuitenkin Neptunuksen (löydettiin 1846) ja Pluton (1930) kohdalla, ja on todennäköisesti vailla tieteellistä pohjaa.

Herschel luetteloi ja tutki kaksoistähtiä ja sumuja. Hän huomasi, että taivaalla oli tähtipareja niin paljon, että kyse täytyi olla avaruudessa lähekkäin sijaitsevista tähdistä eikä vain sattumalta samassa suunnassa näkyvistä kohteista. Hän osoitti myös eräiden sumujen koostuvan tähdistä, kuten jo Galilei oli otaksunut.

- Nykyisin kaksoistähtiä arvioidaan olevan peräti 60-80% kaikista tähdistä. Tähtien liikettä toistensa ympäri voidaan havainnoida spektroskopisesti, Doppler-ilmiötä hyödyntämällä [ks. Doppler; Kirchhoff].
- Charles Messier (1730-1817) oli tehnyt ensimmäisen luettelon heikoista sumumaisista kohteista 1781. Herschel kasvatti Messierin n. sadan kohteen luettelon lähes kolmeen tuhanteen kohteeseen.

Herschel kartoitti myös galaksimme [ks. Kant] litistynyttä muotoa (*On the Construction of the Heavens*, 1785) ja löysi kaksi taivaankannen vastakkaisilla puolilla olevaa pistettä: tähdet liikkuvat nk. apeksista pois päin, kohti nk. antapeksia. Hän selitti ilmiön Auringon ominaisliikkeen avulla: olemme liikkeessä kohti Herkuleen tähdistössä sijaitsevaa apeksia (*On the motion of the Solar System in space*, 1783). Friedrich Wilhelm August Argelander (1799-1875) todisti myöhemmin Herschelin selityksen oikeaksi. Liikkeen nopeus on n. 20.1 km/s.

- Kantin tapaan Herschel spekuloi myös mahdollisuudella, että eräät sumut voisivat olla erillisiä galakseja. Lopulta hän tuli siihen tulokseen, että Linnunratamme on ainoa lajissaan; tämä väärä teoria säilyi pitkälle 1900-luvulle [ks. Hubble].

4.10 Laplace (1749-1827)

Pierre Simon de Laplace selitti pääteoksessaan *Mécanique céleste* (1799-1825, viisi osaa) aikaisempaa tarkemmin erilaisia painovoimaan liittyviä ilmiöitä, kuten planeettojen, kuiden ja komeettojen liikkeitä ja vuoroveden, ja osoitti Aurinkokunnan olevan stabiilin. Kyseessä on Newtonin *Principian* jälkeen merkittävin taivaanmekaniikasta kirjoitettu teos, joka sisälsi mm. potentiaalifunktion käsitteen; Laplacea on kutsuttu 'Ranskan Newtoniksi'.

- Valon äärellinen nopeus [ks. Rømer] antoi ymmärtää, että painovoima voisi vaikuttaa valoon. Laplace leikitteli ajatuksella, että riittävän tiivis ja massiivinen tähti voisi painovoimallaan vetää valonsa takaisin ennen kuin se olisi ehtinyt kovinkaan pitkälle [nykyisin puhumme mustasta aukosta, ks. Einstein]. John Michell (1724-1793) julkaisi — Laplacesta riippumattomasti — tällaisen idean jo 1783.

Aikaisemmin Laplace oli kehitellyt jo Kantin ehdottamaa ajatusta aurinkokuntien synnystä tiivistyvistä ja pyörivistä kaasupilvistä (*Exposition du système du monde*, 1796). Tämä nk. Kantin-Laplacen nebulaarihypoteesi sai tukea mm. William Parsons'in (Lordi Rosse; 1800-1867) tekemistä havainnoista eräiden sumujen spiraalirakenteesta [ks. Hubble].

Laplace kirjoitti myös todennäköisyyslaskennan perusteoksen *Théorie analytique des probabilités* (1812), jossa esitellään mm. integraalimuunnos ja kaikkien fyysikoiden tuntuma pienimmän neliösumman menetelmä.

Laplace esitti 1820-luvulla ajatuskokeen koskien maailman deterministisyyttä: jos tietäisimme kaikki sitä ohjaavat lait ja alkuehdot, olisiko mahdollista laskea tulevaisuus? Luonnontieteiden mukaan näin näytti olevan. Laplace itse esim. uskoi mittauksiin liittyvän tilastollisuuden olevan seurausta virheellisistä mittauksista.

- Nykyisin tiedämme, että klassisessa fysiikassakin vaikuttaa nk. deterministinen kaaos: pienikin muutos alkuehdoissa muuttaa lopputulosta erittäin paljon. Tämän seurauksena determinismistä (joka on metafysikaalinen käsite) ei seuraa ennustettavuutta (joka on tietoteoreettinen käsite). Vielä vähemmän determinismi antaa syitä fatalismiin. Deterministisenkään maailman tilastollisuutta ei tarvitse selittää pois mittausvirheillä. [Ks. myös Gell-Mann.]

Luku 5

Alkuaineet

1700-luvun loppupuolella vauhtia saanut kaasujen tutkimus johti aikaisempaa modernimman alkuaine-käsityksen syntyyn. Kehitykseen vaikutti aikaisemmin keksitty tyhjiö, jonka oletettua mahdottomuutta oli pitkään pidetty selvimpänä todisteena atomioppia vastaan. Käytännöllisellä puolella kehittyi myös laitteisto, jonka avulla kaasuja voitiin erotella ja kerätä talteen; kokeellisuus oli vielä tässä vaiheessa enemmän kemiaa kuin fysiikkaa kuvaava ominaisuus. Kaasujen tutkimuksella luotiin pohjaa etenkin lämpöopille eli termodynamiikalle, johon liittyi myös höyrykoneen kehitys. Tämä oli myöhemmin johtava kineettisen teorian ja statistisen fysiikan syntyyn (Luku 7).

Tutkimus, joka löysi jo viitteitä sähkön (Luku 6) merkityksestä atomimaaailmassa, huipentui alkuaineiden jaksollisen järjestelmän määrittelyyn. Syntynyt taulukko herätti kuitenkin enemmän kysymyksiä kuin vastauksia. Vaikka alkuaineet ja niitä vastaavat eripainoiset atomit oli löydetty, aineiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet eivät näillä tiedoilla vielä selittyneet (Luku 9).

5.1 Helmont (1577-1644)

Jan Baptist van Helmont postuloi ilmasta poikkeavien aineiden, kaasujen, olemassaolon löydettyään myöhemmin hiilidioksidina tunnetun aineen [ks. Empedokles]. Helmontin laboratoriomittaukset antoivat ensimmäiset viitteet aineen säilymislaista [ks. Lavoisier].

5.2 Pascal (1623-1662)

Evangelista Torricelli (1608-1647) määritteli ilmakehän paineen käsitteen ja keksi elohopeailmapuntarin v. 1643. Samalla luotiin myös tyhjiö, mikä herätti

huomiota, olihan mm. Descartes kieltänyt tyhjiön mahdollisuuden. Blaise Pascal vahvisti Torricellin ilmanpainehypoteesin ja osoitti, että ilmanpaine pienenee korkeuden funktiona [hän lähetti mittaaajansa vuorenrinteelle; vrt. Gay-Lussac]. Paineen yksikkö on nimetty pascaliksi (Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ (ilmanpaine merenpinnan tasolla on n. 101 kPa).

- Otto von Guericke (1602-1686) keksi tyhjiöpumpun ja demonstroi 1654 ilmakehän paineen vaikutuksen kuuluisalla kokeellaan: hevoset eivät saaneet puolipalloja erilleen niiden muodostaman pallon sisäisen tyhjiön vuoksi. [Guericke vaikutti myös sähkön tutkimuksen puolella; ks. Franklin.]
- John Mayow (1641-1679) osoitti ilman olevan kaasujen seoksen, ja että kaikki kaasut eivät olleet elämälle välttämättömiä [ks. Priestley].

5.3 Boyle (1627-1691)

Robert Boyle osoitti v. 1658, että metalliraha ja höyhen putoavat tyhjiössä samalla nopeudella ja että ääni tarvitsi edetäkseen väliaineen [ks. Galilei].

- Jo Marin Mersenne (1588-1648) mittasi äänen nopeutta ja määritteli karkeasti sen absoluuttisia taajuuksia. Nykyiset arvot: nopeus n. 331 m/s ja taajuudet 20 - 20 000 Hz (puhetaajuudet ovat n. 300 - 3400 Hz).

Teoksessaan *The Sceptical Chymist* (1661) Boyle kannatti atomiteoriaa, jonka antiikissa [ks. Demokritos] syntynyt muoto oli mm. Pierre Gassendin (1592-1655) ansiosta tullut uudelleen yleiseen tietoisuuteen. Hän määritteli alkuaineen aineeksi, joka voi muodostaa muiden aineiden kanssa yhdisteitä, mutta jota itseään ei voi jakaa muihin aineisiin. Vakavampi atomiteorian kehitys jatkui vasta 1800-luvulla [ks. Dalton].

Teoksessa *New Experiments* (1662) Boyle tutki termodynamiikaksi myöhemmin kutsuttua fysiikan alaa [ks. Black; Thompson]. Hän määritteli nk. Boylen lain, jolla oli merkitystä ideaalikaasun yhtälön [ks. Gay-Lussac] synnyssä. Boyle tutki myös kylmyyttä (*General History of the Air*, 1692).

- Boylen lain mukaan kaasun paine ja tilavuus ovat vakioämpötilassa käänteisesti verrannollisia suureita.
- Veden jäätyminen oli näihin aikoihin vaikuttaneen firenzäläisen Accademia del Cimenton päätutkimuskohde (*Saggi di Naturali Esperienze fatte nell'Accademia del Cimento*, 1657-1667). Kiinteiden aineiden lämpölaajeneminen tuli tutuksi, samoin kuin veden muista aineista poikkeava käyttäytyminen jäädytettäessä: vesi on tiheintä $+4^\circ\text{C}$ lämpötilassa.

5.4 Hales (1677-1761)

Stephen Hales kehitti laitteen, jonka avulla kaasuja pystyttiin vihdoinkin erottelemaan ja keräämään talteen. Myöhemmin Cavendish paranteli laitetta, ja mm. eristi sen avulla vetyä (H) v. 1766; hän käytti siitä termiä *'inflammable air'* [nykyinen nimi *hydrogène* eli veden muodostaja tulee Lavoisierilta].

5.5 Priestley (1733-1804)

Joseph Priestley poltti kynttilää ilmatiiviissä astiassa v. 1774 ja havaitsi palamisen 'pilaavan' ilman: pian sekä liekki että astiaan laitettu hiiri kuolivat. Astiaan laitettu mintunverso puolestaan 'puhdisti' ilman. Priestley päätteli kasvien tuottavan ennen tuntematonta kaasua, josta hän käytti nimeä *'dephlogisticated air'* mutta joka myöhemmin nimettiin hapeksi (O). Priestley löysi ja tutki myös monia muita kaasuja.

- Koska Priestley ei itse ymmärtänyt hapen olevan uuden alkuaineen, kunnia meni Lavoisierille, joka myös nimesi kaasun. Itse asiassa Karl Wilhelm Scheele (1742-1786) oli löytänyt hapen jo 1771, mutta ei saanut tuloksiaan julkisuuteen ennen kuin 1777.
- Georg Stahl (1660-1734) oli ehdottanut v. 1718 teoriaa, jonka mukaan palamisessa aineesta poistuu 'liekkimäinen' aineosa, *flogiston*.

5.6 Lavoisier (1743-1794)

Antoine Laurent Lavoisier selvensi kemian käsitteistöä ja toi tarkat mittaukset kemian tutkimukseen (*Traité élémentaire de chimie*, 1789); hän esim. muotoili aineen säilymislain suljetuissa kemiallisissa reaktioissa [ks. Helmont]. Eräät hänen tutkimuksensa liittyivät läheisesti Priestleyn löytöihin.

Lavoisier osoitti tarkoin punnituksin v. 1772, että aineen polttaminen ilmassa kasvatti sen painoa; palamisessa alkuperäisestä aineesta ei siis poistunut mitään [ks. Priestley]. Vähitellen hänelle selvisi, että happi on hyvin reaktiivinen aine ja palaminen on yhtymistä siihen.

Lavoisier päätteli n. 1776 muutamaa vuotta aikaisemmin löydetyn typen (N) olevan uuden alkuaineen. Hän käytti siitä nimeä *atsootti*, eloton, koska havaitsi sen olevan erittäin epäreaktiivisen (typpi on kuitenkin hapen tavoin elämälle välttämätön aine). Lavoisier osoitti ilmakehän tärkeimpien kaasujen olevan juuri typen (n. 79%) ja hapen (n. 21%).

Priestleyn hiirikoe oli yhdistänyt hapen hengitykseen; nyt hengitys voitiin liittää ruuan palamiseen. Eräät eliöiden tärkeimmistä energian lähteistä, 'polttoaineista', ovat hiilihydraatteja, jotka muodostuvat hiilestä (C), vedystä ja hapesta. Laplacen kanssa 1780-luvulla tehdyissä jääkalorimetrimittauksissa [ks. Black] Lavoisier päätteli hiilen palavan hitaasti hengityksessä ja vapauttavan energiaa. Hän yhdisti hapen myös ruostumiseen.

- Esim. ihmisten energiankulutusta erilaisissa työsuorituksissa tutkitaan nykyään mittaamalla hapenkulutusta.

5.7 Dalton (1766-1844)

John Dalton esitti atomihypoteesin v. 1803 [ks. myös Boyle]. Alkuaineet koostuivat kukin omista atomeistaan, jotka määräisivät myös aineen ominaisuudet. Kemialliset yhdisteet syntyivät eri aineiden atomien liittyessä toisiinsa. Teoksessa *A New System of Chemical Philosophy* (1808) Dalton listasi tunnettujen aineiden atomipainot suhteessa vetyatomiin.

- Teorian lähtökohtana oli havainto, että yhdisteessä eri alkuaineiden painojen suhde oli aina sama. Esim. vedelle, jonka Dalton oletti olevan muotoa HO, $m(\text{O}):m(\text{H}) = 8:1$. Todellisuudessa $m(\text{O}):m(2\text{H}) = 16:2 = 8:1$, mutta Daltonilla ei ollut vielä oikeaa molekyylikäsitettä, ja hän uskoi kunkin alkuaineen tuovan yhdisteeseen aina vain yhden atomin [ks. Gay-Lussac]. Samoin happi O_2 on todellisuudessa painavampi kuin vesi H_2O , mutta Daltonilla HO oli tietenkin painavampi kuin O!
- Muiden kemistien 'kemialliset atomit' olivat pitkään lähinnä heuristisia malleja, eivät Daltonin tai monien fyysikoiden [ks. Clausius] oletettomia todellisia hiukkasia.

5.8 Gay-Lussac (1778-1850)

Joseph Louis Gay-Lussac tutki kaasuja ja harrasti myös ilmailua: hän mittasi v. 1804 ilmapallolennollaan mm. ilmakehän koostumusta ja lämpötilaa korkeuden funktiona [ks. Pascal].

Gay-Lussac osoitti n. 1800, että kaasujen tilavuuden V muutos riippuu suoraan lämpötilan T muutoksesta, jos paine P pysyy vakiona, ja että paineen muutos on verrannollinen lämpötilan muutokseen, jos tilavuus pysyy vakiona. Näistä yhdessä Boylen lain kanssa syntyi empiirinen nk. ideaalikaasun yhtälö $PV = vakio \times T$.

- Jacques Charles (1746-1823) oli löytänyt edellisen lain itsenäisesti jo aikaisemmin. Hän oli myös valmistanut ensimmäisen vetytäytteen ilmapallon 1783.
- Mittauksista voitiin johtaa myös lämpötilan absoluuttinen nollapiste, ja yo. kaava onkin ilmaistu käyttämällä lämpötilan yksikkönä Celsiuksen [ks. Black] sijaan nk. Kelviniä [ks. Clausius], $T = t_c + 273.15$ (esim. veden kiehumispiste 100°C on 373.15 K).

Gay-Lussac havaitsi v. 1808, että kaasutilavuudet yhdistyvät keskenään yksinkertaisin kokonaislukusuhtein; esim. vesihöyryn tilavuus on kaksi kertaa niin suuri kuin siihen tarvittavan hapen tilavuus, mutta yhtä suuri kuin tarvittavan vedyn tilavuus. Amadeo Avogadro (1776-1856) esitti v. 1811 nimeään kantavan lain, jonka mukaan annetussa tilavuudessa, lämpötilan ja paineen pysyessä vakiona, on aina sama lukumäärä N kaasumolekyylejä. Hän oletti happimolekyylin jakautuvan kahtia veden muodostuessa [ks. Dalton].

- Ideaalikaasun lain muodossa $PV = kNT$ suure N on molekyylien lukumäärä, ja verrannollisuuseroin k nimettiin myöhemmin Boltzmannin vakioksi. Koska operointi molekyylien lukumäärällä on kömpelöä, määriteltiin moolin käsite siten, että $N = nN_A$, missä n on moolien määrä ja N_A nk. Avogadron luku. Nyt ideaalikaasun yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon $PV = nRT$, missä $R = kN_A$ on nk. yleinen kaasuvakio.
- 1850-luvulla Stanislao Cannizzaro (1826-1910) käytti Avogadron luvun ideaa atomi- ja molekyylipainojen suhteelliseen määrittämiseen; hänen ansiostaan viimein ymmärrettiin, että esim. happi esiintyy vapaana kaksiatomisena molekyylinä, O_2 ; tämä selitti em. molekyylin jakautumisen. Absoluuttisten massojen määrittäminen vaati Avogadron luvun ($n. 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) mittaamista [ks. Boltzmann; Einstein].

5.9 Berzelius (1779-1848)

Jöns Jakob Berzelius mittasi atomi- ja molekyylipainoja [ks. Dalton; Gay-Lussac], ja keräsi kaikki n. 2000 tulostaan teokseen *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité* (1819). Kehittyvän elektrolyysin [ks. Volta; Faraday] perusteella hän argumentoi kemiallisten sidosten olevan luonteeltaan sähköisiä. Työnsä yhteydessä Berzelius määritteli myös monet nykyiset kemian merkintätavat.

- Koska suhteelliset painot näyttivät olevan kokonaislukuja, William Prout (1785-1850) ehdotti 1816, että kaikki alkuaineet koostuisivat vetyatomeista. Myöhemmin painoissa havaittiin kuitenkin selviä poikkeamia tästä säännöstä [isotoopeista, ks. Thomson; Rutherford].
- Humphry Davy (1778-1829) oli löytänyt elektrolyysin avulla suolaliuoksista useita uusia alkuaineita.
- Koska atomien ydin-elektronit –rakennetta [ks. Rutherford; Bohr] ei vielä tunnettu, aikansa sähköoppia seuratessaan Berzelius ajautui etenkin orgaaniselle kemialle ongelmalliseen, liian yksinkertaiseen molekyylien sidosteoriaan. Hänen teoretisointinsa mm. esti näkemästä orgaanisille molekyyleille luonteista atomien ketjuuntumisen mahdollisuutta [ks. Kekulé].

Alkemistit olivat tienneet jo vuosisatoja, että materia jakaantuu kahteen ryhmään: toiset aineet säilyttävät ominaisuutensa kuumentamisen jälkeenkin, toiset eivät. Berzelius huomasi v. 1807, että jälkimmäiset aineet liittyivät elolliseen maailmaan, ja keksi termit orgaaninen ja epäorgaaninen aine.

- Havaittiin, että kemian lait olivat molemmille ainetyypeille samat. Orgaanisen kemian alku ajoitetaan vuoteen 1828, jolloin Friedrich Wöhler (1800-1882) valmisti orgaanista ainetta epäorgaanisesta. Wöhlerin ja hänen kollegansa Justus Liebigin (1803-1873) ansiosta ymmärrettiin, että orgaaniset aineet muodostuvat lähinnä vedystä, hapesta, typestä ja hiilestä.

Tutkimus paljasti eräiden kemiallisesti erilaisten aineiden omaavan samanlaisen alkuainerakenteen. Vuonna 1831 Berzelius nimesi ilmiön isomeriaksi: atomien järjestäytymisellä molekyyllissä oli vaikutusta aineen ominaisuuksiin. Ilmiö selittyi, kun hiilen merkitys orgaanisessa kemiassa selvisi [ks. Kekulé]. Stereoisomeriaksi [ks. Biot] kutsutussa ilmiössä samojen atomien erilainen avaruudellinen järjestys muuttaa vain aineen fysikaalisia ominaisuuksia.

5.10 Mendelejev (1834-1907)

Järjestelemällä tunnettuja alkuaineita atomipainojen mukaan Dimitri Mendelejev löysi niistä v. 1869 periodisuuden, jolla kemiallisesti samanlaiset aineet saatiin samaan ryhmään; syntyi nk. alkuaineiden jaksollinen järjestelmä. Vaikka Mendelejev ei itse uskonut atomien koostuvan pienemmistä osista [ks. Berzelius], ilmiön selitys tuli vaatimaan aivan uutta tietoa atomien sisäisestä rakenteesta [ks. Rutherford; Bohr].

- Havainto, että eräät kaasut esiintyivät kahden atomin molekyyleinä [ks. Guy-Lussac] auttoi taulukon laadinnassa, samoin kuin spektroskopian avulla löydetyt uudet alkuaineet [ks. Kirchhoff].
- Charles Darwinin (1809-1882) evoluutioteoria oli kaikkien tuntema, ja heräsi kysymys siitä, heijastiko löydetty periodisuus myös alkuaineiden evoluutiota [ks. Bethe; Hoyle].

Mendelejevin kaksi vuotta myöhempi versio järjestelmästä ennusti myös silloin tuntemattomien alkuaineiden olemassaolon ja ominaisuudet. Ennustukset toteutuivat vuosina 1875, 1879 ja 1886, ja yhä useampi tiedemies alkoi luottaa atomiteorian toimivuuteen.

- Luonnosta löytyy 92 erilaista alkuainetta, ja yli 20 raskasta, nk. transuraanista [ks. Fermi] alkuainetta on kyetty valmistamaan keinotekoisesti.

Luku 6

Sähkö

Samoihin aikoihin alkuaineiden määrittelyn kanssa kehittyi myös sähkön tutkimus: fysiikan tutkimuksen kokeellisuus korostui. Vaikka teollinen valkumous oli alkanut jo 1700-luvulla kemian teollisuuden ja teräksen työstön muodossa, sähköntuotanto toi fysiikan mukaan tähän kehitykseen ennen näkemättömällä tavalla.

Kävi ilmeiseksi, että magnetismilla ja sähköllä oli jotain tekemistä keskenään. Vähän myöhemmin myös valo (Luku 8) liitettiin kuvioon mukaan, samoin kuin aineen hienorakenne (Luku 9). Vasta jälkimmäinen löytö paljasti *mitä sähkö loppujen lopuksi on*.

6.1 Franklin (1706-1790)

Benjamin Franklin osoitti leijakokeillaan v. 1752 salaman olevan sähköisen ilmiön; samalla hän tuli keksineeksi ukkosenjohdattimen. Franklin määritteli sähkön yksikomponenttiseksi nesteeksi, jonka yli- tai alijäämä määräsi varauksen. Sähkövarauksen kaksinainen luonne ja siihen liittyvät veto- ja poistovoimat olivat jo siis tiedossa (ks. Kuva 6.1). Stephen Gray (1666-1736) oli v. 1729 jakanut aineita johteiksi tai eristeiksi niiden sähkönjohtokyvyn [ks. Ohm] mukaan.

- Guericke [ks. Pascal] oli rakentanut jo 1663 ensimmäisen hankaussähköä tuottavan koneen. Sähköä osattiin myös varastoida alkeellisiin kondensaattoreihin ('Leydenin pulloihin'), jotka Pieter van Musschenbroek oli keksinyt 1745. [Kemiallisesta paristosta, ks. Volta.]
- C. F. Du Fay (1698-1739) oli v. 1733 määritellyt sähkön kaksikomponenttiseksi nesteeksi.

Kuva 6.1: Magnetismin tavoin sähkössä havaitaan sekä veto- että poistovoimia. Tällä perusteella määriteltiin kaksi erilaista varaustyyppiä.

\oplus	\ominus	vetovoima
\oplus	\oplus	poistovoima
\ominus	\ominus	poistovoima

6.2 Coulomb (1736-1806)

Charles Augustin de Coulomb määritteli v. 1785 yhtälön — nk. Coulombin lain — pistemäisten sähkövarausten q_1 ja q_2 väliselle sähköstaattiselle voimalle, $F = kq_1q_2/r^2$ [vrt. Newton]. Hänen kunniakseen coulomb (C) tunnetaan nykyään sähkövarauksen yksikkönä.

6.3 Volta (1745-1827)

Alessandro Volta kehitti kemiallisen pariston [ks. Franklin] v. 1800 tutkijalla Luigi Galvanin (1737-1798) v. 1791 kokeita 'eläinsähköllä' [ks. myös Joule]. William Nicholson (1753-1815) ja Anthony Carlisle (1768-1840) hajottivat pariston avulla vettä vedyksi ja hapeksi jo samana vuonna; alkuaineet kerääntyivät tutkijoiden yllätykseksi pariston eri napoihin. Myös veteen liuotettuja muita aineita pystyttiin hajottamaan tämän elektrolyysiksi nimetyn prosessin avulla [ks. Berzelius; Faraday]. Voltan kunniaksi sähköjännitteen yksikön nimi on voltti (V).

6.4 Gauss (1777-1855)

Carl Friedrich Gauss oli eräs kaikkien aikojen suurimpia matemaatikkoja, joka tutki myös magnetismia ja sähköä. Nk. Gaussin laki yleisti Coulombin lain hyödyntämällä uusia kentän [ks. Faraday] ja vuon käsitteitä [ks. myös Maxwell].

Geofysiikassa Gauss rakensi ensimmäiset toimivat magnetometrit. Hän osallistui myös globaalin magnetometriketjun pystyttämiseen ja siitä saadun aineiston tulkitsemiseen. Vuosista 1830-1850 on käytetty nimeä 'The Magnetic Crusade', ja projektia oli vetämässä mm. Alexander von Humboldt (1769-1859). Mittaukset paljastivat sekä nk. magneettisten myrskyjen olemassaolon että niiden yhteyden auringonpilkkuihin [ks. Galilei].

- George Graham (1674-1751) oli löytänyt geomagneettisen aktiivisuuden 1722. Anders Celsius (1701-1744) ja Olof Hiorter havaitsivat yhteyden sen ja revontulten [ks. Halley] esiintymisen välillä 1741.

- Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) havaitsi 1843 auringonpilkkuihin liittyvän n. 10 vuoden jaksollisuuden. Rudolf Wolf (1816-1893) tarkensi keskiarvoiseksi periodiksi vähän yli 11 vuotta. Richard C. Carrington havaitsi 1858 pilkkujen sijainnin muuttuvan jakson aikana systemaattisesti; ilmiöön on myöhempien tutkijoiden mukaan liitetty Spoererin laki ja Maunderin perhosdiagrammi.

6.5 Ørsted (1777-1851)

Hans Christian Ørsted havaitsi v. 1820, että virtajohtimessa kulkeva virta vaikuttaa kompassin magneettiin [ks. Gilbert] ja että virtajohdin kokee magneettikentässä voiman, molemmat ilman fyysistä kontaktia. Sähköllä ja magnetismilla oli siis jokin yhteys. Painovoiman [ks. Newton] rinnalle alkoi näin muotoutua teoria luonnon toiselle, nk. sähkömagneettiselle, vuorovaikutukselle; tämä työ kulminoitui Maxwellin yhtälöihin puoli vuosisataa myöhemmin.

- Virran vaikutus magneettiin johti pian ensimmäisiin laitteisiin, joilla virran suuruutta voitiin mitata. Lisäksi Edwin H. Hall (1855-1938) löysi 1879 nk. Hallin ilmiön, magneettikentässä olevaan virtajohtimeen syntyvän pienen (poikittaissuuntaisen) potentiaalieron. Sen avulla voitiin tutkia mm. virran synnyttävien hiukkasten varausta ja tiheyttä, sekä esim. mitata magneettikenttää. Klaus von Klitzing sai ilmiön kvanttiluonnetta koskevista jatkotutkimuksista fysiikan Nobelin palkinnon 1985.

6.6 Ampère (1775-1836)

André Marie Ampère osoitti v. 1820 Ørstedin kokeesta kuultuaan, että kaksi rinnakkaista virtajohdinta vaikuttavat toisiinsa kuin magneetin navat: samansuuntaiset virrat aiheuttavat vetovoiman, vastakkaissuuntaiset poistovoiman. Nk. Ampèren laki, joka on Biotin ja Savartin lain yleistys, määritteli miten sähkövirta indusoi magneettikentän. (Liittäessään Ampèren lain yhtälöihinsä Maxwell lisäsi siihen muuttuvan sähkökentän indusoiman magneettikentän.) Ampeeri (A) tunnetaan nykyisin sähkövirran yksikkönä, eli pinnan läpi siirtyvän varauksen suuruutena aikayksikössä: $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$.

- Dominique François Jean Arago (1786-1853) kehitti 1820 ensimmäisen sähkömagneetin [ks. Henry]. Seuraavana vuonna hän osoitti indusoidun magneettikentän magnetoivan myös raudankappaleita. [Diamagnetismista, ks. Faraday; Curie ja Curie].

6.7 Ohm (1787-1854)

Georg Simon Ohmin määrittelemän nk. Ohmin lain mukaan laitteen yli vaikuttava sähköinen potentiaali U on suoraan verrannollinen sen läpi kulkevaan virtaan I , eli $U = RI$ (*Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*, 1827). Sähköisen vastuksen eli resistanssin R yksikkö ohm (Ω) on nimetty hänen mukaansa: $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$.

- Charles Wheatstone (1802-1875) kehitti resistanssin mittaamiseen nk. Wheatstonen sillan v. 1843. Pian menetelmää sovellettiin elektrolyyttien [ks. Volta; Faraday] 'molekylääriseen johtavuuden' mittauksiin [ks. Arrhenius]. Johtavuus on resistanssin käänteisluku.

6.8 Faraday (1791-1867)

Michael Faraday oli kemian ja kokeellisen fysiikan suuria nimiä. Hän löysi bentseenin [C_6H_6 ; ks. Kekulé] v. 1825 ja kehitti elektrolyysin lakeja [ks. Volta]. Hän aloitti myös modernin happojen ja emästen tutkimuksen havaittuaan, että veteen liuettuaan ne ovat elektrolyyttejä eli johtavat sähköä suolojen tapaan [ks. Arrhenius]. Hän teki myös kokeita, joilla perusteli sähkövarauksen säilymlakia. Nykyään faradi (F) tunnetaan kapasitanssin (varautumiskyvyn) yksikkönä; $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$.

- Boyle oli jo aikaisemmin kehittänyt tavan mitata aineiden happamuutta ja emäksisyyttä.
- Faraday havaitsi, että elektrolyysissä hajoavan kemiallisen yhdisteen määrä oli verrannollinen käytetyn sähkövirran suuruuteen ja käytettyyn aikaan.

Faraday havaitsi v. 1831, että muuttuvalla magneettikentällä voi tehdä (indusoida) sähkövirtaa. Keksintö mahdollisti sekä sähkömoottoreiden että -generaattoreiden valmistuksen. Mm. Werner von Siemens (1816-1892) kehitti sähkömoottoreita. Thomas Alva Edison (1847-1931) rakensi ensimmäisen sähkölaitoksen 1882. Laitos tuotti tasavirtaa, jota myös varhaiset sähkömoottorit käyttivät. Nikola Tesla (1856-1943) suunnitteli v. 1888 ensimmäisen käytännöllisen menetelmän vaihtovirran tuotannolle ja siirrolle sähkövoimälakäytössä.

- Yleisön edustaja: "Mitä hyötyä sähkömagneettisesta induktiosta voi olla?" Faraday: "Hyvä rouva, mitä hyötyä vastasyntyneestä vauvasta on?" Ministeri: "Mitä hyötyä sähköstä voi olla?" Faraday: "Sir, jonain päivänä voitte verottaa sitä".

- Tesla (T) on nykyisin magneettivuon [ks. Maxwell] tiheyden yksikkö; $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$. Aikaisemmin käytettiin myös gauss'ia, $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ [ks. Gauss].
- Induktiossa syntyvä sähkömotorinen voima riippuu magneettivuon aikaderivaatasta. H. F. Lenz täydensi 1834 Faradayn kaavaa voiman (syntyneen virran) suunnan määrittämiseksi. Kyseessä on itse asiassa energian säilymislain seuraus: induktio pyrkii vastustamaan sen synnyttävän magneettivuon muutosta.

Faraday havaitsi myös, että eristeet [ks. Franklin] kasvattivat kondensaattorin kapasitanssia. Vuonna 1845 hän erotteli para- ja diamagneettiset aineet [ks. Curie ja Curie]: edelliset vahvistavat sisällään ulkoista magneettikenttää, jälkimmäiset pienentävät sitä. Hän havaitsi, että magneettikenttä kykenee tietyissä oloissa kääntämään valon polarisaatiotasoa [ks. Young ja Fresnel; Biot]; tämä Faradayn rotaatioksi nimetty ilmiö sai hänet miettimään valon todellista luonnetta [ks. Maxwell].

Faraday käytti ensimmäisenä kentän [ks. Gauss] käsitettä selittääkseen sähkö- ja magnetismin ominaisuuksia; hän oletti kentän leviävän aaltomaisesti ja rajallisella nopeudella.

- Vuonna 1844 pitämässään esitelmässä Faraday laajensi kenttäkäsitettään tavalla, jonka voidaan sanoa enteilleen moderneja kvanttikenttäteorioita (Luku 12). Atomit olivat hänelle vain voimaviivojen keskitty-miä.

Faraday teki pioneerityötä myös kylmäfysiikan alalla, ja saavutti 163 K (-110°C) lämpötilan.

- Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) valmisti nestemäistä heliumia 1908 ja löysi suprajohtavuuden 1911; hän sai fysiikan Nobelin palkinnon 1913.

6.9 Henry (1797-1878)

Joseph Henry kehitti aikaisempaa paljon tehokkaamman sähkömagneetin [ks. Ampère] v. 1829, ja sovelsi sitä lankalennätimeen kaksi vuotta myöhemmin. Hän auttoi myös Samuel Morsea (1791-1872) tämän lennätinhankkeessa. Induktion yksikkö H on nimetty Henryn mukaan, $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$.

- Morsen laitteen ensimmäinen sanoma ("*What hath God wrought?*") välitettiin Washingtonin ja Baltimoren välillä 1844. Ensimmäinen kaapeli

laskettiin Atlantin poikki 1858. Lennättimen aika jäi suhteellisen lyhyeksi: Alexander Graham Bell (1847-1922) patentoi puhelimen 1876 ja pian sen jälkeen, 1888, keksittiin radioaallot [ks. Hertz].

Henry oli keksinyt tavan tehdä magneetilla sähköä jo v. 1830, mutta ei julkaissut tulostaan ja kunnia meni Faradaylle. Sen sijaan hän jäi historiaa itseinduktion keksijänä v. 1832; tästä kehittyi induktoriksi kutsuttu virtapiiri. Henry vaikutti myös muuntajien ja sähkömoottorin kehitykseen ja edisti meteorologiaa, jossa lennätin tarjosi uuden mahdollisuuden laajojenkin sääilmiöiden kartoitukseen.

Luku 7

Kineettinen teoria

Kiinteiden aineiden lämpölaajeneminen oli havaittu 1600-luvun puolivälissä. Termodynamiikka eli kaasun makroskooppisten ominaisuuksien (paine, lämpötila jne.) tutkimus oli alkanut kemistien alkuainetutkimuksilla 1700-luvulla (Luku 5). 1800-luvun puolenvälin tienoilla materian rinnalle syntyi toinen merkittävä suure, *energia*. Tämä johti erilaisten fysiikan haarojen lähestymiseen energian säilymislain kautta. Samalla havaittiin, että luonnonilmiöillä oli tietty, *entropian* määräämä, suunta.

Matematiikan kehittyessä syntyi myös nk. kineettinen teoria, jossa kaasun makroskooppiset ominaisuudet selitetään hiukkasten liikkeestä ja törmäilystä syntyneinä ominaisuuksina. Esimerkiksi lämpötila vastaa hiukkasjoukon keskimääräistä liike-energiaa, ominaisuutta jota yhdellä hiukkasella ei edes voi olla! Termodynamiikka vaikutti myös kvanttimekaniikan (Luku 10) syntyyn nk. mustan kappaleen säteilyä selitettäessä; tämä johtui siitä, että lämpösäteily todettiin sähkömagneettiseksi säteilyksi, joka oli kvantittunut (Luku 8). Myös todennäköisyyskäsitteen käyttö oli kineettiselle teorialle (oik. statistiselle fysiikalle) ja kvanttimekaniikalle yhteistä.

7.1 Bernoulli (1700-1782)

Daniel Bernoulli johti nimeään kantavan yhtälön, jonka mukaan mm. putkessa kulkevan nesteen nopeuden kasvua vastaa paineen lasku (*Hydrodynamica*, 1738). Hän kehitti myös kineettisen kaasuteorian alkeita ja pystyi mallinsa avulla mm. todistamaan Boylen lain; voidaan puhua varhaisesta termodynamiikasta.

7.2 Black (1728-1799)

Joseph Black erotti v. 1760 lämpötilan ja lämmön toisistaan: lämpö on jotain, joka siirtyy kuumemmasta materiasta kylmempään. Hänen työnsä pohjalta kehittyi nk. jääkalorimetri [ks. Lavoisier], jolla lämmön määrää mitattiin sen sulattaman jään määrällä. Ennen kuin lämpö selitettiin energian siirtymisenä [ja pitkälti sen jälkeenkin, ks. Thompson], kyseessä oletettiin olevan näkymättömän nesteen, jota kutsuttiin *kalorikiksi*.

- Rømer oli kehittänyt elohopealämpömittarin modernin version, ja Gabriel Fahrenheit (1686-1736) kopioi hänen ideansa kalibrointimenetelmää myöten 1714. Celsius kehitti myöhemmin celsius-asteikon.

Black määritteli myös lämpökapasiteetin, josta päädyttiin eri aineiden ominaislämpökapasiteetin käsitteeseen. Hän huomasi, että esim. jään sulaessa siihen tuotu lämpö ei nosta jään lämpötilaa, vaan kuluu faasimuutokseen kiinteästä nesteeksi; puhutaan latenttilämmöstä. Johannes Diederik van der Waals (1837-1923) tutki faasimuutosten fysiikkaa myöhemmin.

- Faasimuutos määritellään systeemin matalimman energiatilan makroskooppisen luonteen muutoksena. Se selittää myös aineen evoluutiota kosmologisella tasolla.

7.3 Thompson (1753-1814)

Benjamin Thompson yritti mitata 'lämpönesteen' [ks. Black] oletettua massaa, ja siinä epäonnistuttuaan päätteli lämmön liittyvän 'liikkeen' siirtoon (*Enquiry Concerning the Source of Heat Which Is Excited by Friction*, 1798). Teoria ei saanut yleistä hyväksyntää ennen energia-käsitteen [ks. Joule] ja kineettisen teorian [ks. Clausius] syntyä, ja osasyynä voidaan pitää lämpösäteilyä, jota pidettiin virheellisesti lämpönä [ks. Maxwell].

- Scheele [ks. Priestley] oli lanseerannut termin lämpösäteily 1777, ja Pierre Prevost esittänyt teorian säteilytasapainosta (*Observations sur la physique*, 1791). Vuonna 1800 löydettiin valon ja lämmittävän infrapunaisen säteilyn välille yllättävä yhteys [ks. Young ja Fresnel].

Thompson tutki itse mm. merivirtoja ja niihin liittyvää lämmön konvektiota [ks. Fourier].

7.4 Fourier (1768-1830)

Jean Baptiste Joseph Fourier johti lämmön johtumista kuvaavat differentiaaliyhtälöt 1700-luvun lopulla; matemaattisen fysiikan voidaan katsoa alkaneen teoksen *Théorie analytique de la chaleur* julkaisemisesta v. 1822.

- Samalla syntyivät Fourierin sarjoiksi kutsutut trigonometriset sarjat, mikä johti erittäin tärkeään matemaattisen fysiikan menetelmään, Fourierin analyysiin. 1900-luvulla keksittiin lukuisia tapoja nopeuttaa hyödylliseksi katsottua analyysiä; akronyymi FFT (*Fast Fourier Transformation*) tuli tutuksi.
- Georges Louis de Buffon (1707-1788) oletti planeettojen syntyneen komeetatörmäyksen johdosta Auringosta irronneesta kuumasta aineesta. Kokeissaan, joissa hän tutki eri materiaaleista valmistettujen pallojen jäähtymistä, Buffon johti Maapallon iäksi n. 75 000 vuotta. Kelvin [ks. Clausius], joka lähti samasta [väärästä; ks. Kant; Laplace] oletuksesta mutta käytti kokeiden sijaan Fourierin esittämää matematiikkaa, sai tulokseksi n. 100 miljoonaa vuotta. Todellinen ikä on tietenkin paljon suurempi [ks. Rutherford].

Thomas Graham (1805-1869) tunnetaan kaasujen diffuusiokokeistaan. Nk. Fickin laki molekyylien diffuusiolle on hyvin samanlainen kuin Fourierin kaava lämmön johtumiselle. Nykyään lämmön tiedetään siirtyvän paikasta toiseen kolmen ilmiön kautta: **(1)** konvektion avulla, so. aineen itsensä siirtymisen kautta (esim. merivirroissa), **(2)** johtumalla eli erillisen väliaineen kautta ja **(3)** säteilemällä, jolloin minkäänlaista väliainetta ei tarvita.

- Maxwell ja Boltzmann kehittivät kulkeutumislmiöille fysikaalisia malleja; edellinen selvitti myös säteilyn luonnetta [ks. myös Thompson; Young ja Fresnel].

7.5 Carnot (1796-1832)

Sadi Carnot tutki höyrykoneen toimintaa v. 1824. Carnot'ta on kutsuttu termodynamiikan 'isäksi', sillä hänen kehittämänsä ideaalikaasun [ks. Gay-Lussac] kiertoprosessi muodostaa alan toisen pääsäännön [ks. Clausius] perustan. Hän osoitti, että höyrykone toimii aina kahden lämpövaraston välillä, ja että varastojen välinen lämpötilaero määrää ideaalisen ('reversiibelin' eli ajan suunnasta riippumattomasti toimivan koneen) maksimaalisen hyötysuhteen. Vaikka todelliset koneet eivät saavuta tätäkään hyötysuhdetta, mitä suurempi lämpötilaero on, sen parempi hyötysuhdekin on.

- Carnot teki höyrykoneen teoriasta fysiikkaa; aikaisemmin etenkin James Watt (1736-1819) oli kehittänyt laitetta vähemmän teoreettiselta pohjalta. Tehon yksiköksi onkin valittu watti (W); $1 \text{ W} = \text{J/s}$.
- Termodynaamiset koneet hyödyntävät erilaisia kiertoprosesseja. Lämpövoimakoneet muuntavat lämpöä mekaaniseksi energiaksi; esim. Carnotin prosessi. Tästä alkoi myös polttomoottoreiden kehitys. Lämpöpumppu toimii toiseen suuntaan; esim. jääkaappi.

7.6 Joule (1818-1889)

James Joule määritteli termodynamiikan ensimmäisen peruslain v. 1847. Kyseessä on energian säilymlaki, joka osoitti nk. 1. lajin ikiliikkujan mahdottomaksi: eri energiamuotojen — esim. kineettisen energian, potentiaalienergian ja lämpöenergian — summa on suljetussa systeemissä vakio. Tässä yhteydessä kehittyi itse energiakäsitteen [ks. Huygens; Thompson] lisäksi myös matemaattiset kaavat energian eri muodoille. Myöhemmin Joule vaikutti kineettisen teorian [ks. Clausius] muotoutumiseen. Energian yksiköksi on valittu joule (J): $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{Ws}$.

- Vuoden 1840 nk. Joulen laki kuvasi sähkövirran ja lämpenemisen välistä suhdetta.
- Julius von Mayer (1814-1878) oli päätenyt energian säilymisen lakiin jo 1842. Hermann von Helmholtz (1821-1894) osoitti 1847 — edellisistä riippumatta — että eläinten lämpö ja lihasten toiminta olivat seurausta fysikaalisista ja kemiallisista voimista. Helmholtz mittasi myös (samakon) hermoimpulssien nopeutta [ks. Volta] ja tutki silmän toimintaa; hän oli siis varhainen biofysikko [ks. myös Kepler; Young ja Fresnel].

Energia korvasi voiman [ks. Newton] fysiikan tärkeimpänä suureena. Ymmärrettiin, että energialla on kyky tehdä työtä, eli se on muutettavissa voimavaikutukseksi; toisaalta työn avulla voidaan tuottaa energiaa.

7.7 Clausius (1822-1888)

Rudolf Clausius määritteli termodynamiikan toisen peruslain v. 1850-51 Carnot'n työn pohjalta: lämpö ei siirry ilman työtä kylmemmästä materiaasta kuumempaan. Toinen tapa sanoa sama asia on käyttää entropiaa eli lämmön ja lämpötilan suhdetta: entropia ei suljetussa systeemissä voi vähentyä [ks. myös Boltzmann, joka liitti entropian epäjärjestykseen]. Laki osoitti lämpöenergian

olevan erikoisasemassa: vaikka ensimmäisen peruslain mukaan kaikki energia on muutettavissa lämmöksi, toisen lain mukaan vain osa lämpöenergiasta on muutettavissa mekaaniseksi energiaksi. Tämä osoitti nk. 2. lajin ikiliikkujan mahdottomuuden ja teki eron reversiibelien (ajan suhteen käännettävien) ja irreversiibelien prosessien välille. Laki johti myös spekulatioihin maailmankaikkeuden rajallisesta iästä [ks. Gamow]. Clausiuksen lisäksi kehitykseen vaikutti myös William Thomson eli Lordi Kelvin (1824-1906).

- Jo roomalaiskauden lopulla kirkkoisä Augustinus oli kristinuskoon vedoten korostanut ajan lineaarisuutta ja alkua (antiikki oli suosinut syklistempää aikakäsitystä). Clausius kehitti ajatuksen maailmankaikkeuden tulevasta 'lämpökuolemasta', jossa maksimaalista entropiaa vastaa täydellisen homogeeninen ja kylmä avaruus.
- On syytä huomata, että entropian lisääntymisen laki on voimassa vain suljetussa systeemissä (esim. maailmankaikkeudessa) mutta ei Maapallolla, joka saa energiansa Auringosta: näin elämän synty täällä ei ole fyisiikan vastainen ilmiö.
- Walther Hermann Nernstin (1864-1941) v. 1906 määrittelemä kolmas peruslaki liittyy Kelvinin absoluuttiseen lämpötila-asteikkoon [ks. Gay-Lussac]: absoluuttisen asteikon nolllapisteen lämpötilaa ei voi saavuttaa. Nernst sai kemian Nobelin palkinnon 1920.

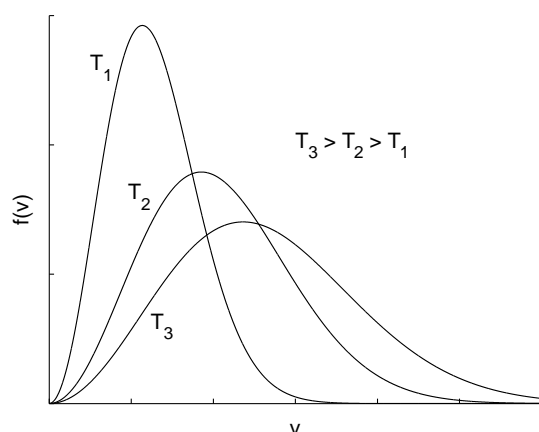
Clausius kehitti kaasujen kineettisen teorian matematiikkaa julkaisussaan *Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen* (1857) [ks. Bernoulli; myös Joule antoi oman panoksensa]. Kaasun makroskooppiset ominaisuudet (paine, lämpötila jne.) ovat hiukkasten liikkeestä syntyneitä emergeettejä ominaisuuksia: esimerkiksi lämpötila vastaa hiukkasjoukon keskimääräistä liikeenergiaa. Clausiuksen yksinkertaistetussa mallissa kaikilla kaasuhiukkasilla oli sama nopeus; Maxwell kehitti nopeusjakauman käsitteen myöhemmin [myöhemmästä teorian kehityksestä, ks. kuitenkin Boltzmann]. Myöhemmin Clausius otti käyttöön hiukkasten keskimääräisen vapaan matkan käsitteen, jolla pyrittiin selittämään molekyylien hidas diffuusio. Clausius oivalsi, että molekyylien tapauksessa kerääntyvä lämpöenergia ei siirry pelkästään etenevään liikkeeseen, vaan muuttuu osittain *sisäiseksi energiaksi* esim. molekyylien pyörimisen muodossa [ks. Pauling]. Tähän perustuen pystyttiin jopa erottelemaan yksi- ja kaksiatomisia kaasuja toisistaan [ks. Gay-Lussac; Rayleigh]. Fyysikot alkoivat kannattaa atomiteoriaa todellisuuden kuvana juuri kineettisen teorian antaman tuen perusteella [ks. Dalton].

- Clausius päätteli, että lämpöliikkeen vaikutuksesta esim. suolaliuoksessa syntyy spontaanisti ioneja; tämä selitti elektrolyysissä [ks. Faraday] hyvinkin pienellä jännitteellä syntyvän virran. Kun liuosten om-

inaisuuksia selitettiin kineettisen teorian avulla, oltiin jo fysikaalisen kemian [ks. Arrhenius] alkulähteillä.

7.8 Boltzmann (1844-1906)

Ludwig Boltzmann kehitti merkittävällä tavalla kaasujen kineettistä teoriaa [ks. Clausius]. Maxwell oli jo ottanut käyttöön hiukkasten nopeusjakauman käsitteen ja tarkastellut matemaattisesti myös makroskooppisia aineen, energia ja liikemäärän kulkeutumislmiöitä [ks. Fourier], joihin kuuluvat mm. molekyyliden diffuusio lämmön johtuminen ja aineen sisäinen kitka eli viskositeetti; nämä kaikki olivat myös Boltzmannille tärkeitä tutkimuskohteita. Todennäköisyyksistä ja siten myös tilastotieteestä oli vähitellen tulossa fysiikassa tärkeä työkalu; syntyi nk. statistinen fysiikka [ks. myös Heisenberg ja Schrödinger].



Kuva 7.1: Maxwellin-Boltzmannin jakaumia eri lämpötiloilla. Jakauman huippukohta, joka edustaa todennäköisintä hiukkasen nopeutta, siirtyy kohti suurempia nopeuksia lämpötilan noustessa.

Vuonna 1868 Boltzmann tarkensi Maxwellin esittämän kaavan molekyyliden nopeusjakautumalle (ks. Kuva 7.1): näin syntyi Maxwellin-Boltzmannin nimeä kantava yhtälö, joka otti huomioon myös hiukkasten keskinäisiä vuorovaikutuksia ja ulkoisia voimia, kuten gravitaation. Hän osoitti sen olevan kaikkein todennäköisimmän jakauman, johon muut jakaumat pyrkivät. Esimerkiksi em. kulkeutumislmiöt ovat irreversiibelejä ja vaativat tapahtuakseen tilastollisen epätasapainotilan. Lisäksi Boltzmann määritteli entropian todennäköisyyden (logaritmiseksi) mitaksi eli epäjärjestykseksi. Todennäköisyydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä niiden tapojen lukumäärää, joilla molekyylit voivat järjestäytyä ilman makroskooppisten ominaisuuksien muutoksia. Termodynamiikan toisen lain mukaan luonto suosii epäjärjестystä.

- Esimerkiksi lämmön johtuminen [ks. Fourier] selittyi hiukkasten liikeenergian välittymisenä hiukkasilta toisille.

- Nk. Boltzmannin vakio [ks. Gay-Lussac] liittää kaasuhiukkasten keskimääräisen kineettisen energian kaasun lämpötilaan ja todennäköisyyden entropiaan.
- Myöhemmin entropia on liitetty myös informaatioon. Lisäksi todennäköisyystulkintaa on pyritty korvaamaan nk. 'algoritmisella satunnaisuudella'.

Boltzmann tutki myös mustan kappaleen säteilyä [ks. Kirchhoff; Rayleigh], ja v. 1884 hän osoitti teoreettisesti säteilyn vuon olevan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Koska Joseph Stefan (1835-1893) oli löytänyt saman riippuvuuden kokeellisesti v. 1879, lakia kutsutaan nykyään joko Stefanin laiksi tai Stefanin-Boltzmannin laiksi.

Luku 8

Sähkömagneettinen säteily

Vaikka Newton oli löytänyt valkoisen värin spektrin (Luku 4), valon ominaisuuksista tiedettiin vähän lukuunottamatta sen rajallista nopeutta. Newton ja Hooke olivat toki molemmat tehneet linssillä kokeita, jotka paljastivat Newtonin renkaina myöhemmin tunnetun interferenssikuvion. Valitettavasti edes valon aaltoluonnetta kannattanut Huygens ei ollut osannut käsitellä havaintoja systemaattisesti.

1800-luvulla valon tutkimus sai uutta tuulta alleen, ja johti lopulta nk. sähkömagneettisen aaltoteorian syntyyn. Teoria on yksi fysiikan suuria merkkipaaluja, selittihän se niinkin perustavaa laatua olevan kysymyksen kuin *mitä valo on* ja mahdollisti radioaaltojen keksimisen. Lisäksi uusi fysiikan analyysimenetelmä, spektroskopia, paljasti erikoislaatuisia asioita aineen ominaisuuksista (Luku 9). Samalla lämpösäteilyn ominaisuudet viittasivat yllättäen sähkömagneettisen säteilyn hiukkasluonteeseen; tällä oli kauaskantoisia seuraamuksia (Luku 10).

8.1 Rømer (1644-1710)

Olaus Rømer mittasi valon nopeuden v. 1676 Jupiterin kuiden pimennysten avulla ja sai arvoksi 224 000 km/s. Oikea arvo on 299 792 km/s, eli suuruusluokka oli aivan oikein. Äärellinen nopeus yhdistettynä oletettuun valon hiukkasluonteeseen johti ensimmäisiin spekulatioihin mustista aukoista [ks. Laplace].

- Esimerkiksi Auringon valolta menee n. 8 minuuttia saapua Maahan [ks. Huygens]. Ensimmäiset tarkat laboratoriokokeet valon nopeuden mittaamiseksi tehtiin 1800-luvulla [ks. Michelson].

- Tähtitieteessä valon äärellinen nopeus yhdistettynä havaitsijan liikkeeseen johtaa taivaankappaleiden näennäisen paikan muutokseen, aberratioon. James Bradley (1692-1762) keksi Maan rataliikkeen aiheuttaman vuotuisen aberration 1728. Bradley keksi myös maan akselin prekessioon [ks. Hipparkhos; Brahe] liittyvän nutaation 1747.

8.2 Young (1773-1829) ja Fresnel (1788-1827)

Thomas Youngin tulokset valon interferenssistä (nk. kahden raon koe) v. 1802 osoittivat Huygensin olleen oikeassa: valo oli aaltoilmiö. Young pystyi jopa määrittelemään sen aallonpituudeksi miljoonasosametrim. Augustin Jean Fresnelin kehittämä matemaatiikka selitti Youngin tuloksia v. 1818.

- Herschel oli löytänyt v. 1800 Auringon spektrin punaisen reunan takaa voimakkaasti lämmittävää [ks. Thompson] näkymätöntä säteilyä, joka nimettiin infrapunaiseksi säteilyksi. Seuraavana vuonna Johann Ritter (1776-1810) löysi ultravioletin alueen, jonka säteily tummensi hopeanitraatin näkyvän valon tavoin. Ultravioletti (UV) alue kattaa aallonpituudet 10 - 400 nm, infrapuna (IR) 700 nm - 1 mm. Väliin jäävä alue, 400 - 700 nm on ihmissilmin näkyvää valoa; Youngin arvio oli siis noin kaksikertainen oikeaan arvoon verrattuna.

Huygens oli postuloinut pitkittäisen valoallon, mutta Young ja Fresnel argumentoivat (Young 1817 hieman epäröiden ja Fresnel 1821 vakuuttavammin) sen olevan poikittaista aaltoliikettä kohtisuorassa etenemissuuntaan nähden: tämä selitti esim. valon polarisaatioilmiön, mutta ei esim. Faradayn magneettikenttäkoetta [ks. myös Biot]. Kumpikaan ei siis osannut sanoa, mikä valossa aaltoili; vastauksen antoi myöhemmin Maxwell yhtälöineen.

- Étienne Stephen Louis Malus (1775-1812) oli raportoinut 1808, että heijastunut valo oli polarisoitunutta, ja David Brewster (1781-1868) kehitti 1815 nimeään kantavan lain kuvaamaan ilmiöön liittyviä kulmia.
- Instrumentalismia kannattavien tieteen filosofien mielestä Youngin ja Fresnelin tulokset osoittavat, miten täysin väärä teoria pystyy selittämään mittaustuloksia. Tulkinta on väärä: **(1)** Eetterin [ks. Huygens] käsite ei näytellyt ratkaisevaa roolia selvityksessä. **(2)** Sähkömagnetismi [ks. Maxwell] ei kumonnut teoriaa vaan selitti, miksi se toimi. **(3)** Kvanttifysiikka [ks. Planck; Einstein] osoitti vain, että kyseessä oli vielä puutteellinen osatotuus.

Young ehdotti myös, että värinäkö perustui kolmen päävärin näkemiseen ja sekoittumiseen muiksi väreiksi. Helmholtz [ks. Joule] jatkoi näitä tutkimuksia

myöhemmin, ja usein puhutaankin Youngin-Helmholtzin teoriasta. Nykyisin tiedämme, että silmä näkee päävärit kolmenlaisten nk. tappisolujen avulla; hämäränäkö perustuu sauvasoluihin.

8.3 Biot (1774-1862)

Jean Baptiste Biot tunnetaan parhaiten valon [ks. Young ja Fresnel] polarisaatiotutkimuksistaan: v. 1815 hän osoitti, että mm. eräiden sokeriliuosten läpi kulkenut tasopolaroitunut valo käänsi polarisaatiosuuntaansa [vrt. Faraday]. Tällä nk. stereoisomerialla [ks. Berzelius] oli mitä ilmeisemmin jotain tekemistä molekyylien rakenteen kanssa [ks. Kekulé; Pauling].

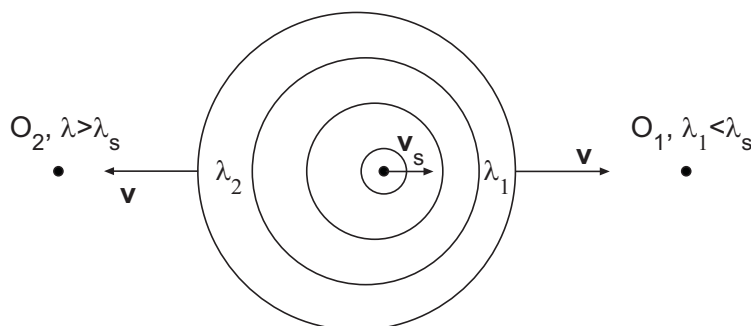
8.4 Fraunhofer (1787-1826)

Joseph von Fraunhofer oli merkittävä optisten instrumenttien suunnittelija ja fyysikko. Parhaiten hänet tunnetaan ensimmäisestä diffraktiohilasta, jolla valo saatiin prismaa paremmin osiinsa spektroskooppista tutkimusta varten [ks. Newton]. Hän valmisti lopulta hiloja, joihin oli timantilla kaiverrettu tuhansia rakoja tuumaa kohti [ks. Young ja Fresnel]. Instrumenttiensa avulla Fraunhofer kartoitti 1814 Auringon spektrin tummia, nk. Fraunhoferin viivoja, joita tultiin myöhemmin käyttämään alkuaineiden 'sormenjälkinä' esim. Auringon ja tähtien ilmakehää tutkittaessa [ks. Kirchhoff].

- Andreas Sigismund Marggraf (1702-1782) oli raportoinut jo 1758, että natriumin ja kaliumin suolat tuottivat erivärisen liekin. Tarkemmassa tutkimuksessa Thomas Melvill erotti spektreistä kirkkaita nk. emissioviivoja. William Hyde Wollaston (1766-1828) havaitsi 1802 Auringon jatkuvassa spektrissä tummia nk. absorptioviivoja.
- Vielä ei tiedetty mitä aineessa tapahtuu absorptiossa ja emissiossa, mutta selityksen löydyttyä 1900-luvulla spektriviivojen analyysi tuli paljastamaan yksityiskohtaista tietoa atomien ja molekyylien rakenteesta.

8.5 Doppler (1803-1853)

Christian Doppler argumentoi, että valon aaltoluonteen johdosta toistensa ympäri pyörivien kaksoistähtien [ks. Herschel] värien pitäisi muuttua jaksollisesti: lähestyessään ne näkyisivät sinisempinä, etääntyessään punaisempina (*Über das farbige Licht der Doppelsterne*, 1842). Idea ei toiminut spektrin



Kuva 8.1: Dopplerin efektin vaikutus nopeudella \mathbf{v}_s liikkuvan lähteen edessä (O_1) ja takana (O_2) oleviin havaitsijoihin: edellinen näkee aallonpituuden pienempänä (taajuuden suurempana), jälkimmäinen suurempana (taajuuden pienempänä) kuin lähteen aallonpituus λ_s todellisuudessa on.

jatkuvan luonteen takia, mutta ääniaalloilla tämän nk. Dopplerin efektin mittasi Christoph Buys Ballot (1817-1890) v. 1845 (ks. Kuva 8.1). Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) ehdotti 1848, että efekti voisi näkyä tähtien Fraunhoferin viivojen siirtymänä, ja 1868 tämä pystyttiin myös todentamaan [ks. Kirchhoff]. Doppler-ilmiö aiheuttaa myös spektriviivojen levenemistä lämpöliikkeessä olevista kohteista, mikä häiritsee spektroskooppisten mittausten yleistä tarkkuutta. Sillä on merkitystä myös kosmologiassa [ks. Hubble].

8.6 Kirchhoff (1824-1887)

Gustav Robert Kirchhoff kehitti spektroskopiaa [ks. Fraunhofer] ja sovelsi sitä ensimmäisenä kemialliseen analyysiin; seurauksena oli usean uuden alkuaineen löytyminen [ks. Mendelejev]. Kirchhoff ja Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) osoittivat 1859, että kullakin kemiallisella alkuaineella oli oma spektrinsä [ks. Bohr], joka näkyy samanlaisena sekä emissio- että absorptiomittauksissa. Tutkijat mittasivat myös spektriviivojen paikkoja eli niiden aallonpituuksia, ja tarkkuuden parantuessa vedyn spektrissä havaittiin v. 1887 hienorakennetta. Vaikka pääviivojen paikat voitiin sovittaa yksinkertaiseen matemaattiseen kaavaan, vasta uusi atomimalli ja kvanttimekaniikka pystyivät selittämään viivoja fysikaalisesti [ks. Bohr; Heisenberg ja Schrödinger].

- Anders Jonas Ångström (1814-1874) mittasi vedyn neljän tunnetun spektriviivan tarkat aallonpituudet 1860, ja Johann Jakob Balmer (1825-1898) sovitti tulokset 1885 matemaattiseen kaavaan. Robert Johannes Rydberg (1854-1919) kehitti kaavaa eteenpäin 1890. Näkyvällä aallonpituudella sijaitsevan Balmerin sarjan lisäksi vedyn spektristä löydettiin

ultravioletilta alueelta nk. Lymanin sarja ja infrapunaiselta alueelta Paschenin, Brackettin ja Pfundin sarjat Rydbergin kaavan osoittamilta paikoilta.

Kirchhoff osoitti, että Fraunhoferin löytämät viivat Auringon spektrissä johtuivat säteilyn absorboitumisesta samanlaisiin alkuaineisiin kuin mitä Maastakin löytyi. Valon analysoiminen kertoi tärkeitä asioita sen lähteen olemuksesta: astrofysiikka oli syntynyt.

- Ångström löysi 1862 spektroskooppisin menetelmin vetyä Auringon ilmakehästä (*Recherches sur le spectre solaire*, 1868). Pierre Janssen (1824-1907) ja Joseph Norman Lockyer (1836-1920) löysivät 1868 tuntemattoman — jälkimmäisen heliumiksi nimeämän — aineen Auringon koronan spektristä [ks. Rayleigh].
- William Huggins (1824-1910) esitti 1863 spektroskooppisiin mittauksiin nojaten, että myös tähdet koostuvat alkuaineista, joita löytyy Maasta ja Auringosta: aine oli todellakin kaikkialla samanlaista! Seuraavana vuonna Huggins havaitsi, että eräät tähtitaivaan sumut ovat hehkuvaa kaasua, eivät tähtijoukkoja [ks. Kant]: niiden spektri oli emissiospektri, ei absorptiospektri kuten tähdillä. Hän teki myös ensimmäiset mittaukset kaksoistähtien Dopplerin efektistä 1868. Henry Draper vangitsi 1872 ensimmäisenä tähden — Vegan — spektrin valokuvauslevylle; myöhemmin spektroskopia paljasti tähtien myös poikkeavan hieman toisistaan [ks. Rayleigh; Eddington].

Edellä kuvattu spektroskopia perustuu diskreetteihin spektriviivoihin. Aurinko on kuitenkin jatkuvaa säteilyspektriä emittoiva kuuma kappale, jota ympäröi 'viileämpi', tummat absorptioviivat tuottava kaasukehä. Tutkissaan v. 1860 mustan kappaleen (approksimatiivisesti myös tähden) jatkuvaa säteilyspektriä Kirchhoff havaitsi sen intensiteetin riippuvan vain tutkitusta aallonpituudesta ja lämpötilasta. Tarvittiin Planckia ja kvanttimekaniikan ensimmäisiä askeleita ennen kuin ilmiö selitettiin [ks. myös Boltzmann; Rayleigh; Bohr].

8.7 Maxwell (1831-1879)

James Clerk Maxwell kokosi edeltäjiensä [Gauss, Ampère ja Faraday] sähköä ja magnetismia koskevat tulokset nk. Maxwellin yhtälöiksi (*Treatise on Electricity and Magnetism*, 1873). Yhtälöt määrittivät uuden sähkömagneettisen kentän käsitteen, ja tätä pidetään usein modernin fysiikan alkuna. Viimeistään nyt Newtonin painovoiman rinnalle oli määritelty toinen luonnon perusvuorovaikutus [ks. Ørsted]. Yhtälöitä kirjoittaessaan Maxwell ennakoi myös vektoreilla tehtävää monimutkaisempaa laskentaa.

- Josiah Willard Gibbs (1839-1903) oli vektorianalyysin merkittävin kehittäjä (*Elements of Vector Analysis*, 1881-1884). Oliver Heaviside yksinkertaisti Maxwellin yhtälöitä v. 1885 vektoriesityksen avulla.

Maxwellin teorian antama sähkömagneettisen säteilyn nopeus on vakio ja sama kuin valon nopeus: näkyvä valokin on siis sähkömagneettista säteilyä (*The Electromagnetic Theory of Light*, 1868). Kokeellisesti havaittu valon aaltoluonne [ks. Young ja Fresnel] sai näin selityksensä, samoin kuin Faradayn havaitsema polarisaatiotason kiertyminen magneettikentässä. Radioaaltojen [ks. Hertz] keksiminen vakuutti viimeisetkin Maxwellin teorian epäilijät.

- Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) oli v. 1856 osoittanut, yhdessä Rudolph Kohlrauschin (1809-1858) kanssa, että sähkömagnetismissä käytetyistä vakioista saattoi muodostaa luvun, joka oli epäilyttävän lähellä valon nopeuden arvoa; tämän — ja Faradayn spekulatioiden — innoittamana Maxwell lähtikin etsimään ilmiön teoreettista selitystä. Weber on saanut nimensä magneettikentän vuon (Wb) yksikköön; $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$.
- Edeltäjiensä tavoin Maxwell oletti säteilyn etenemisen vaativan väliaineen, eli tyhjiönkin tulisi olla salaperäisen 'eetterin' täyttämän. Hän keksi kuitenkin kokeen, jolla eetteriteoriaa voitiin myös testata [ks. Michelson].
- Myöhemmin säteilyn synty selitettiin hiukkasten — elektronien, atomien ja molekyylien — energiatilon muutoksina [ks. Bohr]. Lämpösäteilykin [ks. Thompson] osoittautui jatkuvaksi [ks. Kirchhoff] sähkömagneettiseksi säteilyksi lähinnä infrapunaisella [ks. Young ja Fresnel] alueella.

Maxwell kehitti v. 1859 myös kaasujen kineettistä teoriaa [ks. Clausius] ottamalla käyttöön hiukkasten nopeusjakauman [ks. Boltzmann]. Hän ehti myös osoittamaan matemaattisesti, että Saturnuksen renkaat [ks. Huygens] eivät voi olla kiinteät, vaan koostuvat pienistä kappaleista.

- Edouard Roche (1820-1883) oli laskenut jo 1848, että kuut voivat hajota vuorovesivoimien vaikutuksesta kappaleiksi joutuessaan liian lähelle planeettaa.

8.8 Rayleigh (1842-1919)

John William Strutt Rayleigh sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1904 jalokaasujen löytäjänä. Hän tutki myös mm. optiikkaa ja mustan kappaleen lämpösäteilyä.

Rayleigh johti v. 1871 kaavan valon sironnalle sen aallonpituutta [ks. Young ja Fresnel] paljon pienemmistä hiukkasista; tulos selittää mm. miksi taivas on sininen ja auringonlasku punainen. Hänet tunnetaan myös kriteeristä optisten instrumenttien resoluutiolle, jota valon diffraktio huonontaa.

- Rayleighin sironnassa säteilyn aallonpituus ei muutu. Smekal osoitti teoreettisesti 1923 ja Chandrasekhara Venkata Raman (1888-1970) ja Krishnan kokeellisesti 1928 sitä muuttavan nk. Ramanin ilmiön olemassaolon. George Gabriel Stokesin (1819-1903) mukaan puhutaan aallonpituuden kasvaessa Stokesin sironnasta, pienentyessä anti-Stokesin sironnasta. Raman sai löydöstään fysiikan Nobelin palkinnon 1930.

Argoniksi nimetyn kaasun jäljille Rayleigh pääsi v. 1888. Myöhemmin samantaisia, kemiallisesti epäaktiivisia (argon tulee kreikan sanasta 'laiska') kaasuja löydettiin muitakin. Kineettisen teorian [ks. Clausius; Boltzmann] avulla jopa osoitettiin, että nämä jalokaasuiksi nimetyt aineet esiintyvät muista ilmakehän kaasuista poiketen yhden atomin molekyyleinä [ks. Gay-Lussac].

- Rayleigh teki löytönsä yhdessä kemisti William Ramsayn (1852-1916) kanssa; tämä sai jatkotutkimuksistaan kemian Nobelin palkinnon v. 1904. Ramsay mm. eristi aikaisemmin vain Auringossa havaittua heliumia [ks. Kirchhoff] eräästä mineraalista v. 1895.

Wilhelm Wien (1864-1928) oli esittänyt 1896 kaavan, nk. Wienin säteilylain, mustan kappaleen [ks. Kirchhoff] säteilyspektrille. Rayleigh havaitsi siinä ongelman 1900 ja ehdotti korjausta, joka toimi hyvin etenkin suurilla aallonpituuksilla; pienillä aallonpituuksilla Wienin kaava sopi mittauksiin yhä paremmin. Koska James Jeans (1877-1946) teki Rayleighin kaavaan pienen korjauksen, sitä kutsutaan nykyään Rayleighin-Jeansin kaavaksi. Wienin ja Rayleighin-Jeansin kaavoilla oli merkitystä kvanttimekaniikan synnyssä [ks. Planck]

- Wienin nk. siirtymälain mukaan kappaleen lämpötilan ja spektrin huipun aallonpituuden tulo on vakio: huippu siirtyy kohti pidempiä aallonpituuksia lämpötilan laskiessa. Menetelmällä voidaan mm. arvioida tähtien lämpötiloja niiden värin perusteella [ks. myös Eddington]. Wien sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1911.

8.9 Michelson (1852-1931)

Albert Michelson kehitti interferometriaa ja teki tarkkoja valon nopeuden mittauksia [ks. Rømer]; hänelle myönnettiin fysiikan Nobelin palkinto v. 1907.

- Fizeau [ks. Doppler] oli tehnyt ensimmäiset valon nopeuden mittaukset laboratorio-oloissa.

Aikalaistensa tavoin Michelson oletti valoaaltojen liikkuvan eetterissä. Vuonna 1887 hän yritti mitata interferometrin avulla valon nopeutta Maan rataliikkeen ja sitä vastaan kohtisuoran suunnan suhteen [ks. Maxwell]. Newtonilaisessa maailmassa nopeuksissa tulisi näkyä ero, mutta tämä ns. Michelsonin-Morleyn koe 'epäonnistui': valon nopeus oli vakio havaitsijan liikkeestä riippumatta [ks. Einstein].

8.10 Hertz (1857-1894)

Heinrich Rudolf Hertz löysi nk. valosähköisen ilmiön ja todisti sähkömagneettisen säteilyn [ks. Maxwell] olemassaolon. Taajuuden yksikkö (Hz) on nimetty hänen mukaansa; $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Klassiselle fysiikalle oudon nk. valosähköisen ilmiön Hertz löysi v. 1887. Philipp Lenard (1862-1947) tutki ilmiötä lisää v. 1902, ja hänelle myönnettiin fysiikan Nobelin palkinto 1905. Ilmiössä, joka selitettiin myöhemmin sähkömagneettisen säteilyn kvantittumisen [ks. Planck] avulla [ks. Einstein], valon taajuuden täytyy ylittää tietty alaraja, jotta se kykenee irrottamaan elektroneja metallin pinnalta. Taajuuden edelleen korotus lisää irronneiden elektronien energiaa, mutta ei niiden määrää; siihen vaikuttaa vain valon intensiteetin kasvattaminen.

Hertz todisti Maxwellin teorian sähkömagneettisesta säteilystä luomalla radioaaltoja v. 1888. Radioaaltojen aallonpituus on (määritelmällisesti) suurempi kuin 30 cm [ks. Young ja Fresnel]. Hertzille kyse oli perustutkimuksesta, eikä hän uskonut löydöllä olevan käytännön sovellutuksia; kuitenkin elektroniikan [ks. Thomson] kehitys mahdollisti keksinnön hyödyntämisen sekä radion että mm. tutkan muodossa.

- J. H. Poynting oli määrittellyt säteilyyn liittyvän energian suuruuden ja suunnan jo v. 1884.
- Guglielmo Marconi (1874-1937) kommunikoi 1901 radioaaltojen avulla Atlantin yli. Hän sai fysiikan Nobelin palkinnon (yhdessä Karl Braunin kanssa) 1909 juuri langattoman lennättimen [ks. Henry] rakentamisesta. Christian Hülsmeier (1881-1957) teki ensimmäiset lyhyiden radioaaltopulssien matka-aikaan perustuvat etäisyysmittaukset 1904.
- A. E. Kennelly ja O. Heaviside ehdottivat toisistaan riippumatta 1902, että Marconin radiolähetyksen oli mahdollistanut yläilmakehän sähköä johtava kerros. Maanpinnalla mitatusta magneettikentästä [ks. Gauss]

olikin erotettu kaksi toisistaan riippumatonta komponenttia: hitaasti muuttuva Maan sisäinen dipolimomentti [ks. Gilbert] ja nykyisin ionosfäärinä tunnettu yläilmakehän osa, johon Auringon aktiivisuus [ks. Langmuir] vaikuttaa. Radioaaltoihin vaikuttaa n. 100 km:n korkeudessa oleva nk. E-kerros.

8.11 Röntgen (1845-1923)

Wilhelm Conrad Röntgen löysi röntgensäteilyn v. 1895 nk. katodisäteitä tutkiessaan; myöhemmin selvisi, että säteily syntyi energieettisten elektronien pommittaessa materiaa [ks. Thomson]. Röntgen sai työstään ensimmäisen fysiikan Nobelin palkinnon v. 1901.

Säteilyn luonteesta ei aluksi ollut selvyyttä, ja vaihtoehtona olivat joko neutraalit hiukkaset (magneettikenttä ei vaikuttanut säteiden kulkuun) tai hyvin lyhytaaltainen sähkömagneettinen säteily [ks. Maxwell]: ainakaan optisen alueen diffraktiohilat [ks. Fraunhofer] eivät vaikuttaneet siihen. Laue ehdotti koetta, joka lopulta todisti säteilyn aaltoluonteen [ks. Bragg ja Bragg].

- Säteille löytyi pian sovellutuksia lääketieteessä ja biologiassa; röntgenkuvauksen lisäksi niitä käytettiin genetiikan tutkimuksessa mutaatioiden luomiseen [muista sovellutuksista, ks. Bragg ja Bragg].

8.12 Planck (1858-1947)

Max Planck kehitti v. 1900 kaavan kuvaamaan nk. mustan kappaleen [ks. Boltzmann; Kirchhoff; Rayleigh] lämpösäteilyä aallonpituuden funktiona. Hän pystyi yhdistämään Wienin ja Rayleighin-Jeansin kaavat matemaattisella 'tempulla', jossa systeemin energia oli kvantittunut. Hänelle myönnettiin fysiikan Nobelin palkinto v. 1918.

- Myöhemmin syntyi sähkömagneettisen säteilyn dualistinen aaltohiukkas-näkemys [ks. Einstein], joka selitti ilmiön fysiikan.

Työnsä yhteydessä Planck määritteli nimellään kulkevan uuden luonnonvakion, jonka myöhemmin osoitettiin liittyvän myös aineen kvanttiluonteeseen [ks. Heisenberg ja Schrödinger]. Koska vakio on hyvin pieni luku, kvanttiefektit eivät näy atomeja suuremmissa kohteissa.

- Planck johti vakiostaan myös Planckin ajan, 10^{-43} s ja Planckin pituuden, 10^{-35} m. Näillä äärimmäisen pienillä suureilla on merkitystä kvanttimekaniikkaa ja kosmologiaa yhdistettäessä [ks. Penrose ja Hawking; Guth ja Linde; Green ja Schwartz].

8.13 W. H. (1862-1942) ja W. L. (1890-1971) Bragg

Fyysikkoja — William Lawrence oli William Henryn poika —, jotka selittivät röntgensäteillä [ks. Röntgen] kiteissä syntyvät diffraktiokuviot nk. Braggin lailla 1913. Tulos vahvisti röntgensäteilyn aaltoluonteen, aallonpituuden ollessa 0.01 - 1 nm [eli UV-säteilyn alapuolella; ks. Young ja Fresnel]. Menetelmä mahdollisti kiteiden rakenteen tutkimuksen, kristallografian [myöhemmin se osoitti toimivuutensa myös molekyylitutkimuksessa, ks. Pauling]. Braggit jakoivat vuoden 1915 fysiikan Nobelin palkinnon.

- Max von Laue (1879-1960) oli ehdottanut kristallikiteiden pommitamista röntgensäteillä. Jos säteilyn aallonpituus vastaa kiinteän aineen atomien välimatkojen etäisyyksiä, kide toimisi hilana [ks. Young ja Fresnel; Fraunhofer] ja synnyttäisi interferenssi- ja diffraktiokuvioita. Näin myös tapahtui, ja Lauelle myönnettiin vuoden 1914 fysiikan Nobelin palkinto.
- Näihin aikoihin löydettiin vieläkin lyhyempiaaltoista ja energieettisyydessään radioaktiivista gammasäteilyä [ks. Rutherford].

Karakteristinen röntgensäteily saa alkunsa atomin elektronien siirtymisinä energiatasoillaan [ks. Bohr]. Tarvittavat viritystilat saadaan aikaiseksi materian elektronipommituksella. Säteilyn jatkuva spektri syntyy elektronien jarrutussäteilystä (*bremstrahlung*) ytimien lähellä.

Luku 9

Aineen hienorakenne

Uusien mittausten ansiosta päästiin vähitellen selville aineen sisäisestä rakenteesta. Molekyylien tiedettiin jo muodostuvan eri alkuaineiden atomeista (Luku 5). Atomien ainoa tunnettu ominaisuus oli niiden massa, joka erosikin aineesta toiseen; periaatteessa muuta eroa ei ehkä olisi tarvinnut ollakaan. Alkuaineiden jaksollinen järjestelmä oli kuitenkin antanut viitteitä uudesta atomeihin liittyvästä ominaisuudesta, joka nyt paljastui ytimen varaukseksi.

Jaksollinen järjestelmä oli ensinnäkin vahvistanut atomien massojen lähes kokonaislukuiset suhteet, seikka, joka viittasi sisäiseen hienorakenteeseen: olivatko kaikki alkuaineet muodostuneet vedystä? Toiseksi järjestysluvun mukana kasvava atomimassa ei kasvanut yhden vetyatomin massan lisäyksen, vaan sarjana 1, 4, 7, 9, 11, 12, 14, 16, 19, 20, jne., missä 1 vastasi vedyn massaa. Mistä aukot sarjassa johtuvat, eli miksi esim. kaksi tai kolme vetyatomia ei pystynyt muodostamaan stabiilia ainetta? Kolmanneksi massa ei pystynyt selittämään järjestelmän jaksollisuutta, eli miksi monet aineet muodostivat ryhmiä, joilla oli samansuuntaiset kemialliset ominaisuudet. Lopuksi tulivat vielä massojen pienet poikkeamat täydellisestä kokonaislukunaisuudesta, edellisessä listassa mm. 6.94, 9.01, 10.81, jne.

Molekyylien ja sähkön oli jo todettu liittyvän jollain tapaa toisiinsa; nyt kemiallisten sidosten ongelma alkoi selvetä atomin rakenteen perusteella. Samalla saatiin selvennystä sähkön luonteeseen (Luku 6) sekä atomien spektreihin (Luku 8). Tarkempia tuloksia saatiin kuitenkin vasta myöhemmin, kvanttimekaniikan (Luku 10) kehittyessä.

Atomien sisuksiin kurottaminen toi esiin myös uuden ilmiömaailman, radioaktiivisuuden. Lisäksi löydettiin lukuisa joukko uusia, aikaisemmin tuntemattomia hiukkasia, sekä ennen tuntematon hiukkasten ominaisuus. Käsitys materian rakenteesta muuttui huomattavasti, mutta pahempaa oli vielä tulossa (Luku 12).

9.1 Kekulé (1829-1896)

Osittain Friedrich August Kekulé'n 1850-luvun töiden ansiosta orgaaninen kemia ymmärrettiin hiiliatomin sidosten kemiaksi. Juuri hän lisäsi CH_4 :n 'tyypillisten' orgaanisten molekyylien sarjaan H_2 , H_2O , NH_3 ja CH_4 [ks. Berzelius]; hiilivetyjen olemassaolosta tulikin myöhemmin orgaanisen aineen määritelmä.

- Kekulé oli pätevä tutkija, vaikkakaan ei yhtä omaperäinen kuin on luultu. Mainetta ovat kolhineet hänen v. 1890 väitteensä tutkimuksensa taustalla olleista unista: hän ajoitti ne sopivasti ennen muiden tutkijoiden ratkaisevia julkaisuja, joista Kekulé oli todistettavasti ollut tietoinen.

Uuden nk. valenssiteorian mukaan tietyn alkuaineen atomi pystyi vain määrättyyn määrään sidoksia muiden atomien kanssa. Hiiliatomilla oli mahdollista rakentaa neljä kemiallista sidosta muiden atomien tai ryhmien kanssa, ja että ne voivat myös ketjuuntua: kahden atomin ketjulla on mahdollisuus kuuteen kemialliseen sidokseen jne.

- Nykyään tiedetään, että hiilellä on optimaalinen kyky yhdisteiden luomiseen: sillä on neljä elektronia uloimmalla elektroniverhollaan, johon mahtuu maksimissaan kahdeksan elektronia. Se voi siis muodostaa yhdisteitä kahdella tapaa, joko luovuttamalla elektroneja tai saamalla niitä lisää [ks. Bohr; Lewis]. [Hiilen evoluutiosta tähdissä, ks. Hoyle.] Pii (Si) on toinen elektroniverholtaan samalla tavalla joustava alkuaine.

Kekulé kehitti bentseenimolekyylin C_6H_6 [ks. Faraday] rengasrakennetta v. 1865. Kemistit hyväksyivät vähitellen nk. rakenneteorian, jonka mukaan molekyylien ominaisuudet johtuvat sen sisältämistä atomeista ja niiden keskinäisestä järjestyksestä.

- Vuonna 1985 valmistettiin nk. buckminsterfullerenea, C_{60} , jossa 60 hiiliatomia muodostaa stabiilin, lähes pyöreän 'häkin'.

9.2 Arrhenius (1859-1927)

Svante August Arrheniuksella oli suuri merkitys fysikaalisen kemian kehityksessä; hänelle myönnettiin Nobelin kemian palkinto v. 1903.

- Kaksi muuta fysikaalisen kemian merkkihenkilöä olivat Jacobus van't Hoff (1852-1911) ja Wilhelm Ostwald (1853-1932). van't Hoff sai ensimmäisen kemian Nobelin palkinnon 1901 kemiallisten reaktioiden termodynaamisista tutkimuksista.

Arrhenius kehitti liuosten ja etenkin heikkojen elektrolyyttien [ks. Volta; Faraday] teoriaa v. 1884 väitöskirjastaan alkaen. Clausiuksen tapaan hän päätteli, että liuotetut aineet ovat liuoksessa ioneina vaikka sähkövirtaa ei olisi kytkettynäkään. Hän määritteli hapot aineiksi, jotka veteen liuettuaan luovuttavat vetyioneja H^+ ja emäkset aineiksi, jotka veteen liuettuaan luovuttavat hydroksyyli-ionin OH^- .

- Vuonna 1923 syntynyt nk. Debyen-Hückelin -teoria yleistä Arrheniuksen liuosteorian. Pieter Debye (1884-1966) sai kemian Nobelin palkinnon muista saavutuksista 1936.

Arrhenius totesi v. 1896 hiilidioksidin olevan nk. kasvihuonekaasun; vesihöyryn kanssa se pitää Maapallon ilmaston elämälle sopivana. Arrhenius tunnetaan myös panspermia -ideasta. Sen mukaan Maapallon elämän esiasteet eivät ole syntyneet paikanpäällä, vaan ovat peräisin avaruudesta [ks. Hoyle].

9.3 Thomson (1856-1940)

Joseph John Thomson löysi ensimmäisen atomin rakenneosan, negatiivisesti varautuneen elektronin v. 1895. Hän tutki katodisädeputkien [ks. Röntgen] säteilyä ja havaitsi sen koostuvan paljon atomia pienemmistä hiukkasista, joiden varauksen (e) ja massan (m) suhteen hän määritteli ja jotka myöhemmin nimettiin elektroneiksi. Pian niiden havaittiin selittävän johteiden sähkönjohtokyvyn; sähkön 'arvoitus' oli ratkennut, vaikka tarkka selitys vaati vielä kvanttimekaanisen formuloinnin. Thomson sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1906.

- Katodisäteiksi kutsuttiin alipaineista kaasua sisältävissä lasiputkissa sähköjännitteen kytkennän jälkeen näkyvää valoa. Laitteiston historia juontaa juurensa Edisoninin [ks. Faraday] sähkölamppuun vuodelta 1879. William Crookes (1832-1919) oli merkittävimpiä katodisäteiden varhaisia tutkijoita. Owen Richardson kehitti 1901-1903 kuumien kappaleiden emittoimien elektronien teoriaa ja sai fysiikan Nobelin palkinnon 1928. Hänen nk. lämpöionisoitumisella oli merkitystä tyhjiöputkien teoriassa.
 - Tyhjiöputket loivat 1900-luvun alkupuolen elektroniikan; esim. Lee De Forest (1873-1961) vaikutti radioteknologian kehittymiseen [ks. Hertz]. William B. Shockley (1910-1989) oli yksi puolijohdeteknologian uranuurtajia, ja hän jakoi v. 1956 fysiikan Nobelin palkinnon John Bardeenin (1908-1991) ja Walter H. Brattainin

(1902-1987) kanssa tyhjiöputket korvanneen transistorin keksimisestä 1947. Moderni tietokone prosessoreineen tuli mahdolliseksi integroitujen piirien myötä: v. 1959 Jack Kilby kokosi yhdelle germaniumpalalle kolme vastusta kondensaattorin ja transistorin kanssa. Kilby jakoi vuoden 2000 fysiikan Nobelin palkinnon Zhores Alferovin ja Herbert Kroemerin kanssa.

- Robert Andrews Millikan (1868-1953) määritteli 1911 elektronin varauksen suuruuden; fysiikan Nobelin palkinto 1923. Elektronien massan havaittiin olevan huomattavasti atomien massoja pienemmän.

Thomson tutki myös säteilyn raskaampia hiukkasia, joiden varaus havaittiin vastakkaiseksi mutta samansuuruiseksi kuin elektronin. Sähkövaraus oli siis kvantittunut. Vuonna 1904 Thomson esitti — virheellisesti [ks. Rutherford] — atomien koostuvan tasaisesti jakautuneista positiivisista ja negatiivisista hiukkasista. Hän spekuloi myös — nyt aivan oikein — elektronin liittyvän kemiallisten sidosten [ks. Berzelius; Kekulé; Lewis] syntyyn.

Vuonna 1912 Thomson havaitsi neonkaasun koostuvan kahdesta eripainoisesta komponentista. Isotooppiteoria varmentui kuitenkin vasta kun raskaat radioaktiiviset [ks. Curie ja Curie] isotoopit löydettiin [ks. Rutherford].

9.4 Zeeman (1865-1943)

Pieter Zeeman havaitsi v. 1896 nk. Zeemanin ilmiön: kun natriumliekki asetetaan voimakkaan sähkömagneetin napojen väliin, liekin säteilemät spektriviivat [ks. Kirchhoff] levenevät. Seuraavana vuonna Zeeman osoitti viivojen levenemisen sijaan jakautuvan osiin. Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) pyrki selittämään ilmiötä elektronien [ks. Thomson] värähtelyn avulla. Pian kuitenkin havaittiin, että ilmiö oli paljon oletettua monimutkaisempi, 'anomaalinen', ja että esim. eri aineet tuottivat hyvin erilaisia spektrejä. Loppujen lopuksi ilmiön tarkka selitys vaati uuden hiukkasen ominaisuuden, spinin [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] keksimistä. Zeeman ja Lorentz jakoivat v. 1902 fysiikan Nobelin palkinnon [Lorentzista ks. myös Einstein].

- Suomalainen fyysikko Kari Enqvist käsittelee Zeemanin ilmiön selittämisen historiaa teoksessaan *Näkymätön todellisuus* (1996).
- George Ellery Hale (1868-1938) liitti v. 1908 auringonpilkkuihin [ks. Galilei; Gauss] magneettikentät, joiden voimakkuuksia voidaan arvioida Zeemanin ilmiön avulla.
- Nk. Paschen-Back -ilmiö havaitaan kun magneettikenttä on erityisen suuri.

- Johannes Stark (1874-1957) havaitsi, että myös voimakas sähkökenttä vaikuttaa spektriin; puhutaan Starkin ilmiöstä. Hän sai fysiikan Nobelin palkinnon 1919.

9.5 M. (1867-1934) ja P. (1859-1906) Curie

Antoine Henri Becquerel (1852-1908) löysi v. 1896 uraanista (U) erikoisen säteilyn, jonka Marie Curie nimesi radioaktiivisuudeksi; jatkossa Marie ja Pierre Curie löysivät lisää radioaktiivisia aineita — mm. radiumin (Ra) — ja havaitsivat niissä piilevän lämpöenergian [ks. Rutherford]. Kolmikko jakoi fysiikan Nobelin palkinnon v. 1903; Marie sai myös kemian Nobelin palkinnon v. 1911.

- Pierre Curien kokeessa kiehutettiin pieniä vesimääriä radiumkimpaleen avulla kuukausia ilman että radiumissa tapahtui — tuolloin — havaittavia muutoksia. Ilmiöön ei vaikuttanut radiumin jäädyttäminen (-180°C) tai kuumentaminen ($+450^{\circ}\text{C}$), mikä sulki pois tavallisen kemiallisen reaktion.
- Radioaktiivisuuteen liittyvä energia oli pitkään vain empiirinen, havaintoihin perustuva tieto. Myöhemmin sen huomattiin liittyvän ytimen hiukkasten sidosenergioihin ja Einsteinin kuuluisaan kaavaan $E = mc^2$ [ks. Fermi].
- Luonnon 92 alkuaineesta [ks. Mendelejev] pysyviä on 83, loppujen ollessa radioaktiivisia.

Pierre Curie tutki myös magneettisia aineita [ks. Faraday] ja havaitsi, että paramagnetismi oli riippuvainen lämpötilasta (nk. Curien laki). Ferromagneettiset aineet (paramagnetismin erikoistapaus) muuttuvat paramagneettisiksi nk. Curien lämpötilan yläpuolella; esim. raudalle (Fe) tämä lämpötila on 1045 K.

- Paul Langevin (1872-1946) osoitti 1905 elektronien [ks. Thomson] merkityksen magnetismin muodostuksessa. Diamagnetismi on seurausta elektronien liikkeestä ytimen ympärillä [ks. Ampère; Bohr], ja kaikki aineet ovat siten diamagneettisia. Tämä efekti peittyy kuitenkin atomeissa ja molekyyliessä, joissa elektronin sisäinen magneettinen momentti pääsee näkyviin [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit].

9.6 Rutherford (1871-1937)

Ernest Rutherford tutki radioaktiivisuutta ja atomin rakennetta; hänelle myönnettiin kemian Nobelin palkinto v. 1908. Radioaktiivisuuden osalta tärkeä yhteistyökumppani Frederick Soddy (1877-1956) sai vastaavan palkinnon 1921.

Rutherford havaitsi v. 1899, että uraanin [ks. Curie ja Curie] radioaktiivisessa säteilyssä on kaksi erilaista komponenttia, joita nimettiin α - ja β -säteilyksi. Edellinen liitettiin pian heliumin ytimiin ${}^4\text{He}$, jälkimmäinen elektroneihin e^- [ks. Thomson]. Rutherford ja Soddy esittivät 1902, että radioaktiiviset aineet muuttuivat säteillessään toisiksi alkuaineiksi, ja että tämä nk. radioaktiivinen hajoaminen eksponentiaalisesti.

- Paul Villard (1860-1934) löysi kolmannen radioaktiivisuuden muodon, γ - eli gammasäteilyn, 1900; se todettiin 1912 sähkömagneettiseksi säteilyksi [ks. Maxwell], jonka aallonpituus oli röntgen-säteitäkin [ks. Bragg ja Bragg] lyhyempi, alle 0.01 nm. Toisin kuin hiukkassäteily, gammasäteily ei vaikuta ytimen koostumukseen, vaan liittyy sen energiatiloihin.

Sirontakokeidensa perusteella Rutherford päätyi v. 1911 atomimalliin, jossa negatiiviset elektronit kiertävät tiheää, positiivisesti varautunutta ja huomattavasti raskaampaa ydintä; suurin osa atomia oli siis 'tyhjä'.

- Maxwellin yhtälöiden mukaan elektronien olisi pitänyt menettää energiansa hyvin lyhyessä ajassa sähkömagneettisena säteilynä ja pudota ytimeen. Atomit ovat kuitenkin stabiileja [ks. Bohr].
- Kokeita oli Rutherfordin kanssa suunnittelemassa ja tekemässä Hans Geiger (1882-1945), joka tuli tunnetuksi myös radioaktiivisuutta mittaavasta laitteestaan.

Soddy esitti 1913 nk. radioaktiiviset hajoamislait: α -hiukkasen emittoituminen tuottaa alkuaineen, joka on jaksollisessa järjestelmässä [ks. Mendelejev] kaksi sijaa ennen hajoavaa alkuainetta, ja β -hiukkasen emittoituminen tuottaa alkuaineen, joka seuraavana järjestelmässä (*Inter-atomic charge*, Nature, 92, 399-400, 1913). Hän selitti ilmiön isotooppien avulla: uraanin ja lyijyn välisillä alkuaineilla voi olla useita kemiallisesti samanlaisia atomeja, joilla on kuitenkin erilaiset massat. Henry Gwyn Moseley (1887-1915) osoitti v. 1914 röntgenspektroskopian avulla, että alkuaineen paikkaa jaksollisessa järjestelmässä vastaa ytimen varaus, joka ei massan tavoin jätä tyhjiä paikkoja alkuainelistaan.

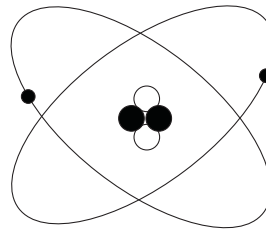
- Francis William Aston (1877-1945) vei isotooppioteoriaa eteenpäin suunnittelemallaan massaspektrometrillä, josta hänelle myönnettiin kemian Nobelin palkinto 1922. Juuri hän varmisti Thomsonin löytäneen neonin isotoopin ja — mikä tärkeintä — havaitsi puhtaiden isotooppiseosten atomipainojen olevan hyvin lähellä kokonaislukuja [ks. Berzelius].
- Esimerkki radioaktiivisesta ketjussa, jossa uraani muuntuu hitaasti lyijyksi (Pb): ^{238}U - ^{234}Th - ^{234}Pa - ^{234}U - ^{230}Th - ^{226}Ra - ^{222}Rn - ^{218}Po - jne. - ^{206}Pb .
- Harold Clayton Urey (1893-1981) löysi deuteriumin eli raskaan vedyn 1932; kemian Nobelin palkinto 1934. Protonin ja neutronin muodostama ydin oli lahja ydinfyysikoille: vetyatomien protoni-elektroni -parin tapaan se oli tarpeeksi yksinkertainen tutkimuskohde erilaisten teorioiden testaamiseen.
- Irène (1897-1956; Marien ja Pierren tytär) ja Frédéric (1900-1958) Joliot-Curie valmistivat ensimmäiset radioaktiiviset isotoopit eli radioisotoopit 1933-1934; kemian Nobelin palkinto 1935.

Vuonna 1919 Rutherford valmistoi happea pommittamalla tyypeä heliumytimillä, $^4_2\text{He} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + p$. Paitsi että kyseessä oli ensimmäinen koskaan tehty keinotekoinen ydinreaktio [ks. Fermi], törmäyksessä syntyi vetyatomien ydin, jota alettiin kutsua protoniksi. Seuraavana vuonna Rutherford ennusti varauksettoman neutronin olemassaolon selittääkseen massan ja varauksen eron (ja osittain myös ytimen stabiilisuuden). Vaikka protonista kehkeytyi seuraava ammushiukkanen, vasta neutronien käyttö johti merkittävien ilmiöiden löytymiseen [ks. Fermi].

- James Chadwick (1891-1974) löysi neutronin 1932, ja sai siitä fysiikan Nobelin palkinnon 1935. Neutronin havaitseminen on vaikeaa, sillä varauksettomuutensa lisäksi se on epästabiili atomytimen ulkopuolella. Vapaa neutroni on hieman painavampi kuin protoni, ja sen puoliintumisaika protoniksi, elektroniksi ja antineutriinoksi on hieman yli kymmenen minuuttia.

Atomytimet voitiin vihdoinkin ymmärtää koostuvaksi nk. nukleoneista eli protoneista ja neutroneista. Protonien lukumäärä antaa nk. järjestysluvun (Z), joka määrää mistä alkuaineesta on kysymys. Saman alkuaineen atomeilla voi olla eri määrä neutroneita; protonien ja neutronien lukumäärien summa määrää isotooppiin liittyvän massaluvun (A). Esim. hiilen tyypillisimmässä isotoopissa $^{12}_6\text{C}$ on kuusi protonia ja $12-6=6$ neutronia, kun taas hiili-14:sta eli $^{14}_6\text{C}$:ssa on kaksi neutronia enemmän. (Koska järjestysluku ja alkuaineen koodi vastaavat yksikäsitteisesti toisiaan, voidaan esim. $^{12}_6\text{C}$ kirjoittaa muotoon ^{12}C tai hiili-12.) Protonin ja neutronin massoissa on vain vähäinen ero

Atomi
 järjestysluku Z
 massaluku A
 Ydin
 Z protonia, varaus $+Ze$
 $A-Z$ neutronia
 Elektroniverho
 Z elektronia, varaus $-Ze$



Kuva 9.1: Atomin tunnusluvut. Heliumille ${}^4_2\text{He}$ on voimassa $A=4$, $Z=2$. Sähköisesti positiivisen ytimen varausta tasapainoittaa negatiivisesti varautunut elektroniverho. Atomeja ja molekyyliä, joissa on joko liikaa tai liian vähän elektroneja, kutsutaan ioneiksi. Heliumin kahdesti ionisoitunut ydin, ${}^4_2\text{He}^{2+}$, on nk. α -hiukkanen.

ja molemmat ovat paljon elektronia painavampia; seurauksena atomipainojen kokonaislukusääntö. Koska atomit olivat sähköisesti neutraaleja, ydintä tuli kiertää yhtä monta elektronia kuin ytimessä oli protoneja. Kuvassa 9.1 on esitetty helium-atomi.

- Neutronien olemassaolo ei täysin selitä ytimien stabiilisuutta, ja näin määriteltiin uusi, nk. vahva vuorovaikutus eli vahva ydinvoima, joka vallitsee nukleonien välillä. Toisin kuin painovoima [ks. Newton] ja sähkömagneettinen voima [ks. Maxwell], vahva voima on lyhyen kantaman voima: sen vaikutus häviää nopeasti hiukkasten välimatkan kasvaessa. Pienillä etäisyyksillä se on kuitenkin huomattavasti vahvempi kuin ytimen protonien väliset sähköiset poistovoimat, ja näin atomiydin pysyy koossa. Rutherfordin havaitsema helium-ytimiä säteilevä radioaktiivisuus johtuu siitä, että suurimassaisissa atomiytimissä hiukkaset voivat 'tunneloitua' vahvan voiman vaikutusalueen ulkopuolelle, jolloin sähköinen poistovoima sinkoaa ne ulos ytimestä. Nukleonit muodostavat mielellään pareja, ja nämä edelleen parien pareja: näin syntyy juuri α -hiukkasten säteily. Elektroneja säteilevä radioaktiivisuus liittyy nukleonien hajoamiseen ytimen sisällä [ks. Fermi].
 - Vaikka vahva voima voidaan periaatteessa selittää nukleonien sisäisen rakenteen avulla [ks. Gell-Mann], käytännöllisistä syistä sitä kuvataan usein nk. efektiivisellä mesonikenttäteorialla, jota Hideki Yukawa (1907-1981) pohjusti 1935 olettamalla nykyisin π -mesonina tunnetun hiukkasen olemassaolon; hiukkanen löytyi 1947 ja Yukawa sai fysiikan Nobelin palkinnon 1949.
 - Atomien ydinten kasvaessa myös neutronien suhteellisen osuuden täytyy kasvaa, jotta vahva voima kykenisi pitämään sähköisen voiman kurissa. Esim. uraani-238:ssa on 92 protonia ja 146 neutronia. Tätä nukleonien suhdetta kuvataan nk. Segrèn käyrällä

keksijänsä [ks. Dirac] mukaan. Samalla myös erilaisten mahdollisten isotooppien lukumäärä kasvaa: vaikka luonnossa esiintyviä alkuaineita on vain 92, isotoopit huomioonottaen erilaisia atomityymiä on n. 2500, ja näistä yli 2200 on radioaktiivisia, so. epävakaista.

Uusi atomiteoria vaikutti myös laboratoriofysiikan ulkopuolella. Jo 1903 Rutherford esitti Soddyn kanssa, että Auringon energian voisi olla peräisin radioaktiivisuudesta [ks. Bethe]. Vuotta myöhemmin hän keksi, että radioaktiivisuus — ei kuumen alkutilan vähittäinen jäähtyminen — oli syy myös Maapallon sisuksen kuumuuteen. Tällä oli vaikutusta käytyyn keskusteluun Auringonkunnan iästä, joka saattoikin nyt olla paljon arveltua suurempi [ks. Fourier].

- Julius Elster ja Hans Geitel olivat osoittaneet 1904, että heikkoa radioaktiivista säteilyä lähettävää ainetta löytyi maaperästä lähes kaikkialta. Esim. radon-kaasu (Rn) on tyypillinen luonnollisen säteilyn lähde.
- Arthur Holmes (1890-1965) ehdotti v. 1927, että jos lämpötila on kyllin korkea, maankuoren konvektiovirtaukset saattaisivat aiheuttaa Alfred Wegenerin (1880-1930) esiin nostamaa mantereiden liikettä. W. Jason Morgan ja Dan P. McKenzie kehittivät 1960-luvulla geofysiikalle erittäin tärkeän laattatektoniikkateorian.

Yhdessä työtoverinsa Bertram Boltwoodin (1870-1927) kanssa Rutherford kehitti radioaktiivisuuteen perustuvan ajoitusmenetelmän. Boltwood oli havainnut, että uraania sisältävissä mineraaleissa oli aina myös lyijyä, ja arvelin syntyvän uraanin radioaktiivisen hajoamisen tuloksena. Kävi ilmi, että stratigrafisesti vanhemmiksi määritellyissä kivinäytteissä olikin enemmän lyijyä kuin nuoremmissa. Rutherford osoitti, että vuoden kuluessa yksi uraaniatomi kahdesta miljardista muuttuu lyijyksi; tämä antaisi siis hyvin kauas menneisyyteen ulottuvan 'kellon'. Vuonna 1907 Boltwood osoitti nk. uraani-lyijyisotooppimenetelmällä eräiden kivien olevan yli kaksi miljardia vuotta vanhoja. Myöhemmin ajanmääritykseen on käytetty myös monia muita isotooppeja.

- Clair Patterson osoitti uraani-lyijyisotooppimenetelmällä 1953 Maapallon olevan noin 4.5 miljardia vuotta vanha.
- Vuonna 1940 löydettyä hiili-14 isotooppia [ks. Thomson] syntyy ilmakehässä kosmisten säteiden [ks. Langmuir] vaikutuksesta, ja sitä kerääntyy vain elävään kudokseen. Willard Frank Libby (1908-1980) kehitti siihen perustuvan ajoitusmenetelmän käyttökelpoiseksi 1947, ja sai kemian Nobelin palkinnon 1960. Hiili-14 -ajoitus toimii, kun näyte ei ole n. 40 000 vuotta vanhempi. Vanhempien fossiilien kohdalla pitää

tukeutua esim. niitä ympäröivien kivien kalium-40 -ajoitukseen (kaliumia löytyy usein tulivuoripurkausten tuhkasta).

9.7 Bohr (1885-1962)

Niels Bohr kehitti atomimallia hieman modifioidulla klassisella fysiikalla vain muutamia vuosia ennen uuden kvanttimekaniikan syntyä [ks. Heisenberg ja Schrödinger]. Hän sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1922.

Bohr paransi Rutherfordin epästabiiliksi tiedettyä atomimallia v. 1913-1915 olettamalla atomiin sidottujen elektronien energian olevan kvantittuneen [ks. Planck; Einstein] tietyille stabiileille 'kuorille' ytimen ympärillä. Atomien emissiospektrit selittyivät elektronien siirtymisinä ylemmältä energiatilalta alemmalle ja tähän liittyvänä energian vapautumisena fotonin muodossa. Absorptiospektrit syntyvät päinvastaisessa prosessissa. Malli selitti vedylle johdetun Rydbergin kaavan [ks. Kirchhoff] ja antoi kokeita vastaavat arvot vetyatomin koolle ja ionisaatiopotentiaalille. Kun Arnold Sommerfeld (1868-1951) lisäsi 1915-1916 suppean suhteellisuusteorian [ks. Einstein] vaikutuksen elliptisten elektroniratojen avulla, malli selitti myös vedyn spektrin hienorakennetta [ks. Kirchhoff; Dirac]. Toisaalta malli ei selittänyt esim. spektriviivojen suhteellisia intensiteettejä, heliumin viivoja tai Zeemanin ilmiötä.

- Vahvistusta elektronien energian kvantittumiselle saatiin James Frankin (1882-1964) ja Gustav Hertzin (1887-1975) kokeista; heille myönnettiin fysiikan Nobelin palkinto 1925.
- Elektronin siirtyminen atomin sidotusta tilasta vapaaksi — eli atomin ionisoituminen — ei ole kvantittunut, vaan ylimääräinen energia muuttu elektronin liike-energiaksi. Samoin käy rekombinaatiossa, vapaan elektronin kaappauksessa atomin sidottuun tilaan. Vapaan elektronin vuorovaikuttaessa atomin tai molekyylin kanssa sen energiatilat ovat koko ajan jatkuvia. Nesteillä ja kiinteillä aineilla viivat voivat olla niin lähellä toisiaan, että ne levetessään peittävät toisiaan. Nämä prosessit selittävät sähkömagneettisen säteilyn jatkuvan spektrin [ks. Kirchhoff; Bragg ja Bragg].
- Sommerfeldin työn mukana fysiikkaan ilmaantui uusi laaduton luonnonvakio, nk. hienorakennevakio, jonka suuruus on $n. 1/137$ [ks. Feynman].

Bohr selitti v. 1922 atomien jaksollista järjestelmää [ks. Mendelejev] atomimallinsa avulla. Olettamalla, että **(1)** ydintä kiertävät elektronit täyttävät kuoria järjestyksessä, että **(2)** kullekin kuorelle mahtuu vain tietty määrä

elektroneja, ja että **(3)** atomi 'pyrkii sulkemaan' myös uloimman elektronikuorensa, so. täyttämään sen maksimaalisesti, hän pystyi selittämään yksinkertaisten kemiallisten sidosten luonteen esim. elektronin lainaamisen [ks. myös Lewis] aiheuttaman sähköisen vuorovaikutuksen (nk. ionisidos) avulla [ks. Berzelius; Thomson] ja jopa ennustamaan oikein eräiden vielä löytämättä olleiden alkuaineiden ominaisuuksia.

- Kemia on siis atomien ja molekyylien uloimman elektronikuoren — nk. valenssielektronien — fysiikkaa; tämä selitti myös isotooppien [ks. Thomson; Rutherford] samanlaisen kemian.

Mitattuja spektriviivoja tutkimalla Wolfgang Pauli (1900-1958) määritteli v. 1925 nimeään kantavan kieltoäännön atomiytimiä kiertäville elektroneille: kaksi elektronia ei koskaan voi olla samassa kvanttililassa. Juuri kvanttiluvut määräävät elektronikuorten miehitykset, ja selittävät siten myös esim. hiilen ominaisuudet [ks. Kekulé]. Pauli sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1945.

Atomien pääkvanttiluku $n = 1, 2, 3$, jne. määritteli elektronien kuoren, jotka koodattiin kirjaimin K, L, M, jne. Rataimpulssimomenttia kuvaava sivukvanttiluku $l = 0, 1, \dots, n-1$ koodattiin kirjaimin s, p, d, f, g, h, i, j. Kolmas nk. atomiorbitaalien (AO) määrittelevä kvanttiluku on magneettinen kvanttiluku $m_l = -l, -(l-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, l-1, l$. Neljäs atomien elektronia kuvaava kvanttiluku on hiukkasen sisäistä impulssimomenttia kuvaava spinkvanttiluku $m_s = \pm \frac{1}{2}$. Atomiin (tai molekyyliin) sidottujen elektronien energiatilojen lisäksi kvanttiluvuilla voidaan kuvata atomiytimien nukleonien tiloja, molekyyliä muodostavien atomiydinten energiatiloja sekä — spinin [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] tapaan — yksittäisten hiukkasten diskreettejä ominaisuuksia.

Myöhemmin Bohr kehitti kvanttifysiikkaa mystifioivan ns. 'kööpenhaminalaisen tulkinnan'. Sen mukaan kvanttimaailman todennäköisyydet aktualisoituvat todellisuudeksi (eli aaltofunktio 'romahtaa') vasta mittauksessa ja ihmisen tietoisuus on mukana tekemässä tätä todellisuutta. Mm. Schrödinger yritti osoittaa ajatuksen mielettömyyden [ks. myös Gell-Mann].

- Pauli oli voimakkaasti ajamassa ideaa tietoisuuden vaikutuksista kvanttimekaanisiin mittauksiin. John Wheeler — joka keksi termin 'musta aukko' — on jopa esittänyt koko maailmankaikkeuden olevan havainnoitsijoidensa luoman; tällä hän on pyrkinyt selittämään, miksi maailmankaikkeus on ollut niin sopiva paikka ihmisen kehittyä [ks. Hoyle].
- Hugh Everett ehdotti 1957 kööpenhaminalaisen tulkinnan vaihtoehdoksi toisenlaista mystiikkaa, nk. monimaailma-tulkintaa, jossa maailmankaikkeus haarautuu jokaisessa kvanttimekaanisessa valintatilanteessa kahtia erillisiksi maailmoiksi. On huomattava, että tämä ei ole sama asia kuin kosmologiset multiuniversumimallit [ks. Guth ja Linde].

9.8 Lewis (1875-1946)

Gilbert Newton Lewis kehitti kemiallisten sidosten [ks. Berzelius; Kekulé; Thomson; Bohr] teoriaa päättelemällä, että kemiallinen sidos voi syntyä myös atomien jakaessa elektroniparin (*The atom and the molecule*, 1916). Näin ionisidoksen rinnalle syntyi nk. kovalentin sidoksen teoria, jonka Langmuir yhdisti Bohrin atomimalliin — syntyi nk. Lewisin-Langmuirin teoria. Lewis esitteli teoriansa lopullisen muodon teoksessaan *Valence and the Structure of Atoms and Molecules* (1923), jossa hän tuki myös uutta ajatusta nk. vetysidoksesta. Jatkossa sidosten teorian kehitys vaati kvanttimekaniikan käyttöön-ottoa [ks. Pauling].

- Koska vetyatomilla on vain yksi elektroni, sen ottaessa osaa sidokseen ytimen positiivinen varaus jää voimakkaammin näkyviin kuin muilla aineilla: tämä mahdollistaa nk. vetysidoksen muodostumisen (näin selittyvät mm. veden erikoiset kemialliset ominaisuudet). Muilla ytimillä vastaavanlainen osittainen 'läpinäkyminen' johtaa vielä heikompiin, nk. van der Waalsin, sidoksiin. Metalleissa sidokset syntyvät positiivisten ionien ja vapaiden elektronien — nk. elektronipilven — vuorovaikutuksesta [ks. Dirac].
- Epäorgaanista kemiaa tutkinut Alfred Wernerin (1866-1919) vuoden 1913 kemian Nobelin palkinnon; nk. ligandit liittyvät näihin tutkimuksiin. Uusia sidosteorioita hyödyntänyt Nevil Vincent Sidgwick (1873-1952) jatkoi tästä 1927: nk. koordinaatiosidos on kovalentin sidoksen erikoismuoto, jossa molemmat jaetuista elektroneista ovat peräisin samalta atomilta.

9.9 Uhlenbeck (1900-88) ja Goudsmit (1902-78)

George Eugene Uhlenbeck ja Samuel Abraham Goudsmit liittivät elektroniin uuden ominaisuuden, spinin [ks. Bohr; Dirac] v. 1925. Nimestään huolimatta spin ei liity pyörimiseen, vaan kyseessä on kaikkien hiukkasten sisäinen ominaisuus. Sillä voi olla kaksi arvoa, 'ylös' tai 'alas', ja se tekee hiukkasista eräänlaisia sauvamagneetteja. Esimerkiksi para- ja ferromagnetismi [ks. Faraday] selittyivät nyt elektronien spinillä [vrt. Curie ja Curie]. Spinin avulla pystyttiin selittämään Zeemanin ilmiö ja nk. Sternin ja Gerlachin koe vuodelta 1922: magneettikentän läpi ammuttu atomisuihku jakautui kahtia. Koska myös atomiytimien nukleoneilla on oma spininsä, niiden vuorovaikutus elektronien spinien kanssa muodostaa uuden lähteen spektrien hienorak-

enteelle, jonka mittauksista Isidor Isaac Rabi (1898-1988) myönnettiin v. 1944 fysiikan Nobelin palkinto [ks. myös Feynman].

- Otto Sternille (1888-1969) myönnettiin v. 1943 fysiikan Nobelin palkinto protonin magneettisen momentin mittauksesta. Rabi kehitti menetelmää edelleen. Lopulta Felix Bloch (1905-1983) ja Edward Mills Purcell (1912-1997) saivat v. 1952 fysiikan Nobelin palkinnon NMR (*nuclear magnetic resonance*) -tekniikan kehittämistä.
- Sähkömagneettista säteilyä aallonpituusvälillä 1 mm - 30 cm kutsutaan mikroaalloiksi; ne jäävät siis infrapunasäteilyyn [ks. Young ja Fresnel] ja radioaaltojen [ks. Hertz] väliin. Vetyatomin säteilemä 21 cm:n spektriviiva on esimerkki spiniin liittyvästä hienorakenteesta. Koska tähtienvälinen avaruus on täynnä vetyä, 21 cm:n säteilyä on kutsuttu maailmankaikkeuden tyypillisimmäksi luonnonilmiöksi. Em. Purcell teki siitä ensimmäiset havainnot v. 1951, ja vaikutti näin merkittävästi radioastronomian kehitykseen.

Alkeishiukkaset voidaan jaotella spinin mukaan kahteen ryhmään: fermioneilla spinkvanttiluku on kokonaisluvun puolikas, bosoneilla kokonaisluku. Edelliset on nimetty Fermiin, jälkimmäiset Bosen [ks. Einstein] mukaan. Muilla kuin todellisilla alkeishiukkasilla osahiukkasten spinit summautuvat; esim. kvarkit voivat siis muodostaa bosonejakin.

- Fermionit: Aineen muodostavat leptonit (esim. elektronit) ja kvarkit (protonien ja neutronien osat) ovat fermioneja. Vain fermionit noudattavat Paulin kieltoääntöä [ks. Bohr].
- Bosonit: Ainetta koossa pitävät hiukkaset, fotonit [ks. Feynman], W^+ , Z^0 , W^- [ks. Weinberg], gluonit [ks. Gell-Mann] ja gravitonit, ovat bosoneja. Ne välittävät luonnon kvanttikenttien [ks. Feynman] vuorovaikutuksia.

Spiniin liittyvä nk. supersymmetria (SUSY) liittyy jokaiseen nykyisin tunnettuun hiukkaseen nk. superpartnerin, jonka spin eroaa puolella yksiköllä. Näitä hiukkasia ei ole vielä havaittu kokeellisesti. Esim. elektronin superpartneri on nimetty selektroniksi, fotonin fotiinoksi, jne. Tavallisen aineen keveintä supersymmetristä paria (engl. *lightest supersymmetric partner*, LSP) on jopa ehdotettu yhdeksi pimeään aineeseen [ks. Hubble; Guth ja Linde] muodoksi.

9.10 Fermi (1901-1954)

Enrico Fermi kehitti v. 1933 radioaktiivisen β -hajoamisen [ks. Rutherford] teoriaa. Tämä elektroneja säteilevä radioaktiivisuus voitiin selittää nk. heikon

vuorovaikutuksen avulla: se saa atomiytimessä olevan neutronin hajoamaan protoniksi (joka jää ytimeen) ja elektroniksi (joka poistuu ytimeestä yhdessä nk. antineutriinon kanssa).

- β -hajoamisessa voi myös ytimen protoni hajota, nyt neutroniksi, positroniksi ja neutriinoksi. Neutriino tarvittiin selittämään reaktiossa havaittu energian häviäminen; sen olemassaololla oli Pauli [ks. Bohr] spekuloinut jo 1931. F. Reines ja C. L. Cowan löysivät tämän erittäin vaikeasti havaittavan hiukkasen 1956.
- Vaikka teoriaa oli vuoteen 1957 mennessä paranneltu monin tavoin ja se selitti hajoamisen hyvin, siihen liittyi ongelmia, jotka saatiin selvitettyä vasta kun heikko voima yhdistettiin sähkömagneettiseen voimaan [ks. Weinberg].

Rutherford oli pommittanut atomiytimiä luonnon radioaktiivisuuden α -hiukkasilla, ja hiukkaskiihdyttimissä luotiin 1932 keinotekoisesti nopeita ammusprotoneja. Arveltiin, että neutronit voisivat sähköisesti neutraaleina olla vielä parempia ammuksia. Fermi tutki eri alkuaineita neutronipommituksilla ja mm. havaitsi, että kohdeytimen on helpompi kaapata hidas kuin nopea neutroni; hänelle myönnettiin fysiikan Nobelin palkinto 1938.

- John Cockcroft (1897-1967) ja Ernest Walton (1903-1995) rakensivat ensimmäisen 'atomimurskaimen', hiukkaskiihdyttimen, jolla he hajoitivat litium-ytimiä α -hiukkasiksi kiihdytetyllä protonipommituksella 1932: $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$. Cockcroft ja Walton jakoivat fysiikan Nobelin palkinnon 1951. Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) rakensi ensimmäisen ympyränmuotoisen hiukkaskiihdyttimen 1930-luvun alkupuolella; fysiikan Nobel 1939.

Aluksi fission käsite ei valjennut fyysikoille, jotka uskoivat uraania pommittaessaan luovansa transuraanisia (eli uraania raskaampia) alkuaineita. Otto Hahnin (1879-1968) kokeet v. 1938 johtivat oikeille jäljille: ymmärrettiin, että atomiydin voi haljeta ja että tässä nk. fissiossa vapautuu energiaa, jos ydin on rautaa raskaampi [fuusiosta, ks. Bethe]. Rauta muodostaa alkuaineiden listalla rajakohdan sen vuoksi, että siinä ytimen nk. sidosenergia nukleonia kohden on suurin; materiaa muuttuu energiaksi Einsteinin yhtälön $E = mc^2$ mukaisesti. Lise Meitner (1878-1968) laski ensimmäisenä näin juuri käyneen Hahnin kokeissa v. 1938. Luonnon yleisin uraanin isotooppi uraani-238 ei tuota hitaita neutroneita jakautuessaan, mutta harvinaisempi (0.7%) isotooppi 235 tuottaa: tämä mahdollistaa ketjureaktion, jota voidaan hyödyntää sekä hallitusti (energiantuotannossa) tai hallitsemattomasti (pommissa). Fermi rakensi ensimmäisen fissioon perustuvan ydinreaktorin 1942; ensimmäinen kaupallinen ydinvoimala käynnistyi Englannissa v. 1956. Atomipommi vahvisti materiassa piilevän energiamäärän varsin kouriintuntuvasti 1945.

- Varsinainen transuraanisten alkuaineiden valmistus alkoi myös näihin aikoihin: esim. neptunium (Np) v. 1940 ja plutonium (Pu) v. 1941. Nykyään yli 20 raskasta alkuainetta on kyetty valmistamaan keinotekoisesti.
- Meitner oli itse ollut käynnistämässä kokeita, joissa Hahn hajotti — Fritz Strassmannin (1902-1980) avustuksella — uraaniatomeja neutronipommituksella. Paitsi energiaa, fissiona syntyi myös neutroneita: Meitnerin ennustaman ketjureaktion mahdollisuus oli ilmeinen. Hahnille myönnettiin vuoden 1944 kemian Nobelin palkinto.

Atomiytimen pisaramallin vastaisesti myös ydinten kuvaamisessa ruvettiin käyttämään kvantittuneita energiatiloja. Radioaktiivinen gammasäteily [ks. Rutherford] on seurausta näiden tilojen virstyksen laukeamisesta. Virstytila voi syntyä ytimen oman radioaktiivisen hiukkassäteilyn sivuvaikutuksena, tai se voidaan tuottaa hiukkaspommituksen avulla.

- 1930-luvulla Bohr oli mukana kehittämässä Gamowin ehdottamaa atomiytimien nk. pisaramallia, jota käytettiin mm. tässä kuvatun fission prosessin selittämiseen; malli ei hyödyntänyt kvanttilukuja millään tavalla.
- Maria Goeppert-Mayer (1906-1972) ja Hans Jensen (1907-1973) saivat v. 1963 fysiikan Nobelin palkinnon kvanttilukuja sisältävän ytimen nk. kuorimallin kehittämisestä 1940-luvun lopulla.
- Bohrin poika Aage Bohr (1922-) ja Ben Mottelson (s. 1926) kehittivät 1950-luvulla mallia, jossa pisara- ja kuorimalleja yhdisteltiin; he jakoivat vuoden 1975 fysiikan Nobelin palkinnon samanlaisia ajatuksia esittäneen James Rainwaterin (1917-1986) kanssa.

Vähitellen kävi ilmeiseksi, että 'alkeishiukkasia' — vaikkakin hyvin lyhytikäisiä sellaisia — oli paljon oletettua useampia: niitä havaittiin mm. kosmisten säteiden [ks. Langmuir] tuottamina ilmakehässä että hiukkaskiihdyttimissä. Einsteinin kaava toimii myös toisinpäin, ja raskaita hiukkasia voidaan synnyttää hiukkaskiihdyttimissä muuttamalla törmäävien hiukkasten energiaa aineeksi. Kiihdyttimissä ensimmäisen nk. resonanssihiukkasen löysi Fermi v. 1952. Hiukkasia pyrittiin nyt jaottelemaan ryhmiin niiden ominaisuuksien mukaan [ks. myös Uhlenbeck ja Goudsmit]:

- Leptonit. Leptoneita ovat elektroni, myoni, tau ja niiden neutriinot. Ne kokevat sekä sähkömagneettisen että heikon vuorovaikutuksen. Leptonit ovat aitoja alkeishiukkasia.
- Hadronit. Kvarkeista [ks. Gell-Mann] koostuvat hadronit kokevat myös vahvan ydinvoiman.

Luku 10

Kvanttimekaniikka ja suhteellisuusteoria

Fyysikkojen mittaukset olivat paljastaneet ilmiöitä (Luvut 8 ja 9), joiden selittäminen klassisella fysiikalla, so. mekaniikalla, termodynamiikalla ja statistisella fysiikalla sekä sähkömagnetismilla, ei enää onnistunut. Tie uuteen fysiikkaan avautui valosähköisen ilmiön selityksestä, jossa sähkömagneettiselle säteilylle annettiin paljon konkreettisempi kvanttiluonne kuin mitä mustan kappaleen säteilyn varhaisessa selityksessä uskallettiin tehdä. Pian materiaalille löytyi vastaavasti aaltoluonne, eikä elektronikaan ollut enää entisensä.

Kvanttimekaniikan rinnalle kehittyi suhteellisuusteorioiden myötä myös uusi tulkinta ajasta ja avaruudesta. Tässä lähtölaukauksen antoi yksinkertainen kysymys: miltä maailma näytti, jos matkusti valon nopeudella? Tulokset olivat tärkeässä asemassa luotaessa modernia kosmologiaa (Luku 11).

Filosofeille aika oli antoisaa, sillä sekä kvanttimekaniikan että suhteellisuusteorian nähtiin rikkovan tieteellisen lain asemaa. Kyse on kuitenkin väärintulkinnasta. Einsteinin teoriassa vain havainnot ovat suhteellisia, eivät lait. Toisaalta kvanttimekaniikan sisäinen ei-deterministisyys ei ole estänyt teoriaa tuottamasta ennen näkemättömän tarkkoja yhteensopivuuksia teorian ja mittausten välille (Luku 12).

10.1 Einstein (1879-1955)

Albert Einstein aloitti uransa mm. Brownin liikkeen ja valosähköisen ilmiön tutkimuksilla, jotka vaikuttivat merkittäväällä tavalla atomiteorian lopulliseen hyväksymiseen. Parhaiten Einstein tunnetaan suhteellisuusteorioistaan, joita hän olisi itse halunnut kutsua esim. invarianttiteorioiksi, sillä — päinvastaisista väitteistä huolimatta — ne eivät asettaneet todellisuuden objektiivisuutta millään lailla kyseenalaiseksi.

- Fysiikan lait tottelevat tiettyjä symmetriaperiaatteita, joiden mukaan ne eivät esimerkiksi riipu ajasta, paikasta tai suunnasta jossa mittaukset tehdään. Nyt Einsteinin suhteellisuusteoriat lisäsivät liikkeen — sekä tasaisen että kiihtyvän — näihin periaatteisiin. Symmetriaperiaatteet liittyvät läheisesti säilymislakeihin.

Robert Brown (1773-1858) oli tarkastellut mikroskoopilla vedessä olevia hiukkasia (siitepölyä ym.) v. 1827 ja havainnut niiden liikkuvan satunnaisesti, kuin sahalaitaista rataa. Einstein osoitti v. 1905 tämän johtuvan törmäyksistä lämpöliikkeessä [ks. Clausius] oleviin vesimolekyyleihin, kuten oli arveltukin.

- Einstein näki, että Brownin liikettä tutkimalla voisi määrittää Avogadron luvun [ks. Gay-Lussac]. Jean Perrin (1870-1942) sai 1908 tuloksen, joka oli saatu myös muilla, riippumattomilla tavoilla; samalla hän laski vesimolekyylin koon. Perrinille myönnettiin kemian Nobelin palkinto 1926. Atomiteoria alkoi näin varmistua; asiaa auttoi myös Charles Wilsonin (1869-1959) ideoima (1896) ja rakentama (1911) varhainen hiukkasilmä, nk. sumukammio. Wilson jakoi vuoden 1927 fysiikan Nobelin palkinnon Comptonin kanssa. Donald Glasser valmisti ensimmäisen kuplakammion 1952.

Einstein postuloi uuden, sähkömagneettiseen säteilyyn [ks. Maxwell] liittyvän, myöhemmin fotoniksi kutsutun, kvantin [ks. Planck] olemassaolon v. 1905 ja selitti sen avulla valosähköisen ilmiön [ks. Hertz]. Tämä oli tärkeä askel kvanttimekaniikan synnylle [ks. Heisenberg ja Schrödinger]. Juuri valosähköisen ilmiön tutkimuksestaan Einstein sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1921. Vuonna 1907 hän yritti soveltaa kvanttiteoriaa myös kiinteiden aineiden ominaislämpöjen laskemiseen, ja Debyen korjattu versio viisi vuotta myöhemmin vastasi jo hyvin mittaustuloksia. Tästä kaikesta huolimatta Einstein ei koskaan tullut sinuiksi kvanttimekaniikan kanssa: ”*Jumala ei heitä noppaa*”.

- Satyendra Nath Bose (1894-1974) osoitti 1924, että Einsteinin kvanttihypoteesi tuotti myös Planckin mustan kappaleen emissioikaavan luontevammin kuin tämän oma formulointi. Vuotta myöhemmin Einstein laajensi Bosen teorian koskemaan myös massallisia hiukkasia ja päätteli, että tarpeeksi kylmissä oloissa voidaan saavuttaa nk. Bosen-Einsteinin kondensaatio, jossa bosonit [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] asettuvat kaikki samaan kvanttitilaan. Vuoden 2001 fysiikan Nobelin palkinto myönnettiin kolmelle tutkijalle, Eric A. Cornellille (s. 1961), Carl E. Wiemanille (s. 1951) ja W. Ketterlille (s. 1958) onnistuneesta Bosen-Einsteinin kondensaation saavuttamisesta 1995.

- Arthur Holly Comptonin (1892-1962) löytämä nk. Comptonin sironta antoi lisätukea sähkömagneettisen säteilyn kvanttiteorialle: vapaista elektroneista sironneen valon aallonpituus kasvaa tavalla, joka voidaan selittää Planckin vakion avulla. Compton jakoi vuoden 1927 fysiikan Nobelin palkinnon Wilsonin kanssa.

Suppea suhteellisuusteoria osoitti ajan ja avaruuden olevan kytköksissä toisiinsa ja ajankin siten suhteellista (Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Zeitschrift für Physik*, 1905). Teorian mukaan toistensa suhteen tasaisesti liikkuvissa koordinaatistoissa luonnonlakien — myös Maxwellin yhtälöiden — tuli olla samanlaiset. Näin valon nopeus on liikkeestä riippumatta aina vakio [ks. Michelson]. Teoria osoitti myös energian ja massan välisen yhteyden, $E = mc^2$ (Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?, *Annalen der Physik* 17, 1905). Valon suuren nopeuden c ansiosta pienikin massa m vastaa merkittävää energiaa E [ks. Fermi; Bethe]; syntyi käsite massaenergia. Kaava tarkensi vanhoja massan ja energian säilymlakeja: yleisessä tapauksessa — esim. radioaktiivisuudessa — vain näiden summa on säilyvä suure. Einsteinin teoria auttoi tekemään kvanttimekaniikan kaavoista ällistyttävän tarkkoja [ks. Dirac; Feynman]. Myös teorian maailman täyttävästä eetteristä saattoi unohtaa.

- Myös Lorenzin [ks. Zeeman] aikaisemmilla ideoilla liikkeen vaikutuksesta kappaleeseen oli vaikutuksensa teorian kehityksessä
- Teorian voi muotoilla myös sanomalla, että kaikki kappaleet liikkuvat joka hetki toistensa suhteen valon nopeudella neliulotteisen avaruusaajan läpi. Jos jokin kappale on meihin nähden liikkeessä, sen nopeus ajassa hidastuu. Tapahtumien samanaikaisuus ei ole enää universaalia, ja valon nopeuden saavuttaminen vastaisi myös ajan pysähtymistä. Neliulotteisen avaruusaika -käsitteen otti ensimmäisenä käyttöön Hermann Minkowski (1864-1909).
- Teoria ei kumoa Newtonin liikelakeja, mutta osoittaa niiden pätevyysalueen rajat (ja valon nopeus ei ole arkielämässä kovinkaan tyyppillinen nopeus).

Vuosina 1907-1915 syntynyt yleinen suhteellisuusteoria osoitti gravitaation olevan seurausta avaruusaajan kaareutumisesta (Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annales der Physik*, 49, 1916). Teoria, joka tarkasteli kihtyvää liikettä, perustui nk. ekvivalenssiperiaatteeseen, so. painovoiman ja hitauden samankaltaisuuteen, ja Georg Friedrich Bernhard Riemannin (1826-1866) n. 1860 kehittämään nk. Riemannin geometriaan [ks. Eukleides]. Teorian tueksi löytyi myös kokeellisia havaintoja.

- Einsteinin teoria selitti jo 1915 Merkuriuksen periheliliikkeen anomalian. Myös Newtonin gravitaatiolaki pystyttiin johtamaan sen avulla ja osoittamaan siten likiarvoisesti todeksi, ei vääräksi: Newtonin lait ovat mm. vieneet ihmisen Kuuhun, eli teoria ei suinkaan ole kuollut ja kuopattu. Toki Einstein osoitti, että gravitaation vaikutus etenee ”vain” rajallisella valon nopeudella.
 - Urbain Jean Joseph Leverrier (1811-1877) oli havainnut jo 1840, että Merkuriuksen radan isoakselin kiertyminen ei totellut aivan täsmällisesti painovoimateoriaa; puhutaan periheliliikkeen anomaliasta. Tämän selittämiseksi Merkuriuksen radan sisäpuolelle nimettiin jo uusi planeettaa, Vulkanus, jota ei kuitenkaan löytynyt.
- Teoria sai lisävahvistusta 1919, kun tähtien valon havaittiin taipuvan Auringon painovoimakentässä. Nämä mittaukset olivat itse asiassa epätarkempia kuin tuolloin tiedettiin; vasta paljon myöhemmät radioastronomian menetelmät antoivat säteilyn taipumisesta yhtä vakuuttavia tuloksia kuin Merkuriuksen radan selitys oli ollut. Gravitaatiolinssien löytyminen 1979 (ja mikrolinssien 1988) on vahvistanut näitä tuloksia.
- Robert Pound ja Glen Rebka mittasivat Einsteinin teorian ennustaman nk. gravitaatiopunasiirtymän — joka on siis eri asia kuin suhteellisesta liikkeestä johtuva punasiirtymä — ensimmäisen kerran 1960. Mittaus perustui Rudolf Mössbaurin (s. 1929) v. 1958 keksimään efektiin, josta Mössbauerille myönnettiin vuoden 1961 fysiikan Nobelin palkinto. Tähän liittyy myös se mittauksin todistettu seikka, että aika hidastuu suuren massan läheisyydessä.
- Teoria ennustaa myös, että kiihtyvässä liikkeessä oleva kappale lähettää valon nopeudella eteneviä painovoima-aaltoja, jotka ovat häiriöitä avarusajan kaarevuudessa. 1970-luvulla osoitettiin, että toisiaan kiertävät neutronitähdet menettävät tämän mekanismin avulla energiaansa; Russell Hulse (s. 1950) ja Joseph Taylor (s. 1941) saivat näistä tutkimuksista fysiikan Nobelin palkinnon 1993.

Karl Schwarzschild (1873-1916) keksi yleisen suhteellisuusteorian pohjalta ajatuksen mustista aukoista [ks. Hoyle; Penrose ja Hawking] v. 1916; niissä painovoima on niin voimakas, että valokaan ei pääse pakoon [ks. Laplace]. Vuonna 1917 Einstein esitti oman maailmankaikkeuden rakennemallinsa ja aloitti näin uuden ajan kosmologisessa tutkimuksessa. Koska maailmankaikkeuden laajenemisesta ei ollut mitään viitteitä, hän lisäsi teoriaan nk. kosmologisen vakion, joka stabiloi systeemin. Alexander Friedmann (1888-1925) korjaili teoriaa v. 1922 ja osoitti, että maailmankaikkeus todennäköisesti laaje-

nee; mittaukset osoittivat tämän todeksi [ks. Hubble]. ”*Elämäni pahin moka*”, kuten Einstein itse sanoi. Yleinen suhteellisuusteoria on johtanut myös teorioihin alkuräjähdyksestä [ks. Gamow]; jo em. Friedmannin yhtälöissä esiintyi ’alkusingulariteetti’.

Einstein halusi myös luoda teorian, joka yhdistäisi gravitaation ja sähkömagneettisen säteilyn; tässä hän ei kuitenkaan onnistunut. Matemaatikko Theodor Kaluza osoitti v. 1919, että lisäämällä Einsteinin kaavoihin uuden, aivan pieneksi romahtaneen avaruudellisen ulottuvuuden lisää, myös Maxwellin yhtälöt saatiin niihin mukaan. Oskar Klein kehitti ajatusta eteenpäin v. 1926.

- Suomalaisen fyysikon Gunnar Nordströmin v. 1914 esittämä (puutteellinen) gravitaatioteoria oli ollut ensimmäinen vakava tieteellinen yritys hyödyntää neljättä avaruudellista ulottuvuutta.
- Kaluzan-Kleinin teorian ongelmaksi muodostui kaksi asiaa: se ei sisältänyt ajankohtaista ydinvoimaa [ks. Rutherford] ja — mikä pahempaa — se ei ollut edes testattavissa. Teoria oli siis niin keskeneräinen, ettei se — Paulin sanoin — ollut edes väärä! Kvanttimekaniikan alkamassa ollut menestystarina sovellutuksineen herätti suurempaa mielenkiintoa. Vuosikymmeniä myöhemmin teoria oli kuitenkin johtava aivan uudenlaiseen fysiikkaan [ks. Green ja Schwartz; Witten].

Einstein loi v. 1917 pohjan myös myöhemmälle laserin kehitykselle.

- Charles Townes (s. 1915) keksi 1951 mikroaaltovahvistimen idean Einsteinin säteilyteorian pohjalta. Toimiva laite oli valmis 1954 ja sai nimekseen maser (engl. *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Vuonna 1958 Townes loi Arthur Schawlowin kanssa teorian näkyvän ja infrapunaisen säteilyn ’maserille’, joka sai nimen laser (engl. *light*, valo). Townesille myönnettiin v. 1964 fysiikan Nobelin palkinto; hän jakoi sen Nikolai Basovin ja Alexander Prohorovin kanssa. Theodore Harold Maiman (s. 1927) sai ensimmäisenä aikaan koherenttia valoa 1960. Laserin keksiminen johti holografian kehitykseen, jolle Dennis Gabor (1900-1979) oli antanut teoreettisen pohjan jo v. 1947. Gabor sai tästä fysiikan Nobelin palkinnon v. 1971. Myöhemmin myös optisten kuitujen käyttö viestinnässä mahdollistui laserin ansiosta.

10.2 Heisenberg (1901-1976) ja Schrödinger (1887-1961)

Werner Heisenberg ja Erwin Schrödinger kehittivät kvanttimekaniikkana tunnetun modernin fysiikan haaran 1920-luvulla; nykyisin puhutaan tyypillis-

esti kvanttifysiikasta. Teoria syrjäytti Rutherfordin-Bohrin atomimallin antaessaan kvantitatiivisemmän selityksen aineiden spektriviivoille [ks. Fraunhofer; Kirchhoff] eli elektronien mahdollisille energiatiloille ja niiden miehitykselle [ks. Bohr]. Kvanttifysiikan outous makroskooppiseen maailmaan verrattuna johti myös spekulatioihin sen filosofisesta merkityksestä; esim. teorian ei-deterministisyys [ks. Laplace] herätti huomiota. Schrödinger kehitti 'Schrödingerin kissan' nimellä kulkevan ajatusleikin kritisoidakseen Bohrin ja Paulin nk. kööpenhaminalaista tulkintaa [ks. Gell-Mann].

- Teorian historiaan kuuluivat alunperin Kirchoffin (mustan kappaleen säteily) ja Hertzin (valosähköinen ilmiö) havainnot, jotka olivat selittyneet Einsteinin postuloiman sähkömagneettisen säteilyn kvantin avulla [ks. myös Planck].
- Elektroniteorian alkusysäyksen antoi Louis Victor de Broglie (1892-1987), joka ehdotti (*Ondes et quanta*, 1923), että materiaalilla on sähkömagneettisten aaltojen tapaan Planckin vakioon liittyvä aaltoluonne; hän sai tästä fysiikan Nobelin palkinnon 1929. George Paget Thomson (1892-1975; J. J:n poika) ja Clinton Davisson (1881-1958) todistivat aineaaltojen olemassaolon elektronien diffraktiokokeissa 1927; fysiikan Nobelin palkinto 1937. Elektronimikroskooppia kehitettiin 1930-luvulta alkaen.

Heisenberg kehitti nk. matriisimekaniikkaa selittämään atomiydintä kiertävien elektronien luonnetta (*Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Bezeichnungen*, 1925). Samaan aikaan Schrödinger kehitti nimeään kantavan yhtälön, jossa atomin elektroneita kuvataan aaltofunktion avulla (*Quantisierung als Eigenwertproblem*, 1926). Teoriat osoittautuivat myöhemmin erilaisiksi formuloinneiksi samasta asiasta. Rutherfordin-Bohrin -atomimalli tarkentui nyt siten, että elektronit eivät kierräkään ydintä aurinkokuntamallin kaltaisesti, vaan muodostavat ytimen ympärille aineaaltopilviä. Kemiallisten sidosten [ks. Lewis] kuvaus muuttui vastaavalla tavalla. Nyt ymmärrettiin, miksi atomin käyttäytymistä voitiin usein kuvata 'kovan pallon' approksimaatiolla. Teoria antoi luontevasti joukon kvanttilukuja, jotka selittivät Bohrin mallin elektronien energiatilat. Lisäksi sen avulla pystyttiin vihdoin mallintamaan myös helium-atomia. Toisaalta teoria ei huomionnut spiniä [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit]; Diracin yhtälö tuli korjaamaan tämän puutteen.

- Schrödingerin mukaan hänen aaltofunktionsa kuvasi elektronin tiheyttä tietyssä pisteessä. Max Born (1882 - 1970) puhui jo 1926 todennäköisyysaallostaa, joka antaa todennäköisyyden löytää elektroni tietyssä paikasta; hän jakoi vuoden 1954 fysiikan Nobelin palkinnon Walter Bothen kanssa.

Heisenberg tunnetaan myös kvanttifysiikkaan liittyvästä epätarkkuusperiaatteesta: hiukkasen paikkaa ja nopeutta ei voi samanaikaisesti mitata mielivaltaisen tarkasti (1927). Ilmiö selittää mm. spektriviivojen nk. luonnollisen leveyden. Heisenbergille myönnettiin Nobelin fysiikan palkinto 1932, ja Schrödinger jakoi saman palkinnon Diracin kanssa 1933. Epätarkkuusperiaate on yksi kvanttimekaniikan komplementaarisuuden, aalto-hiukkasdualismin, ilmentymä.

- Eräs epätarkkuusperiaatteen seuraus on, että elektronia kuvaavalla aaltopakettilla on minimikoko. Tämä estää elektroneita putoamasta atomiytimeen: ne eivät kerta kaikkiaan mahdu sinne.

Vaikka Diracin yhtälö liitti myös suppea suhteellisuusteorian [ks. Einstein] Schrödingerin yhtälöön, vasta Heisenbergin 1929 yhdessä Paulin kanssa kehittämät kvanttikenttäteorian alkeet antoivat toimivan suunnan yhdistämiselle [ks. Feynman]. Kvanttikentät pystyvät selittämään sekä hiukkaset että niihin vaikuttavat kentät yhdellä ja samalla formalismilla. Taustalla oli epätarkkuusperiaate, jonka mukaan 'tyhjä avaruus' ei voi todellisuudessa olla tyhjä siinä esiintyvien pienten energiavaihteluiden takia; puhutaan virtuaalisista hiukkasista ja kvanttivaahdosta. Ilmiön avulla ollaan pääsemässä eroon myös kosmologeja kiusaavista singulariteeteista [ks. Penrose ja Hawking; Green ja Schwartz].

10.3 Dirac (1902-1984)

Paul Dirac kehitti ns. Diracin yhtälön eli elektronin kvanttiteorian (*The Quantum Theory of the Electron*, Proceedings of the Royal Society (London), 117, 610-624, 1928). Teoria, jonka erikoistapaus Schrödingerin yhtälö on, piti sisällään sekä elektronin spinin [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] että suppean suhteellisuusteorian [ks. Einstein]. Myös sähkömagneettisen säteilyn kvanttiluonne oli siinä mukana. Diracin teoria oli kvanttimekaniikan kultakaudeksi kutsutun ajanjakson huipennus; samalla sen yhteydessä kehitetty matemaattikka loi pohjaa uudelle kvanttisähködynamiikalle, QED [ks. Feynman]. Dirac jakoi v. 1933 fysiikan Nobelin palkinnon Schrödingerin kanssa.

- Einsteinin esittämää ftonia, sähkömagneettisen säteilyn kvanttia, olivat ensimmäisinä tutkineet kvanttimekaanisesti Born, Heisenberg ja Jordan jo vuonna 1926; Dirac yleistä heidän tuloksiaan.
- Koska Diracin teoria ei ollut kvanttikenttäteoria [ks. Heisenberg ja Schrödinger], tarkentuneet mittaukset löysivät pian ilmiöitä, joita se ei tyydyttävästi selittänyt. Näihin kuului mm. magneettisen resonanssin

[ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] luoma vedyn spektrin hienorakenne. QED korjasi tilanteen.

- Paul Drude oli liittännyt metallien sähkönjohtavuuden [ks. Franklin; Ohm] materiaalin kaasumaisesti käyttäytyviin vapaisiin elektroneihin [ks. Thomson] jo 1900. Bloch [joka sain Nobelin muista saavutuksista, ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] sovelsi kvanttimekaniikan perusteita kiinteiden aineiden sähkönjohtavuuden selittämiseen 1928. Liikkuvuuden lisäksi elektronien oli löydettävä hilan energiavöiltä vapaita tiloja; johteiden ja eristeiden erot alkoivat selvetä. Nevill Mott (1905-1996) sai 1930-luvun jatkotutkimuksista fysiikan Nobelin palkinnon 1977.

Diracin teoria ennusti antihiukkasten olemassaolon [antimaterian vähyydestä, ks. Weinberg]. Esimerkiksi positroni on antielektroni eli positiivisesti varatun elektroni. Hän spekuloi myös magneettisten monopolioiden olemassaololla: ainakin teoreettisesti ne selittäisivät, miksi sähkövaraus esiintyy vain perusvarauksen moninkertoina [ne olisivat myös yksi mahdollinen pimeän aineen selitys, ks. Hubble; Guth ja Linde].

- Carl Anderson (1905-1991) havaitsi positronin kokeellisesti v. 1932, ja sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1936 yhdessä Hessin [ks. Langmuir] kanssa. Emilio Gino Segrè (1905-1989) ja Owen Chamberlain havaitsivat antiprotonin 1955; fysiikan Nobel 1959.

10.4 Pauling (1901-1994)

Linus Pauling kehitti kvanttimekaanista kemiallisten sidosten [ks. Bohr; Lewis] nk. valenssisidosteoriaa seitsemässä julkaisussa vuodesta 1931 alkaen; tulokset julkaistiin myös kirjana (*The Nature of the Chemical Bond*, 1939). Pauling sai kemian Nobelin palkinnon v. 1954. Friedrich Hundin ja Robert S. Mullikenin (1896-1986) jo vuosina 1927-1928 kehittämä molekyyliorbitaali (MO) -tulkinta sidoksista on osoittautunut kätevämmäksi kuin Paulingin versio; jälkimmäinen sai kemian Nobelin palkinnon 1966. Kemian teoria alkoi 'redusoitua' fysiikkaan, ja pian havaittiin, että molekyylien spektriviivat syntyivät elektronien energiatilojen muutosten lisäksi myös niiden atomien keskinäisten värähtelytilojen ja koko molekyylin pyörimistilojen [ks. Clausius] muutoksista.

- Christopher Kelk Ingold (1893-1970) oli yksi 1900-luvun orgaanisen kemian systematisoijista, jotka hyödynsivät Paulingin aluevaltausta. Erich Hückel (1896-1980) kehitti puolestaan MO-teoriaa, jota useimmat, mm. Michael J. S. Dewar (s. 1918), hyödynsivät.

- Vibraatio- ja rotaatiospektreistä edelliset ovat tyypillisesti infrapuna-alueella, jälkimmäiset mikroaaltoalueella.

Pauling käytti ensimmäisenä röntgensäteitä [ks. Bragg ja Bragg] molekyylien rakenteen (kemiallisten sidosten) tutkimuksessa mittaamalla atomien välisiä etäisyyksiä ja kulmia. Vuonna 1951 julkaistut tulokset proteiinien rakenteesta olivat tärkeitä myöhemmälle DNA:n tutkimukselle. Yleensäkin molekyylien kolmiulotteisuuden merkitys ymmärrettiin [ks. Biot].

Luku 11

Tähdet ja kosmologia

Fyysikot olivat jo havainneet tähtien muodostuvan tutuista alkuainesta (Luku 8). Vieläkin tarkempi taivaan kohteiden tutkimus paljasti tähtien myös poikkeavan toisistaan, ja tämä johti ajatukseen materian evoluutiosta, mihin löydetty atomiytimen hienorakenne oli jo viitannut (Luku 9). Samoihin aikoihin ilmeni, että myös avaruudella, ei vain aineella, oli oma historiansa. Tämä kehitys ei olisi ollut mahdollisia ilman vuosisadan alun uuden fysiikan teorioita (Luku 10).

11.1 Eddington (1882-1944)

Arthur Stanley Eddington kehitti tähtien rakenteen teoriaa (*The Internal Constitution of the Stars*, 1926). Hän selitti nk. kefeidien (engl. *Cepheid variables*) valonvaihtelua (kyse on sykkimisilmistä) sekä eräitä suuritiheyksisten nk. valkoisten kääpiöiden ominaisuuksia. Eddington mm. laski Auringon sisäisen lämpötilan ennen kuin sen todellista energianlähdettä [ks. Bethe] tunnettiin.

- Ejnar Hertzsprung (1873-1967) ja Henry Norris Russell (1877-1957) tutkivat 1910 toisistaan riippumatta tähtien lajittelua ja evoluutiota. Tuloksena oli nk. Hertzsprungin-Russellin -diagrammi, joka kuvaa tähtien todellisen kirkkauden ja [spektristä määritellyn; ks. Kirchhoff] pintalämpötilan yhteyttä. Pääsarjan tähtien — joihin Aurinkokin kuuluu — lisäksi on olemassa punaisia jättiläisiä, ylijättiläisiä ja valkoisia kääpiöitä (punaiset kääpiöt kuuluvat pääsarjan viileään päähän).
- Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) havaitsi 1912 yhteyden kefeidien keskimääräisen kirkkauden ja pulsaatioperiodin välillä. Kalibroinnin — jonka suoritti ensimmäisenä Harlow Shapley (1885-1972) —

jälkeen periodista saadaan todellinen kirkkaus, jonka suhde havaittuun kirkkauteen antaa kohteen etäisyyden. Menetelmää on käytetty galaksien etäisyyksien mittaukseen [ks. Hubble], missä perinteisemmät menetelmät [ks. Kopernikus] eivät toimi.

- Vaikka spektroskopia oli paljastunut Auringon ja tähtien koostuvan tutuista alkuaineista, Cecilia Payne (1900-1979) esitti vasta 1925, että vety — ei rauta — olisi hallitseva alkuaine.
- Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) sai myöhemmistä valkoisten kääpiöiden tutkimuksista fysiikan Nobelin palkinnon v. 1983 [ks. myös Hoyle].

11.2 Hubble (1889-1953)

Edwin Powell Hubble osoitti v. 1924 osan avaruuden tutkituista kohteista olevan oman Linnunratamme [ks. Kant] ulkopuolisia galakseja. Etäisyydenmittaus perustui nk. kefeidimuuttujiin [ks. Eddington], ja ensimmäinen tunnistettu galaksi oli Andromeda M31. Maailmankaikkeuden koko kasvoi huimasti kertaheitolla, olihan Linnunradan ajateltu muodostavan koko maailmankaikkeuden [ks. Herschel]. Vuonna 1925 Hubble luokitteli galaksit niiden rakenteen mukaan. Hän uskoi galaksien täyttävän maailmankaikkeuden tasaisesti, mutta myöhemmin on havaittu niiden muodostavan ryhmiä, joukkoja, superjoukkoja ja 'galaksiseinämiä'. Linnunrata ja Andromeda kuuluvat samaan lähes 30 galaksin nk. Paikalliseen ryhmään, jossa galaksit ovat sidoksissa toisiinsa painovoiman välityksellä: seurauksena ko. galaksit lähestyvät toisiinsa n. 300 km:n sekuntivauhdilla. Paikallinen ryhmä kuuluu puolestaan Neitsyen galaksijoukkoon.

- Kaksi galaksien päätyyppiä ovat kierre- eli spiraaligalaksit [ks. Laplace] ja ellipsigalaksit; eräät erikoisemmat muodot ovat syntyneet galaksien yhteentörmäyksissä. Lisäksi tunnetaan nk. aktiivisia galakseja, joiden äärimuoto on kvasaari [ks. Gamow]. Galaksien aktiivisuuden on arveltu liittyvän mustiin aukkoihin [ks. Einstein; Penrose ja Hawking].

Vesto M. Slipher (1875-1969) oli päätellyt jo v. 1912 monien galaksien etäännyvän meistä; niiden spektriviivat [ks. Kirchhoff] paljastivat selvän punasiirtymän [ks. Doppler]. Vuonna 1929 Hubble havaitsi ko. siirtymän suuruuden olevan verrannollinen galaksien etäisyyteen: maailmankaikkeus siis laajeni. Korjatun Einsteinin teorian mukaan maailmankaikkeus on joko avoin ($\Omega < 1$) tai suljettu ($\Omega > 1$) riippuen sen massaenergiatiheyden ja nk. kriittisen

tiheyden suhteesta Ω ; rajatapausta kutsutaan laakeaksi. Suljetussa maailmankaikkeudessa aineen tiheydestä johtuva gravitaatiovoima pysäyttää lopulta laajenemisen, avoimessa ei. Laajenemisesta saattoi laskea myös maailmankaikkeuden iän, mikä johti nk. alkuräjähdysteoriaan [ks. Gamow]. Moderni kosmologia oli syntynyt.

- Osa — ehkä n. 90% — maailmankaikkeuden aineesta on 'pimeää' eli suorien havaintojen ulottumattomissa Ensimmäisen tätä tukevan havainnon teki Fritz Zwicky v. 1933 galaksijoukkojen sisäisestä liikkeistä. Lisätukea on saatu spiraaligalaksien nk. rotaatiokäyristä, jotka viittaavat pimeästä aineesta muodostuneiden galaksien 'halojen' olemassaoloon.
- Tulokset vuodelta 1999 antavat maailmankaikkeuden iäksi n. 13.4 (+/- 1.6) miljardia vuotta. Vastaava laajenemisvauhti on noin seitsemän millimetrin tuhannesosaa kilometrille sadassa vuodessa. Hubblen alkuperäiset mittaukset antoivat huomattavasti pienemmän iän, mikä johtui mittauksiin liittyvistä ongelmista, esim. Shapleyn alkuperäisestä kefeidien kalibroinnista, jonka Wilhelm Heinrich Baade (1893-1960) korjasi 1952.
- Suurin osa maailmankaikkeuden energiasta liittyy tyhjiöön eikä kokonaismassaan [ks. Guth ja Linde].

11.3 Langmuir (1881-1957)

Irving Langmuir määritteli 1920-luvun puolivälissä termin plasma kuvaamaan ionisoitunutta kaasua. Ensimmäisistä tutkimustuloksista Tonksin kanssa kirjoitettu artikkeli *Oscillations in ionized gases* (1929) käynnisti plasmafysiikkana tunnetun modernin fysiikan suunnan, jonka sovellutusalue on hyvin laaja. Langmuir sai kemian Nobelin palkinnon v. 1932 muista saavutuksistaan, joista kovalentin sidoksen [ks. Lewis] tutkimus muodosti vain pienen osan.

- Toinen merkittävä plasmafysiikko oli Hannes Alfvén (1908-1995), joka ennusti hydromagneettisten aaltojen olemassaolon (*On the existence of electromagnetic - hydromagnetic waves*, 1941). Hän sai fysiikan Nobelin palkinnon 1970. Alfvénin työ on ollut erityisen tärkeä nk. dynamoteorialle, joka pyrkii selittämään sekä Maan että Auringon magneettikenttien synnyn. Teorian alkeita kehitti Joseph Larmor jo 1919.

Ionosfääriksi [ks. Hertz] nimetyn yläilmakehän (heikosti) ionisoituneen kerroksen olemassaolo vahvistettiin v. 1925. Eugene Parker (s. 1927) ehdotti v. 1958 Auringon (plasma)koronan laajentuvan nk. aurinkotuuleksi, joka välittää Auringossa tapahtuvia ilmiöitä ympäröivään avaruuteen, nk. heliosfääriin; satelliitit osoittivat teorian myöhemmin oikeaksi. Maapallon sisäisen magneettikentän [ks. Gilbert] ansiosta maanpinta on kuitenkin suojassa suoralta aurinkotuulen vaikutukselta, nk. magnetosfäärin sisällä. Magnetosfäärin ja ionosfäärin yhdistävien sähkövirtojen ansiosta magneettiset myrskyt ovat kuitenkin maanpäälläkin mitattavia ilmiöitä [ks. Gauss].

- Kristian Birkeland (1867-1917) oli ehdottanut jo 1896, että revontulet syntyvät ilmakehään ulkopuolelta tulevien elektronien aikaansaamina; näkemys osoitettiin myöhemmin oikeaksi. Nykyään puhutaan yleisemmin Birkelandin virroista.
- Victor Franz Hess (1883-1964) oli löytänyt nk. kosmiset säteet 1911-1912; hän jakoi fysiikan Nobelin palkinnon Anderssonin [ks. Dirac] kanssa 1936. Magneettikenttä suojaa elämää myös näiltä erittäin energeisiltä hiukkasilta, jotka ovat lähinnä protoneja ja heliumytimiä. Myös Patrick M. S. Blackettin (1897-1974) fysiikan Nobelin palkinto vuodelta 1948 liittyi kosmisiin säteisiin.

Merkittävin plasmafysiikan tulos olisi hallitun fuusioreaktion [ks. Bethe] synnyttäminen, joka lupaisi halpaa ja nykyistä vaarattomampaa (radioaktiivitonta) energiaa. Vetyppommihan rakentuu tälle teknologialle jo nyt.

11.4 Bethe (s. 1906)

Hans Albrecht Bethe julkaisi v. 1938 teorian tähtien energiantuotannosta [ks. Rutherford]. Keveiden atomiydinten fuusiossa — eli lämpöydinreaktiossa — energiaa vapautuu samasta syystä kuin raskaiden ydinten fissiossa [ks. Fermi]: materiaa muuttuu energiaksi Einsteinin yhtälön $E = mc^2$ mukaisesti. Vedystä — tähtien sekä maailmankaikkeuden tyypillisimmästä alkuaineesta [ks. myös Eddington] — syntyy heliumia suoralla protoni-protoni (pp) -reaktiolla, nk. kolmialfareaktiolla, ja Bethen mallintamalla nk. hiili - typpi - happi (CNO) -syklillä (jossa keskiraskaat ytimet toimivat vain katalyyteinä). Bethe sai työstään fysiikan Nobelin palkinnon 1967.

Auringossa vaikuttaa parhaillaan pp-ketju, kolmialfareaktion tullessa kuvaan mukaan vasta myöhemmässä jättiläisvaiheessa; CNO-sykli kuuluu paljon raskaampien tähtien prosesseihin. Heliumia raskaampia alkuaineita syntyy reaktioissa, joita tapahtuu erilaisissa tähdissä kuin Aurinkomme [ks. Hoyle].

11.5 Gamow (1904-1968)

George Gamow ehdotti v. 1948 maailmankaikkeuden alkuräjähdysteoriaa [’Big Bang’ nimestä, ks. Hoyle] havaitun maailmankaikkeuden laajenemisen [ks. Hubble] selitykseksi. Myöhemmät muunnellut teoriasta ovat laajentaneet sen selitysvoimaa entisestään [ks. Guth ja Linde].

- Georges Lemaître (1894-1966) oli jo 1932 spekuloinut alkuräjähdyksen mahdollisuudella.

Monet mittaukset tukevat Gamowin teoriaa. Hänen oppilaansa Ralph Alpher ja Robert Herman ennustivat jo v. 1948, että räjähdyksestä pitäisi olla mittattavissa sen aiheuttama muutamana Kelvinin suuruinen kosminen taustasäteily. Arno Penzias ja Robert Wilson löysivät tämän 2,73 K homogeenisen säteilyn Maasta käsin v. 1965, ja COBE (Cosmic Background Explorer) -satelliitin mittauksissa v. 1989 sen spektri todettiin täydellisen mustan kappaleen [ks. Planck] spektriiksi. COBE:n tarkat mittaukset paljastivat myös Linnunradan liikkeen taustasäteilyn suhteen, ja näin syntyi uusi avaruuden ’lepokoordinaatisto’: Linnunrata matkaa — yhdessä tuhansien lähigalaksien kanssa — kohti Leijonan tähtikuviota n. 600 kilometrin sekuntinopeudella. Syyksi on ehdotettu nk. pimeästä aineesta [ks. Hubble; Guth ja Linde] koostuvan massakeskittymän vetovoimaa.

- Laajenevan maailmankaikkeuden on täytynyt aikaisemmin olla pienemmän, tiheämmän ja kuumemman, niin kuumen etteivät alkeishiukkaset kyenneet muodostamaan stabiileja atomeja ja aine oli plasmamuodossa [ks. Langmuir]. Kun lämpötila laski laajenemisen johdosta n. 4000 K asteeseen n. 300 000 vuotta alkuräjähdyksen jälkeen, elektronit liittyivät protoneihin ja syntyvässä sähköisesti neutraalissa ympäristössä myös sähkömagneettinen säteily pääsi etenemään: maailmankaikkeus muuttui läpinäkyväksi. Tämä lämpösäteily on viilentynyt nykyiseksi taustasäteilyksi miljardien vuosien saatossa.

Mallinnuksen mukaan jäähtyvässä maailmankaikkeudessa täytyi syntyä vetyä n. 77% ja heliumia n. 23% kaikesta aineesta; tämä on voitu todentaa myös mittauksin [raskaampia aineita alkoi valmistua tähtien sisäisissä reaktioissa, ks. Hoyle]. Varhainen maailmankaikkeus on myös ollut selvästi erilainen kuin nykyinen; esim. kaikki löydetyt kvasaarit [kaikkein aktiivisimmat galaksit, ks. Hubble] ovat hyvin vanhoja. Tällainen kehitys on vaikea selittää muuten kuin olettamalla maailmankaikkeudella olevan alkuhetken.

- Kvasaarit (*quasi-stellar objects*) erotettiin tavallisista tähdistä v. 1963, kun Maarten Schmidt (s. 1929) havaitsi niiden spektriviivojen olevan aivan erityisen paljon siirtyneitä vedyn viivoja.

11.6 Hoyle (1915-2001)

Fred Hoyle on tutkinut mm. alkuaineiden evoluutiota ja kosmologiaa. Hän ehdotti v. 1946, että keskiraskaat alkuaineet syntyvät tähdissä samaan tapaan kuin heliumkin [ks. Bethe] ja julkaisi v. 1957 laajan artikkelin aiheesta työtovereidensa kanssa.

- Yksi artikkelin kirjoittajista, William Alfred Fowlerin (1911-1995), jakoi fysiikan Nobelin palkinnon 1983 Chandrasekharin [ks. Eddington] kanssa.

Tähtien kehityskaari riippuu paljon niiden massasta. Kevyimmät 'tähdet' ovat itseasiassa paljolti planeettojen kaltaisia ruskeita kääpiöitä [ks. Guth ja Linde]. Kevyimmät varsinaiset tähdet kutistuvat vedyn loputtua valkoisiksi kääpiöiksi, kun taas niitä vähän raskaammat tähdet — kuten Aurinko — käyvät läpi jättiläisvaiheen ja muodostavat planetaarisen sumun ennen muuttumistaan valkoiseksi kääpiöksi. Esimerkiksi kefeidit [ks. Eddington] ovat punaisia jättiläisiä, jotka sykkivät heliumin vaihdellessa yhdesti tai kahdesti ionisoituneen tilan välillä. Tämän tason tähdet polttavat heliumiaan myös hiileksi. Jos tähden massa on vieläkin suurempi, n. 1.4 kertaa Auringon massa, lopputuloksena on supernova [ks. Brahe], joka voi jättää jälkeensä neutronitähden tai mustan aukon [ks. Einstein; Penrose ja Hawking]. Nämä tähdet tuottavat hiiltäkin raskaampia alkuaineita. Raskaita ytimiä syntyy myös itse supernovaräjähdyksissä. Tähdissä syntyneet alkuaineet leviävät avaruuteen tähtituulten, valkoisiin kääpiöihin liittyvien novapurkausten ja supernovien kautta.

- Neutronitähdet pyörivät alkuvaiheessa huimalla nopeudella, n. 0.0001-4 s/kierros, ja ne näkyvät siten radiotaajuuksilla nk. pulsareina. Jocelyn Bell (s. 1943) ja Anthony Hewish (s. 1924) tekivät ensimmäiset kokeelliset havainnot pulsareista 1967. Esim. vuoden 1054 supernovaräjähdyks jätti jälkeensä pulsarin ja Rapu- eli Äyriäissumun.
- Auringossa raskaampia alkuaineita on pari prosenttia, joten sen täytyy olla toisen tai kolmannen sukupolven tähti. Se muodostui noin viisi miljardia vuotta sitten muinaisten supernovien jäänteitä sisältävästä pyörivästä kaasupilvestä [ks. Laplace]; samassa prosessissa syntyivät tietenkin myös planeetat. Näistä tähtien ydinreaktoreissa syntyneistä aineista ihminenkin muodostuu.

Hoyle havaitsi v. 1954, että hiilen syntyminen tähtien fuusioreaktioissa epästabiilista berylliumista ja heliumista ei olekaan itsestään selvä asia hiiliytimien energiatasojen vuoksi. Hän ennusti uuden, toistaiseksi havaitsematta jääneen energiataason olemassaolon, mikä myöhemmin löydettiinkin kokeellisesti. Aivan samoin happi-ytimien energiatasot estävät kaiken hiilen muuntumisen hapeksi, mikä on onneksi biologiselle evoluutiolle [ks. Kekulé].

- Hoyle on löytönsä perusteella halunnut osoittaa, että fysiikan lait ovat liian sopivia ihmisen evoluutiota ajatellen ollakseen täysin sattumanvaraisia. Antrooppisen periaatteen heikomman — ja järkevämmän — muodon mukaan maailma on sellainen kuin on senkin vuoksi, että muutoin kukaan ei olisi kysymässä siitä mitään! Moderni kosmologia tuntee myös multiuniversumi-teorian erilaisten luonnonlakien hallitsemista maailmankaikkeuksista [ks. Guth ja Linde].

Hoyle on vastustanut alkuräjähdysteoriaa [ks. Gamow], ja termi 'Big Bang' oli hänen pilkkanimeksi v. 1950 tarkoittamansa keksintö. Hän on tukenut myös panspermia -ajatusta [ks. Arrhenius]; orgaanisia molekyylejä onkin löydetty tähtienvälisestä avaruudesta ja meteoriiteista.

11.7 Penrose (s. 1931) ja Hawking (s. 1942)

Roger Penrose ja Stephen William Hawking tutkivat 1960-luvun puolivälissä teoreettisesti mustien aukkojen syntyä tähtien romahtaessa [ks. Hoyle]. Erityisen kiinnostuneita he olivat aukon keskustan olosuhteita, joissa yleisen suhteellisuusteorian [ks. Einstein] mukaan avaruus on 'repeytynyt' nk. singulariteetin syntymisen johdosta. Vaikutti ilmeiseltä, että näissä oloissa suhteellisuusteoria ei sellaisenaan päde, ja tarvitaan kvanttimekaniikan apua. Sama pätee myös alkuräjähdyksen kohdalla; nk. Planckin aikaa (10^{-43} s) nuorempaa maailmankaikkeutta [ks. Gamow] hallitsikin kvanttifysiikka epätarkkuusperiaatteineen [ks. Heisenberg ja Schrödinger]. Hawking on singulariteetit sivuuttavassa nk. kvanttikosmologiassaan päättänyt teorioihin 'vauvauniversumeista', joita nk. madonreiät yhdistävät.

- Madonreikien idea syntyi jo 1916 Einsteinin yhtälöistä, ja John Wheeler tutki niitä 1950-luvulla. Lee Smolin on jopa ehdottanut, että maailmankaikkeuksilla olisi oma 'luonnonvalintansa'.

Penrosen nk. twistoriteoria pyrkii yhdistämään kvanttimekaniikan ja yleisen suhteellisuusteorian, gravitaation [ks. Green ja Schwartz; Witten]. Hawking keksi 1974 teorian mustien aukkojen nk. kvanttisäteilystä, jossa kvanttimekaniikkaa yhdistettiin yleiseen suhteellisuusteoriaan aikaisempaa konkreettisemmin. Tarpeeksi pienet mustat aukot voivat säteillä hiukkasia, esim. fotoneita: niillä oli lämpötila (säteily tapahtuu muuttamalla epätarkkuusperiaatteen luomia nk. virtuaalihiukkaspareja todellisiksi: toinen putoaa mustaan aukkoon ja toinen pakenee). Tähtien kuollessa syntyvät aukot ovat kuitenkin paljon kylmempinä kuin maailmankaikkeuden taustasäteily, joten ne imevät säteilyä enemmän kuin säteilevät itse ulospäin eivätkä siten ole tällä perusteella nähtävissä. Kysymykseksi jääkin, voiko tarpeeksi pieniä mustia aukkoja edes olla olemassa. Lämpötilan lisäksi mustiin aukkoihin voidaan osoittaa

liittyvän nk. Bekensteinin-Hawkingin entropian [ks. Witten]; Jacob Bekenstein oli ehdottanut 1970, että mustan aukon pinta-ala muistutti entropiaa ja painovoima lämpötilaa.

- Mustien aukkojen gravitaatiokenttä näkyy ympäristöön, koska ne vuorovaikuttavat muiden massojen kanssa gravitoneja vaihtamalla [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit; Feynman]. Mustasta aukosta lähtevien gravitonien ei kuitenkaan tarvitse taistella gravitaatiokenttää vastaan: ne *luovat* ko. kentän!

11.8 Guth (s. 1945) ja Linde

Alan Guth ja Andrei Linde kehittivät maailmankaikkeuden alkuräjähdysteoriaa [ks. Gamow] nk. inflaatiomallilla. Guthin v. 1979 kehittämän nk. kosmisen inflaation mukaan maailmankaikkeus laajeni äärimmäisen nopeasti lyhyessä ajassa ollessaan vasta n. 10^{-35} sekuntia vanha. Tämän seurauksena se olisi huomattavasti suurempi kuin aikaisemmin on arvioitu, ja vain pieni osa siitä olisi havaittavissa eli nk. kosmisen horisonttimme sisäpuolella.

- Eräs inflaation seuraus on, että maailmankaikkeuden tulisi olla hyvin lähellä raja-arvoa ikuisesti laajenevan ja lopulta kokoon romahtavan maailmankaikkeuden välillä. Koska kuitenkin maailmankaikkeuden materiaa ei näytä olevan tarpeeksi tätä varten, merkittävä osa siitä täytyy olla 'pimeässä' muodossa, kuten jo galaksien liikkeiden ja stabiiliuden gravitaatiotutkimus on paljastanut [ks. Hubble]. Pimeäksi aineeksi on ehdotettu mm. pienen massan omaavia neutriinoita [ks. Fermi]. Toisenlaisen mahdollisuuden muodostavat mm. mustat aukot [ks. Penrose ja Hawking] ja ruskeat kääpiöt [ks. Hoyle], jotka kuuluvat nk. MACHO (engl. *Massive Astrophysical Compact Halo Object*) -luokkaan. Näyttää kuitenkin, että nämä kaikki muodostavat korkeintaan vain pienen osan kaikesta pimeästä aineesta, joka ei välttämättä muistuta mitään nykyisin tunnettua ainetta ja johon viitataan lyhenteellä WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*). Esimerkkeinä on mainittu mm. supersymmetriset hiukkaset [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] ja magneettiset monopolit [ks. Dirac].
- Inflaation aikaiset kvanttifluktuaatiot voivat selittää galaksien (ja aurinkojen ja planeettojen) olemassaolon. COBE-satelliitin vuonna 1992 kosmisesta taustasäteilystä löytämä lämpötilan hienoinen epätasaisuus onkin tulkittu galaksien 'siemeniksi'. Lämpötilavaihteluiden 'akustisten piikkien' teoreettinen analyysi antaa arvoja tärkeille kosmologisille parametreille.

Linden kaoottisessa inflaatiomallissa inflaatio ei tapahtunut samalla tavalla koko maailmankaikkeudessa, vaan eri alueiden satunnaiset erot vaikuttivat niissä tapahtuneen inflaation luonteeseen. Meille näkyvän maailmankaikkeuden horisontin tuolla puolen voi olla alueita, joissa luonnonlait ovat kehittyneet eri tavoin; tällä on merkitystä myös nk. antropoppisen periaatteen [ks. Hoyle] tulkinnassa.

1990-luvun tulokset osoittavat, että maailmankaikkeuden laajenemisvauhti [ks. Hubble] kasvaa jatkuvasti: kyse ei siis nykyäänkään ole vain kerran tapahtuneen räjähdysen seurausilmiöstä. Ilmiöön on liitetty termi 'kvintessenssi'. Maailmankaikkeuden massatiheys pyrkii hidastamaan laajenemista, ja nk. tyhjiön energia [uusi 'kosmologinen vakio', ks. Einstein] nopeuttamaan sitä. Viimeisten viiden miljardin vuoden ajan jälkimmäinen tekijä on dominoinut massan levittäytyessä yhä harvemmaksi, ja niinpä laajenemisvauhti kasvaa koko ajan.

Luku 12

Kaiken teoria

1950-luvulta alkaen kokeelliset fyysikot löysivät ja luokittelivat aina vain useampia 'alkeishiukkasia' (Luku 9); tämä ei ollut teorian kannalta tyydyttävää kehitystä. Järjestyttä saatiin aikaiseksi nk. aineen standardimallilla, jossa todellisten alkeishiukkasten lukumäärä pieneni ja — mikä parasta — niiden voitiin osoittaa olevan samojen hiukkasten eriytyneitä muotoja; käsite 'symmetriarikko' tuli tutuksi. Samalla erilaisten vuorovaikutusprosessien *suureita* koskevat säilymislaivit yhdistettiin entistä tiiviimmin vastaavien *teorioiden* invarianttiuteen, muuttumattomuuteen, jossakin symmetriaoperaatioissa.

Tapahtunut kehitys on hyvä esimerkki tieteellisten teorioiden kasvavasta yleisyydestä ja abstraktiuden tasosta. Vaikka standardimallin voidaan katsoa edustavan tämänhetkistä huippua fysiikassa, sillekin etsitään jo ylemmän tason selitystä, todellista 'kaiken teoriaa'.

12.1 Feynman (1918-1988)

Richard Feynman kehitti sähkömagnetismin [ks. Maxwell] kvanttikenttäteorian eli kvanttisähködynamiikan (QED) vuosina 1947-1950 nk. renormalisoinnin avulla. Teoria on osoittautunut lähes ällistytävän tarkaksi ja edellisten kvanttimekaanisten formulointien [ks. Heisenberg ja Schrödinger; Dirac] yleistykseksi. Feynman sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1965.

- Feynman jakoi palkinnon Julian Schwingerin (1918-1994) ja Shin'ichiro Tomonagan (1906-1979) kanssa. Neljäs teoriaa kehittänyt fyysikko oli Freeman Dyson (s. 1923).

QED muodosti ensimmäisen vaiheen nk. aineen standardimallissa, jossa luonnon perusvoimat syntyvät virtuaalisten energiapakettien eli kvanttien, bosonien,

vaihtona ainehiukkasten, fermionien välillä [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit; Fermi]. QED käsittelee sähkömagneettista vuorovaikutusta, jossa välittäjäkvantti on fotoni [ks. Einstein]. Koska fotoni on massaton, sähkömagneettiset voimat ovat pitkän kantaman voimia. Myöhemmin QED yhdistettiin heikkoon vuorovaikutukseen [ks. Weinberg].

- Hienorakennevakio [ks. Bohr] kertoo, kuinka suurella todennäköisyydellä fotoni kiinnittyy varattuun hiukkaseen eli kuinka suuri on varattujen hiukkasten välinen sähkömagneettinen voima. Samalla määräytyvät mm. atomien koko ja molekyylien sidosenergioiden voimakkuudet.

QED selitti magneettisesta resonanssista [ks. Uhlenbeck ja Goudsmit] johtuvan vedyn spektrin hienorakenteen tarkemmin kuin Diracin teoria, koska jälkimmäinen antoi hieman virheellisen arvon elektronin magneettiselle momentille. Lisäksi QED selitti Diracin teorian vastaisen spektrin hienorakenteen, nk. Lambin siirtymän, jonka Willis Eugene Lamb (s. 1913) oli mitannut vetyatomille 1947.

- Lambin siirtymä aiheutuu virtuaalisten fotonien säteilemisestä ja uudelleen sieppauksesta johtuvasta muutoksesta atomin energiatiloissa. Lamb jakoi vuoden 1955 fysiikan Nobelin palkinnon Kuschin; jälkimmäinen oli mitannut elektronin magneettisen momentin tarkan arvon.

12.2 Gell-Mann (s. 1929)

Murray Gell-Mann hyödynsi 1960 ryhmäteorian [ks. Lagrange] nk. SU(3)-symmetriaa alkeishiukkasiin ja esitti 1964 kaikkien hadronien koostuvan pienemmistä osasista, kvarkeista. Hadroneja on kahdenlaisia: baryonit koostuvat kolmesta kvarkista (tai kolmesta antikvarkista), mesonit kvarkista ja antikvarkista. Ensimmäiset kokeelliset kvarkkien olemassaoloa tukevat mittaukset tehtiin 1968; Gell-Mann sai fysiikan Nobelin palkinnon 1969.

Vuoteen 1980 tultaessa tiedettiin, että kvarkit ja leptonit [ks. Fermi] muodostavat kolme perhettä, joista jokainen koostuu kahdesta kvarkista ja kahdesta leptonista: 'varsinaisesta' leptonista ja tämän neutrinosta (lisäksi tulevat kaikki vastaavat antihhiukkaset). Meille tärkeä materia koostuu 'ylös' (u) ja 'alas' (d) kvarkeista, elektronista (e) ja tämän neutriinosta (ν_e). Protonit (uud) ja neutronit (udd) muodostavat atomiytimet, jotka puolestaan muodostavat elektronien kanssa itse atomit.

- Toisen perheen muodostavat kvarkit 'outo' (s) ja 'lumo' (c), leptoni myoni (μ) ja ν_μ . Kolmas perhe: 'pohja' (b), 'huippu' (t), tau (τ) ja ν_τ . Tästä seuraa, että löydettyjen 'alkeishiukkasten' määrä on kasvanut

hyvin suureksi; esim. hadroneita on löydetty yli kaksisataa. Standardimalli on ennustanut ne kaikki; mallia voidaan hyvällä syyllä pitää tieteen historian menestyksekkäimpänä ja merkittävimpanä teoriana, niin tarkasti teoria ja kokeet tukevat toisiaan.

Kvarkit muodostavat hadroneja nk. värivoiman avulla. Tämä voima, jonka välittäjähiukkaset on nimetty gluoneiksi, vuotaa hieman myös hiukkasten ulkopuolelle; näin muodostuu hadronien välinen vahva vuorovaikutus [vahva ydinvoima, ks. Rutherford]. Värivoiman 1970-luvulla kehitettyä kvanttikenttäteoriaa kutsutaan kvanttiväridynamiikaksi (QCD), jonka kehittäjiä ovat mm. David Gross, Frank Wilczek ja David Politzer. Teorian mukaan kvarkkeja tai gluoneja ei voi esiintyä irrallisina: niiden vaikutukset näkyvät kuitenkin samanlaisissa törmäyskokeissa kuin millä Rutherford päätteli atomiytimien olemassaolon.

Gell-Mann on lisäksi yksi monista nykyfyysikoista, jotka pyrkivät ristiriidattomien (dekoherenttien) historioiden avulla osoittamaan kvanttimekaniikan mystifioinnin [ks. Bohr] väärintulkinnaksi. Suomalainen fyysikko Kari Enqvist on kirjoittanut näihin tutkimuksiin viitaten: *”Seitsemänkymmentä vuotta filosofointia voidaan sivuuttaa, kun viimein ymmärrämme miksi ihmisen mittakaavassa kvanttimekaniikan epämääräisyys katoaa ja miten arkipäiväinen, klassista fysiikkaa totteleva maailma kasvaa esiin kvanttimaailmasta”*.

- Nykykäsityksen mukaan kvanttifysiikka on aidosti ei-determinististä [ks. Heisenberg ja Schrödinger]. Tämä ei kuitenkaan kaada makroskooppisen maailman mahdollista deterministisyyttä [ks. Laplace], niin selvästi meidän tuntemamme maailma poikkeaa kvanttitasoinnista; dekoherenssin käsite liittyy juuri tähän. Esimerkiksi kun makroskooppisen maailman ilmiöiden tilastollisuutta perustellaan determinismin rikkoutumisella, sorrutaan arveluttavaan oletukseen maailman yksinkertaisuudesta. Todellisuudessa tutkijoiden on mahdotonta olla tietoisia kaikista tutkittavaan ilmiöön liittyvistä monimutkaisista ja vaihtelevista syy-seuraussuhteista.

12.3 Weinberg (s. 1933)

Steven Weinberg yhdisti QED:n [ks. Feynman] ja heikot vuorovaikutukset [β -hajoamisen; ks. Fermi] sähköheikoksi kvanttikenttäteoriaksi v. 1967. Sähköheikon teorian taustalla on ylemmän tason symmetria, joka on ’rikkoutunut’ ja tuottanut hyvin erilaiset vuorovaikutusbosonit: massattoman fotonin ja hyvin raskaat W- ja Z-hiukkaset. Alkuräjähdyksen [ks. Gamow] kaltaisissa lämpötiloissa symmetria olisi voimassa. Weinberg sai fysiikan Nobelin palkinnon v. 1979.

- Sheldon Lee Glashow (s. 1932) oli ennakoinut teoriaa omalla tahollaan ja Abdus Salam (1926-1996) oli päätenyt samaan tulokseen itsenäisesti. He jakoivat Nobelin palkinnon Weinbergin kanssa.
- Sähköheikon vuorovaikutuksen välittävät hiukkaset havaittiin kokeellisesti 1983 (W) ja 1984 (Z). Carlo Rubbia (s. 1934) ja Simon van der Meer (s. 1925) jakoivat löydöistään fysiikan Nobelin palkinnon 1984.

Gerardus 't Hooft (s. 1946) osoitti v. 1971 teorian olevan renormalisoituvan QED:n tapaan; hän sai laskelmistaan fysiikan Nobelin palkinnon v. 1999 yhdessä Martinus J. G. Veltmanin kanssa. Aineen standardimalli voidaan kiteyttää näin: aine koostuu kvarkeista ja leptoneista, joita tiettyä symmetriaa noudattavat Yangin-Millsin kentät pitävät yhdessä. Symmetrioiden rikkoutuminen alkuräjähdyksen edetessä on aiheuttanut vuorovaikutusten eriytymisen.

- Chen Ning Yang (s. 1922) kehitti yhdessä Robert Laurence Millsin (s. 1927) kanssa 1954 Maxwellin kentän yleistävän nk. Yangin-Millsin kentän. Yang sai fysiikan Nobelin palkinnon yhdessä Tsung Dao Leen (s. 1926) kanssa nk. symmetriarikkojen tutkimuksesta v. 1957; niiden avulla on esim. pyritty selittämään antimaterian [ks. Dirac] häviäminen maailmankaikkeudesta.

Sähköheikon voiman oletetaan olevan yhdistettävissä QCD:hen [ks. Gell-Mann]: näin syntyisi suuri yhtenäisteoria. Tätä yhdistymistä vastaavaa symmetriaa ei vielä kuitenkaan tunneta. Puuttuvaksi vuorovaikutukseksi jäisi silloinkin vielä gravitaatio; sen lisääminen merkitsisi jo 'kaiken teoriaa'. Parhaat kandidaatit kaiken teorialle ovat uudet supersäieteoriat [ks. Green ja Schwartz; Witten].

- Yhdistämisen puolesta puhuu kaksi asiaa. Ensinnäkin QCD:ssa havaittava kytkentävakioiden muuttuminen energian funktiona antaa ymmärtää, että maailmankaikkeuden alun kuumissa oloissa se yhtyisi sähköheikkoon vuorovaikutukseen. Toiseksi sähköheikkoon voimaan liittyy nk. yhtenäistämiskulma (tai Weinbergin kulma), joka voidaan mitata. Tämä muodostaa hyvän testin yhtenäisteorialle: sen tulee antaa kulman arvon teoreettisesti.

Weinberg on puolustanut voimakkaasti reduktionismin oppia: kaikki makroskooppisen maailman ilmiöt ovat seurausta kvanttifysiikasta. Fyysikkojen haaveilema 'kaiken teoria' on — perimmältään — myös elämän synnyn takana. Weinberg kuitenkin korostaa, että on olemassa monenlaisia kuvauksen tasoja; 'kaiken teorian' sijaan voisikin olla perustellumpaa puhua perusteoriasta tms.

12.4 Green (s. 1946) ja Schwartz (s. 1941)

Michael Boris Green ja John H. Schwartz kehittivät uutta nk. säieteoriaa, joka pyrkii avaruusajan ulottuvuuksia lisäämällä selittämään luonnonlait yksinkertaisemmin kuin aikaisemmat kvanttikenttämallit [ks. Feynman; Gell-Mann; Weinberg]. Teoriassa perushiukkaset redusoituvat nk. säikeiksi, joiden värähtely määrää hiukkasen massan, sähkövarauksen sekä vahvan ja heikon varauksen.

- Säieteorian esiasie on peräisin vuodelta 1968, jolloin se keksittiin melkein vahingossa. Siitä muodostui kenttäteoria 1974. Vieläkin kauempaa etsittäessä teoria perustuu Kaluzan-Kleinin teoriaan [ks. Einstein] ja matemaatikko Leonhard Eulerin (1707-1783) nk. betafunktioon.

Green ja Schwartz osoittivat v. 1984, että säieteoriat — jotka tuolloin antoivat kymmenulotteisen avaruusajan — ovat myös kvanttiteorioita. Koska ne sisältävät automaattisesti myös kvanttigravitaation, niitä pidetään parhaina ehdokkaina 'kaiken teoriaksi' [ks. myös Witten]: nk. standarditeoriahan ei sisällä gravitaatiota.

- Säieteorioiden etuna on, että ne antavat olemassa olevien hiukkasten ominaisuudet kun taas nk. standardimalliin ne täytyy syöttää alkuti-etoina. Koska säikeet eivät ole pistemäisiä, vaan todennäköisesti nk. Planckin pituuden suuruisia, tätä skaalaa pienemmät etäisyydet eivät ole oikeastaan olemassakaan: juuri tämän ansiosta teoria poistaa kvanttimekaniikan ja yleisen suhteellisuusteorian välisen ristiriidan [ks. Penrose ja Hawking].

12.5 Witten (s. 1951)

Säieteorian [ks. Green ja Schwartz] ongelmaksi muodostui viisi toisistaan poikkeavaa ratkaisua. Edward Witten käynnisti v. 1995 teorian kehityksen toisen vaiheen osoittamalla, että nämä ratkaisut ovat yhdistettävissä: näin syntyi nk. M-teoria. Samalla hän lisäsi kuudennen mahdollisen ratkaisuvaihtoimen ja yhden uuden avaruusulottuvuuden.

- Witten on kuvannut teoriaa ”21. vuosisadan fyysikaksi, joka on satumalta joutunut 20. vuosisadalle”.

Säieteorian avulla on ratkaistu mustien aukkojen nk. Bekensteinin-Hawkingin entropiaan [ks. Penrose ja Hawking] liittyvä ongelma; on ilmeistä, että teoriassa ollaan ainakin oikeilla jäljillä. Jatkossa sen tulee tuottaa myös nykyinen aineen standardimalli.

Liite A

Luonnontieteiden filosofiaa

A.1 Tiede, maailmankuva ja filosofia

Tieteellä tarkoitetaan järjestelmällistä ja yhtenäistä *luontoa ja ihmistä* koskevien tietojen kokonaisuutta ja etenkin sen tavoittelussa käytettyä kriittistä metodologiaa. Vaikka kaikki ihmistä tutkivat kulttuuritieteet eivät väitä tavoittelevansa totuutta, luonnontieteet, joihin fysiikkakin kuuluu, pyrkivät mahdollisimman totuudelliseen maailmankuvaan. Aivan yleisimmässä muodossaan maailmankuvalla tarkoitetaan ”maailmaa koskevaa, tavalla tai toisella perusteltua väitteiden järjestelmällisiä kokonaisuutta”. Tieteellisessä maailmankuvassa vaaditut perustelut ovat tieteellisiä. Maailmankuvassa on pakostakin ripaus filosofiaa mukana: esim. mitä voidaan pitää tieteellisenä?

Filosofia tutkii todellisuutta, tietoa ja inhimillistä elämää koskevia yleisiä *käsityksiä sekä niiden perusteita*. Kyse on ihmisen näkökulmasta asioihin ja niiden merkityksiin. Filosofia voidaan jakaa metafysiikkaan, tietoteoriaan, etiikkaan ja estetiikkaan.

A.2 Estetiikka

Estetiikaksi kutsuttu filosofian ala voidaan jakaa taiteen filosofiaan ja ’esteettisen arvon’ eli kauneuden filosofiaan. Jälkimmäisessä on mm. kiistelty siitä, kuinka suuressa määrin kauneus liittyy toisaalta kohteen (ulkoisiin) ominaisuuksiin ja toisaalta sen tarkastelijan kokemaan (sisäiseen) mielihyvään. Eräiden tutkijoiden mielestä varsinkin matemaattisesti ilmaistuihin tieteellisiin teorioihin liittyy kauneusarvoja, esim. yksinkertaisuutta.

Ei ole epäilystäkään, etteikö esim. fysiikan kehitystä olisi karakterisoinut teorioiden kasvanut ’taloudellisuus’: uusien teorioiden monimutkaisuutta on

tasapainoittanut niiden kasvanut yleisyys. Esimerkiksi käytössä olevien perussuureiden (Liite E) lukumäärä on ajan myötä vähentynyt.

A.3 Etiikka

Moraali on ihmisyyhteisöjen tapoihin liittyvä, empiirisesti havainnoitavissa oleva ominaisuus. Etiikka eli moraalifilosofia tutkii moraalialueita filosofisin keinoin. Voidaan tehdä jako analyttiseen ja normatiiviseen etiikkaan. Analyttinen etiikka eli metaetiikka on moraalisiin käsitteisiin — esim. hyvyys, oikeudenmukaisuus, velvollisuus — liittyvää analyysiä. Normatiivinen etiikka pyrkii määrittelemään moraalisääntöjä.

Tieteen tekemiseen ja sen sovellutuksiin etiikka kuuluu siinä missä mihin tahansa muuhun ihmisen toimintaan. Luonnontieteistä varsinkin biologia (ja teknologioista lääketiede) on usein julkisen riepottelun alaisena todellisista tai kuvitelluista eettisistä ongelmista syytettynä. Fysiikan kohdalla tilanne on helpompi, vaikka suuren yleisön silmissä ydinaseiden kehitys lienee yhä alan 'synti' huolimatta vuosikymmeniä jatkuneesta ydinennergian rauhanomaisesta käytöstä.

Ongelmista huolimatta tietoa ei itsessään pidä demonisoida, eikä tiede sinällään kuulu etiikan piiriin. Arvot ja tieteelliset tosiasiat käsittelevät niin eri asioita, ettei toisen avulla voi selittää toista; esim. atomia ei kukaan voi kutsua itsessään pahaksi. Voisi myös väittää, että vaihtoehtoisista tiedonhankintamenetelmistä, auktoriteettiuskosta tai intuitiosta, ei ole tieteellisen menetelmän korvaajiksi edes eettisin perustein.

A.4 Metafysiikka

Metafysiikka on filosofian osa-alue, joka tutkii olevaisen perimmäistä luonnetta: se on tiedettä 'olevasta olevana'. Todellisuuden ajatellaan koostuvan entiteeteistä, jotka voidaan jakaa erilaisiin luokkiin eli kategorioihin ja erilaisiin olemisen tapoihin eli modaliteetteihin. Kategorioita ovat esim. oliot (eli substanssit), ominaisuudet, suhteet, tosiasiat, tapahtumat, joukot, lajit, propositiot, luvut, lait ja jopa maailmat. Modaliteetteja ovat mahdollisuus, välttämättömyys ja kontingenssi (ei välttämätön, muttei myöskään mahdoton). Metafysiikan ydinosana, ontologia ('yleinen metafysiikka') on oppi kategorioista.

Luonnontieteilijän näkökulmasta tämä jo Aristoteleelta juontuva filosofia tuottaa usein itse omat ongelmansa. Tutkimuksen kannalta on järkevintä omaksua monistinen nk. materialistinen metafysiikka: todellisuus on perimmäältään ainetta, tarkemmin massaenergiaa. Vaikka tutkija voi tällaisen

kannan sijaan uskoa dualistisesti myös idealistiseen metafysiikkaan, joka suosittelee henkisellet todellisuudelle, tuloksia synnyttävä tieteellinen työ perustuu poikkeuksetta materialistiseen olettamukseen tutkittavasta kohteesta.

Kaikkia metafysikaalisia ongelmia ei kuitenkaan voi noin vain sivuuttaa. Voimme kysyä miksi maailma toimii säännönmukaisesti eli miksi matematiikka on niin voimakas työkalu (etenkin fysikaalisia) luonnonilmiöitä selitettäessä? Mitä itse asiassa tarkoitetaan luonnonlakien olemassaololla? Nämä voivat myös olla todellisia ikuisuuskyseksiä. Filosofien keskuudessa on kiistelty, pitäisikö näistä kysymyksistä vaieta vai ei!

A.5 Tietoteoria

Tietoteoria eli epistemologia tutkii inhimillisen tiedon luonnetta, laajuutta ja alkuperää. Realistisessa tietoteoriassa tiedon kohteen olemassaolon ja ominaisuuksien katsotaan olevan tarkastelijasta riippumattomia: on siis olemassa ei-episteemisiä entiteettejä. Esimerkiksi kvasaarit ja vetyatomit eivät vain ole olemassa, vaan olivat olemassa myös ennen ihmiskunnan ilmaantumista maailmankaikkeuteen.

Klassinen tiedon käsite: tieto on hyvin perusteltu tosi uskomus, eli X tietää että p jos ja vain jos **(1)** X uskoo että p **(2)** p on tosi **(3)** X :llä on päteviä perusteita väittää että p . Nk. 'fallabilistisessä' tietoteoriassa puhutaan absoluuttisen totuuden sijaan todennäköisistä totuuksista ja totuudenkaltaisuudesta. Jo em. klassinen formulointi on lievästi fallabilistinen, koska viimeinen kohta ei väitä ' X :n olevan varma että p '. Vahvassa fallabilismissä muutetaan kaikkia kohtia, esim. **(1)** X uskoo että p on todenkaltainen **(2)** p on todenkaltainen **(3)** X :llä on päteviä perusteita väittää, että p on todenkaltaisempi kuin kilpailevat uskomukset.

Tiedonhankinnan strategiat voidaan jakaa rationalismiin ja empirismiin; kolmas vaihtoehto, skeptismi, ei usko koko projektiin (tässä käytetty sivistys-sanakirja ei tuntenut muotoa skeptisismi, jonka käyttö saattaisi olla perusteltuakin).

- Rationalismi: Näkemys, jonka mukaan tiedon perusta on inhimillinen järki eli käsitteellinen päättely formaalisten tieteiden (matematiikka ja logiikka) avulla, ilman kokemusta tai aistihavaintoja. Rationalismiin liittyy
 - deduktio, eli yksittäisten väitteiden tai totuuksien johtaminen yleisistä väitteistä tai totuuksista, ja
 - analyttinen *a priori* -tieto, joka tarkoittaa loogisesti välttämättä tosia lauseita kuten 'kaikki poikamiehet ovat naimattomia'

- Empirismi: Näkemys, jonka mukaan tieto pohjautuu aistihavaintoihin ja kokemukseen eli empiirisiin tieteisiin (esim. fysiikka ja biologia). Empirismiin liittyy
 - induktio, eli yleisten hypoteesien ja teorioiden johtaminen yksittäisistä havainnoista ja kokeista, ja
 - synteettinen *a posteriori* -tieto, joka on empiiristä ja perustuu siten kokemukseen
- Skeptismi: Näkemys, jonka mukaan aitoa tietoa on lähes mahdotonta saavuttaa; aistihavainnotkin voivat johtaa harhaan. Agnostisismi on kanta, jonka mukaan inhimillisen tietokyvyn rajoitukset tekevät joidenkin perusasioiden ymmärtämisen mahdottomaksi; esim. nk. evoluutionaarinen epistemologia. Jyrkintä skeptismiä kutsutaan tieto-opilliseksi nihilismiksi.

Tieteen historiassa ja filosofiassa näiden kantojen välillä on käyty kovaakin taistoa. Tämä on ollut aivan turhaa, sillä tuloksia saaneet tiedemiehet ovat hyödyntäneet työssään sekä rationalismin että empirismin ihanteita. Eddington on kirjoittanut: ”On hyvä nyrkkisääntö olla luottamatta liikaa teoriaan ennen kuin kokeet ovat varmistaneet sen. [...] on myös hyvä nyrkkisääntö olla luottamatta liikaa havaintotuloksiin ennen kuin teoria on varmistanut ne”. Skeptismi on asia erikseen, sillä vaikka tieteelliseen työhön kuuluu kritiikki ja epäily, se ei tavallisesti kohdistu itse tiedon saavuttamisen mahdollisuuteen, vaan jonkin yksittäisen tiedon oikeellisuuteen. Voisi kuvitella, että ihmisen on mahdotonta saada tietoa atomitasoin ilmiöistä sekä niiden pienuuden (näkyttömyyden) että erikoisuuden (kvanttiluonteen) johdosta: biologisen evoluution meille suomat aistit eivät tue tällaista tutkimusta. Kuitenkin fyysikkojen saavutukset ovat aivan kiistattomat; on jopa esitetty, että matematiikka olisi yksi erikoislaatuinen ’aisti’!

A.6 Totuus

Kun empirismi hyväksytään tärkeäksi tieteen metodiksi, herää tietenkin kysymys *mitä* tutkija havainnoi. Aistimme koostuvat viime kädessä sähköisistä signaaleista, joista aivomme ’konstruoi’ ulkoisen maailman. On jopa väitetty, että ihminen havainnoi vain oman tietoisuutensa sisältöä, jolla ei tarvitse olla mitään tekemistä ulkoisen todellisuuden kanssa (jos sellaisen olemassaolo edes myönnetään). Tässä kohdin edellä mainittu biologinen evoluutio tarjoaa kuitenkin riittävän perustelun tieteellisen realismin puolesta: jos havaintomme maailmasta olisivat radikaalilla tavalla vääriä, olisimme tuskin menestyneet kovinkaan hyvin lajina. Meillä täytyy siis olla ’tosia uskomuksia’

maailmasta jossa elämme. Filosofia tuntee useita erilaisia nk. totuusteorioita (suluissa kommentteja):

- Korrespondenssi- eli vastaavuusteoria: totuus merkitsee yhdenmukaisuutta ulkoisen todellisuuden kanssa. (Luonnontieteellinen ajattelu — fallibilistinenkin — tukeutuu hyvin pitkälle tähän ajatteluun.)
- Koherenssi- eli yhteensopivuusteoria: totuus on jotain, joka sopii yhteen aikaisemman tiedon kanssa. (Tämä ei ole pätevä totuuden ontologiseksi määritelmäksi, mutta kertoo hyvin paljon siitä, tiedämmekö totuuden.)
- Pragmatistinen teoria: totuus on jotain, joka toimii käytännössä. (Varovasti käytettynä kertoo myöskin tietomme tasosta; vrt. perustutkimus vs. soveltavat nk. tekniset tieteet. Voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia johtaessaan instrumentalismiin, jonka mukaan tieteelliset teoriat ovat pelkästään enemmän tai vähemmän toimivia havaintojen systematisointivälineitä.)
- Konsensusteoria: totuus on ideaalinen raja-arvo, jota tieteellinen yhteisö lähestyy konsensuksen syntymisen kautta. (Ajatus raja-arvosta on fallibilistisena hyväksyttävä, mutta totuuden määritelmäksi tästä ei etenkään ole.)
- Tropologinen teoria: totuus on vallan- ja voimankäytön muoto. (Postmodernin retoriikan edustama varsin hyödytön käsitys 'totuudesta'.)

On huomattava, että edellä ei puhuta mistään yksittäisen väitteen totuusarvosta, vaan yleensäkin siitä, minkä vahvuinen totuus asetetaan tavoitteeksi. Luonnontieteilijälle väite 'Maa kiertää Aurinkoa' ei ole totta pelkästään sen takia, että se tarjoaa mahdollisuuden yksinkertaistaa planeettaliikkeen yhtälöitä, puhumattakaan että kyse olisi pelkästä sopimuksesta; me todella tiedämme että näin myös on. Tiede ei tietenkään toimintana suolla varmoja totuuksia, kuten jokainen tieteellisiä julkaisuja lukeva tietää: tieteen eturintamalla käydään kovaakin polemiikka uusien teorioiden oikeellisuudesta ja merkityksestä.

Totuutta pidetään usein ongelmallisena käsitteenä kielifilosofisista syistä. Etenkin Kurt Gödelin (1906-1978) ja Alfred Tarskin (1902-1983) töihin on vedottu argumentteina tieteellistä realismia vastaan. Semiotiikan eli yleisen merkkitieteen peruskäsitteitä ovat **(1)** syntaksi, jolla tarkoitetaan merkkien suhdetta toisiinsa, **(2)** semantiikka, joka tutkii merkkien suhdetta niitä vastaavaan asiaan tai oloon, ja **(3)** pragmatiikka, joka tutkii merkkien suhdetta niiden käyttöön ja käyttäjiin. Postmodernin retoriikan mukaan kielen ja todellisuuden välisestä suhteesta olisi mahdotonta puhua kielen kaikkialle ulottuvan ja rajoittavan vaikutuksen vuoksi; puhutaan kielestä universaalina

välineenä ja semantiikan 'lausumattomuudesta'. Nk. peliteoreettinen semantiikka ja yleensäkin käsitys kielestä kalkyylinä vastustaa tätä näkemystä: edellisessä semantiikkaa voidaan jopa pitää pragmatiikan osana. Tämä ei tarkoita tiedon suhteellistamista, kuten esim. Charles Saunders Peircen (1839-1914) ja Jaakko Hintikan (s. 1929) kaltaiset tieteellistä realismia tukevat filosofit ovat osoittaneet.

A.7 Teorianmuodostus

Kuten edellä todettiin, teoria on tärkeä osa tieteellistä tutkimusta. Yksi uuden teorian ilmeisimmistä hyvistä ominaisuuksista on sen *sarjallisuus*, so. kyky ymmärtää aikaisemman teorian selitysvaivoja. Hyvänä esimerkkinä on yleisen suhteellisuusteorian kyky selittää Newtonin painovoimateoria. Hyvän teorian ominaisuus on myös sen *heuristisuus*, kyky johtaa tutkimusta uusiin, yllättäviinkin suuntiin. Tämä tapahtuu teorian tarjoamien uusien ennusteiden kautta. Jotta alkuperäinen teoria voitaisiin edes mahdollisesti hyväksyä, ennusteiden tulee tietenkin myös toteutua. Näin *testattavuus* on ennusteen perusvaatimus. Lisäksi testauksen on oltava objektiivista, kaikkien tiedemiesten ulottuvilla; *toistettavuus* on tieteellisten kokeiden kulmakivi. Myös teorian *konsilienssi*, yhteensopivuus ja verkottuminen muiden, jopa eri tieteenalojen, teorioiden kanssa, on vahva viite sen hyvydestä. Hyvien teorioiden *taloudellisuus* mainittiin jo estetiikan yhteydessä. Teorioiden *totuudellisuus* on näiden kriteerien avulla määriteltävissä oleva tavoite.

Teorian ennusteiden pohjalta tehdyt uudet havainnot vaikuttavat usein alkuperäiseen teoriaan: Peirce kuvasikin tiedettä 'itseään korjaavaksi prosessiksi'. Tämä selittää tieteen kiistattoman *edistyneisyyden*. Hypoteesit ovat teoriakandidaatteja, joiden ei tarvitsekaan olla aukottomasti perusteltuja. Tutkijat käyttävät kokemustaan ja luovuuttaan (intuitiota) hypoteesin muodostukseen, ja jos tulos kestää testauksen, hypoteesi kehittyy vähitellen malliksi ja viimein teoriaksi. Etenkin teoriakehityksen alkuvaiheessa uusien teoreettisten entiteettien olemassaoloon tulee suhtautua varauksella. Atomiteorian kohdalla epäily meni jopa liiallisuuksiin: monet positivistisesti ajattelevat filosofit pitivät atomeja periaatteellisista syistä pelkästään hyödyllisinä fiktioina, vaikka epäsuoraa todistusaineistoa oli jo runsaasti.

On ehkä syytä korostaa, että hypoteesin muodostus tekee luonnontieteistäkin luovaa toimintaa. 'Länsimaisen tieteellisen rationalismin' ja mielikuvituksen välillä ei ole toisiaan poissulkevaa ristiriitaa. Toisaalta, vaikka tiede on ennakkoluuloton teorioiden suhteen, se on kriittinen todisteiden suhteen; kyse ei ole taiteestakaan. Tämän ei pitäisi olla ongelmallista, sillä eihän tiede pyri taiteita syrjäyttämään. (Samalla väite, että luonnonilmiöiden tieteellinen selitys riistäisi niiltä kauneuden, on järjetön.) Luovuuden lisäksi toinen

huomattava hypoteeseihin liittyvä seikka on, että tieteellisessä tutkimuksessa *jonkinlainen* teoria on aina tarpeen: vain sen avulla voi keksiä todella hyödyllisiä kysymyksiä ja luoda ennusteita.

Tiedonhankinnan strategioihin kuuluu nk. reduktionismi, näkemys, jonka mukaan annettu kohde voidaan jakaa yksinkertaisimpiin komponentteihin. Tieteenfilosofissa reduktionismista on tehty aivan turhaan 'mörkö'; kyse lie-nee pelkästä väärinkäsityksestä. Maltillinen (tai hierarkkinen) reduktionismi tarkoittaa sitä, että teoriatasoja ei tavallisesti ole järkevää mennä alas kuin yhden askeleen. Suurin osa biologiaa selittyy biokemialla ja yksinkertaisella fysiikalla; kvanttimekaniikka on jo tarpeetonta, vaikka kemia itse siihen perustuukin. Yhteiskuntatieteissä taas ei tarvita kemiaakaan: psykologian tuntemuksella pääsee jo pitkälle. *Reduktionismi on tutkimusstrategia*, ja lopullisena päämääränä on synteesi, tutkittavan kohteen kokoaminen elementeistään. Reduktionistisen tieteen ei myöskään tarvitse kiistää nk. emergeettien ominaisuuksien olemassaoloa. Näin ollen esim. fysiikan asemaan luonnonkuvauksen perustieteenä ei pidä lukea liian paljoa.

- Luonnossa alemmalta teoriatasolta ylemmälle siirryttäessä syntyy usein nk. emergeettejä ominaisuuksia. Esimerkki yksinkertaisesta emergenssistä: yksittäisillä kaasuhiukkasilla on nopeus- ja paikkavektorit, mutta ei esim. lämpötilaa, painetta tai entropiaa. Nämä suureet tulevat mahdollisiksi siirryttäessä hiukkaskuvauksesta makroskooppiseen kuvaukseen (kaasusäiliö). Makroskooppisten suureiden mittaus ei kerro mitään yksittäisten hiukkasten tilasta, mutta tästä huolimatta systeemi on täysin sopusoinnussa ontologisen reduktionismin kanssa. Mutkikkaampia emergeettejä ominaisuuksia ovat esim. elämä ja tietoisuus.
- Nk. ontologisessa reduktionismissa kohde koostuu yksinomaan osistaan ja sen kaikki ominaisuudet ovat palautettavissa näiden osien ominaisuuksiin ja relaatioihin (tämä on käytännössä sama asia kuin materialismi). Nk. tietoteoreettisessa reduktionismissa myös kohdetta koskeva tieto voidaan palauttaa osia ja niiden käyttäytymistä koskevaksi tiedoksi; tämä absurdin vahva vaatimus ei kuulu luonnontieteelliseen ajatteluun.

Tieteen edistyessä tietomme karttavat ja teoriat kehittyvät yleisempään suuntaan, selittäen yhä laajempia kokonaisuuksia. Tämä näkyy tavassa, jolla luonnontieteet muodostavat osittain päällekkäisten alojen ketjun, vaikka sisäisesti niiden tiedonhankintamenetelmät saattavat poiketa kovastikin toisistaan. Ajatukset ajallisesti ja tieteidenvälisesti yhteismitattomien tieteellisten 'paradigmojen' olemassaolosta on syytä heittää historian roskakoriin!

Liite B

Tieteentutkimuksesta

Vuosi 2005 on julistettu kansainväliseksi fysiikan vuodeksi¹. Vaikka tässä aihetta pohjustetaan yleisen tieteesosiologian ja -filosofian kannalta, kyse on luonnontieteellisen koulutuksen saaneen ihmisen tavasta ymmärtää tiedettä ja sen tutkimusta.

Vaikeasti määriteltävällä tieteellä on eräitä tunnusmerkkejä. Tutkimuksen kohteet, luonto, ihminen ja yhteiskunta, muodostavat laajan kirjon. Prosessina tieteellisen tiedon hankinta on järjestelmällinen ja itseään korjaava. Tärkeää on myös, että hankittu tieto muodostaa systemaattisen kokonaisuuden. Poincarén sanoin tiede on rakennettu tosiseikoista niin kuin talo kivistä; pelkkä kokoelma tosiseikkoja ei ole tiedettä sen enempää kuin kivikasakaan talo.

Vaikka yliopistolaitos syntyi keskiajalla, vasta 1600-luvun tieteellisten seurojen myötä tiede institutionalisoitui tehokkaalla tavalla. Paitsi että nyt keskityttiin uuden tiedon hankintaan vanhan säilyttämisen ja kommentoinnin sijaan, myös tutkijoiden keskinäinen vuorovaikutus lisääntyi. Charles S. Peircelelle tämä tieteen julkinen aspekti oli tärkeä jo 1800-luvulla; juuri hän kuvasi tiedettä ”itseään korjaavaksi prosessiksi”. Ymmärrettiin myös, että ulkoiset tekijät kuten rahoitus, havainto- ja mittausteknologian kehitys ja jopa esim. tutkijoiden henkilökohtaiset aihevalinnat vaikuttivat (ainakin lyhyellä aikavälillä) tieteen kehitykseen. Tieteen eetosta käsittelevässä julkaisussaan v. 1942 Robert K. Merton tutki, miten tieteellinen työ poikkeaa muusta inhimillisestä toiminnasta. Tieteen sosiologia eriytyi omaksi tutkimusalakseen.

Luonto ja tiedeyhteisö vaikuttavat siis yhdessä tiedon syntyyn. Uusi nk. tiedonsosiologia alkoi 1920-luvulla tutkia mekanismeja, joilla etenkin arki-jatteluun uskomukset muotoutuivat. Yksi merkkipaalu tässä kehityksessä oli

¹Artikkeli on alunperin julkaistu Oulun yliopiston Fysikaalisten tieteiden laitoksen juhluvuotta käsittelevässä verkkopalvelussa. Vaikka osa tekstistä käsittelee samoja aiheita kuin edellinen liite, sosiologia on tässä näkyvämmän mukana.

Peter L. Bergerin ja Thomas Luckmannin *Todellisuuden sosiaalinen rakentuminen* vuodelta 1966 (Gaudeamus 1994). Ludwik Fleck oli jo 1930-luvulla tutkinut samalta pohjalta myös luonnontieteellisten faktojen syntyä. Eräänlainen 'läpimurto' tapahtui David Bloorin vuoden 1976 teoksen *Knowledge and Social Imagery* myötä. Tiedettä ei enää nähty merkittävästi muusta inhimillisestä toiminnasta poikkeavana.

Maltillisten tieteentutkijoiden mukaan sekä luonnontieteilijät että tieteenfilosofit ovat ymmärtäneet tiedonsosiologisen keskustelun väärin, tieteen vastustamisena. Tiedonsosiologia vastustaa vain tiettyjä naiiveiksi nähtyjä käsityksiä tieteestä. Tarkastelemme seuraavassa eräitä näitä käsityksiä Mika Kiikerin ja Petri Ylikosken teosta *Tiede tutkimuskohteena* (Gaudeamus 2004) seuraten. Näistä oletus tieteen eetoksesta kuuluu selvimmin sosiologian piiriin. Tieteellinen keksiminen pitää sisällään vahvan psykologisen juonteen. Tieteellinen realismi ja siihen liittyvä totuusteoria ovat jo filosofisia kysymyksiä. Näiden jälkeen onkin hyvä tarkastella kahta muuta perustavanlaatuisista tieteenfilosofista kysymystä, determinismiiä ja reduktionismia. Lopuksi käsitellään ajatusta tieteiden ykseydestä.

B.1 Tieteen eetos

Mertonin mukaan tieteen menestyksen taustalla on nk. tieteen eetoksen neljä perusnormia. (1) Universalimi: tutkijan henkilökohtaiset ominaisuudet eivät vaikuta hänen töidensä hyväksymiseen. (2) Tieteellinen kommunismi: tulokset ovat julkisia. (3) Pyyteettömyys: tutkimusta ei motivoi pelkkä henkilökohtainen etu. (4) Järjestelmällinen epäily: tiedeyhteisö arvioi kriittisesti tuloksia.

Tiedonsosiologian mukaan nk. vastanormit ja tieteen kaupallistuminen kumoavat nämä normit. Perustelut eivät kuitenkaan vakuuta. Jos esimerkiksi jokaisen 'kylähullun' teoriat otettaisiin vakavasti, tieteellinen työ kärsisi. Valaisempi esimerkki lienee rahvaasta nousseen William Smithin kerrostumaopillisen kartan kohtalo 1800-luvun alussa: elitistiset geologit kopioivat sen omiin nimiinsä. Tutkijoilla on inhimilliset heikkoutensa, mutta oikeaksi katsottua tietoa ei ole varaa sivuuttaa sen alkuperän nojalla. Muutkaan vastanormit eivät ole yhtään tämän ongelmallisempia: ne osoittavat, miksi Mertonin normit toimivat reaali maailmassakin.

Mielenkiintoisempi tarkastelukohde on liikehdintä, joka on noussut omaa etuaan ajavaa lääke- ja ohjelmistoteollisuutta vastaan. Aids-lääkkeiden osalta teollisuus joutui taipumaan, ja osa ohjelmistoteollisuutta on jo muuttamassa taktiikkaansa. Hyvin selväsanainen tuomio tärkeän tiedon kaupallistamiselle löytyy myös Jagdish N. Bhagwatin teoksesta *In Defence of Globalization* (2004). Näyttäisi, että tiedon kohdalla käsitykset patenttioikeuden laajuudesta ovat sopuosinnassa mertonilaisen eetoksen kanssa.

B.2 Tieteellinen keksiminen

Tieteellistä keksimistä on tutkittu vähän. Vaikka osasyynä saattaa olla popperilainen käsitys tieteellisten teorioiden testaamisen tärkeydestä, todellinen ongelma piilee aiheen vaikeudessa. Jo Peirce kehitteli nk. abduktiomallia ja pyrki määrittelemään deduktiivisen ajattelun luovia päättelyaskeleita. Myöhemmin mm. Jaakko Hintikka on jatkanut keksimisen nk. strategisten sääntöjen kehittämistä; ks. *Filosofian köyhyys ja rikkaus* (Art House 2001). Myös Alan Turing haaveili riskialttiiden heurististen algoritmien käytöstä positiivisessa mielessä 'erehtyväsissä' tietokoneissa. Tiedonsosiologia vastustaa tällaisia kognitiivis-individualistisia keksimisteorioita sillä perusteella, että keksiminen on sosiaalinen tapahtuma.

Yksilö- ja yhteisötason välinen vastakkainasettelu on ihmistieteille valitettavan tunnusomaista. Kun tuomittavasta atomistisesta ihmiskäsityksestä siirtyy funktionaaliseen systeemiajatteluun, joutuu syytetyksi toimijan unohtamisesta, jne. Voisi kuitenkin kuvitella, että esimerkiksi Hintikan peliteoreettinen malli tiedonhankinnasta kyselytoimituksena, jossa luonnolle tehdään kyselyjä kokeiden avulla, laajenee tarpeen tullen myös tutkijoiden välisen vuorovaikutuksen suuntaan. Itse asiassa hän olettaa, että jo luonto voi 'vastata väärin'.

Aivan yleisestikin voidaan väittää, että moderni analyttinen filosofia edustaa paljon käytännönläheisempää tapaa nähdä maailma kuin mitä loogisen empirismin 'kuoleman' jälkeen osattiin odottaa. Hintikan kohdalla lisäesimerkkinä voisi mainita hänen peliteoreettiset käsityksensä semantiikan eli merkityksen rakentumisesta pragmatiikan eli käytännön varaan. Asenne on ehkä kognitiivis-individualistinen, mutta vain siinä määrin kuin on järkevää.

B.3 Tieteellinen realismi ja totuus

Tieteellisen realismin mukaan teoriat ovat tosia tai epätosia ihmismielen ulkoista todellisuutta koskevia väitteitä. Toden teorian postuloimat teoreettiset entiteetit (fyysikassa esim. elektronit) ovat olemassa, vaikka niitä ei voisikaan suoraan havaita. Tieteelliseen realismiin yhdistyy siis käsitys totuudesta yhdenmukaisuutena ulkoisen todellisuuden kanssa; puhutaan totuuden vastaavuusteoriasta. Tästä ei tietenkään seuraa, että tiede lähestyisi totuutta ongelmattomasti, julkaisu julkaisulta. Jo Peirce yhdisti 'fallibilismin' omaan tieteelliseen realismiinsa. Ilkka Niiniluoto, joka antoi esseekokoelmalleen nimen *Totuuden rakastaminen* (Otava 2003), ei peräänny totuuden vastaavuusteoriasta, vaikka hänen käyttämänsä nk. kriittiseen tieteelliseen realismiinsa liittyy maltillinen totuudenkaltaisuuden käsite.

Realismissa ulkoinen todellisuus ohjaa tieteen kehitystä havaintojen ja kokeiden kautta. Nk. sosiaalikonstruktivistit antavat suuremman painon tutkimusprosessiin liittyville sosiaalisille tekijöille. Esimerkiksi Bloor on korostanut luokkaintressien merkitystä (ei ole sattumaa, että Marxia on pidetty varhaisena tiedonsosiologina). Käsitykselle etsitään tukea mm. kiertämällä liian rajoittavana nähty totuusteoria. Filosofian puolella nk. konstruktivisen empirismin mukaan tieteellisten teorioiden selitysvoima onkin pragmaattinen hyve, joka on (ehkä olemassa olevan, mutta epärelevantin) totuuden sijaan yhteydessä tutkijoiden intresseihin teorian käyttäjinä (olla lähellä instrumentalismia). Nk. tieteen antropologiassa Bruno Latourin ja Steve Woolgartin *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts* (1979) kuvaa tiedettä laboratoriossa tapahtuvana radikaalina tosiasioiden sosiaalisena konstruomisena.

Maltillisen sosiaalikonstruktivismiin ei kuitenkaan tarvitse kieltää ihmisestä riippumattomien faktojen olemassaoloa: se on kiinnostunut vain tieteilijöiden faktoja koskevista uskomuksista ja niiden synnystä. Tässä selityksessä itse faktojen totuusarvoilla ei — näin esitetään — ole merkitystä, koska ne kehäpäättelämän tavoin eivät selitä mitään. Koska tiedonsosiologia ei tutki tieteen tuloksia, väite ei ehkä ole niin radikaali kuin miltä kuulostaa. Mutta tutkiiko tällainen tiedonsosiologia enää edes tieteen tekemistä? Esimerkiksi Pertti Töttö on kritisoinut modernia sosiologiaa siitä, että yhteiskunnan sijaan se tutkii — sosiologiaa.

B.4 Determinismi ja kausaalisuus

Uskallamme siis epäillä tiedonsosiologian kykyä kumota perinteinen tiedekäsitys. Samalla ajaudimme jo syvälle tieteenfilosofian kysymyksiin. Jatketaan hetki samoilla linjoilla.

Newtonilaisen taivaanmekaniikan myötä maailma alkoi näyttäytyä deterministiseltä luonnon lakeja noudattavalta koneelta; kaikella on syynsä. Laplace esitti 1820-luvulla tätä koskevan ajatuskokeen: jos tietäisimme kaikki lait ja alkuehdot, olisiko mahdollista laskea tulevaisuus? Itse hän uskoi esim. havaintojen tilastollisuuden olevan seurausta mittausvirheistä. Nykyisin tiedämme paremmin: kuva lineaarisena sarjana toisiinsa törmäilevistä biljardipalloista ei yksinkertaisesti vastaa todellista maailmaa. Esimerkiksi nk. deterministinen kaaos on seurausta luonnonlakien epälineaarisuudesta: todellisissa systeemeissä esiintyy nk. takaisinkytkentää.

Determinismi on maailmassa havaittavan kausaalisuuden eli syysuhteen taustalla. Teoksessa *Syvällistä ja pinnallista* (Vastapaino 2004) Töttö tekee selkeän eron kahden erilaisen kausaalisuuskäsitteen välille. Nk. 'generatiivinen' kausaalisuus on seurausta olioiden rakenteesta johtuvista kyvyistä ja taipumuksista, jotka johtavat erilaisiin seuraamuksiin kontekstista riippuen. Tällainen

kausalisuus on seurauksiensa puolesta rikkaampi ilmiö kuin pelkkä kahden ilmiön säännönmukainen yhteenliittymä, 'sukkessionistinen' kausalisuus. Esimerkiksi tupakan vaarallisuus ei kumoudu sillä, että joku yksittäinen tupakoitsija kuolee vanhuuteen yli satavuotiaana. Tieteellinen realisti haluaa nähdä juuri tähän havaintojen takana olevaan todellisuuteen. Tilastollisuus ei vaadi sen paremmin mittausrvirheitä kuin determinismistäkään luopumista.

Nykytietämyksen mukaan kvanttifysiikka on aidosti ei-determinististä: esim. luonnon radioaktiivisuudessa atomiytimessä tapahtuvan nukleonin hajoamiselle juuri tiettyä ajanhetkenä ei näytä olevan syytä. Yritykset soveltaa tätä seikkaa mm. tietoisuuden selitykseksi ovat kuitenkin outoja. Tietoisuuden ongelma ei koske sen raakamateriaalia, kohinaa, jota aivoista löytyy yllin kyllin makroskooppisellakin tasolla. Kysymys kuuluu, miten kohinasta saadaan jotain järkevää ulos, ja tässä radikaalilla sattumalla ei määritelmällisesti ole rakentavaa osuutta. Voi esim. kysyä, mikä on ajattelun pienin yksikkö, ja vastaako yksittäisen elektronin energiatilan muutos tms. kvanttifysikaalinen efekti sitä. Ei varmaankaan. Kvanttifysiikan maailma on outo, mutta sen vaikutusalue on nk. dekoherenssin vuoksi rajallinen. Kvanttifysiikkaan tukeutuva mystinen filosofointi on ajan tuhlausta.

B.5 Reduktionismi ja materialismin lajit

Monimutkaiset systeemit synnyttävät nk. emergeettejä ilmiöitä. Esimerkiksi elämä, tietoisuus ja kulttuuri ovat tällaisia. Suomessa on käyty julkistakin keskustelua näiden korkeamman tason ilmiöiden ontologisesta statuksesta, so. niiden olemassaolon luonteesta. Kari Enqvist on korostanut, että vastaavia ilmiöitä esiintyy jo aivan perusfysiikan tasolla.

Esimerkiksi yksittäisellä kaasumolekyylillä ei ole lämpötilan tai paineen kaltaisia tilastollisia ominaisuuksia. Mielenkiintoista kyllä, vaikka yksittäisten molekyylien nopeusvektoreista voi (periaatteessa) laskea koko systeemin lämpötilan ja paineen, päinvastainen pyrkimys ei onnistu: mittaamalla lämpötilaa tai painetta saamme vain epätäydellisen, tilastollisen kuvan molekyylien nopeusjakaumasta. Tietoteoreettisesta ongelmasta ei siis seuraa ontologista ongelmaa: lämpötilassa tai paineessa ei alemman tason tietomme rajallisuudesta huolimatta ole mitään mystistä (kyse on tietoteoreettisesti rajatusta holismista). Enqvist kutsuu tätä heikoksi emergenssiksi tai karkeistukseksi: eri tasojen kuvailut ovat laadullisesti erilaisia, mutta ne ovat aina periaatteessa johdettavissa fundamentaalisemmalta tasolta (kyse on ontologisesta reduktionismista). Oikein tai väärin, tällaista filosofiaa kutsutaan sen ontologisen position vuoksi reduktiiviseksi materialismiksi. Viimeisin Enqvistin formulointi aiheesta löytyy teoksen *Vien rucolan takaisin* (WSOY 2004) esseestä Selitellen jälkeinpäin; myös Raimo Lehden teos *Lumihiutaleet ja maailmankuvat*

(Ursa 1998) käsittelee aihetta nimenomaan fysiikan kannalta.

Kuvatun kaltainen luonnontieteiden reduktionismi joutuu aika ajoin asiattoman käsittelyn kohteeksi. Jokainen Weinberginsä, Dawkinsinsa ja Dennettinsä lukenut tietää, kuinka nöyrästä asenteesta ontologisessa reduktionismissa on tieteen tekemisen kannalta kysymys. Reduktio alemman tason teoriaan on hyödyksi vain tiettyyn, tapauskohtaiseen tasoon asti, eikä se koskaan ole itsetarkoitus. Teoksessaan *Konsilienssi* (Terra Cognita 2001) reduktionin käyttöä puolustava E. O. Wilson korostaa tutkijoiden tavoitteluvan aina synteesiä oman tutkimuskohteensa tasolla. Esimerkiksi eläinten käyttäytymistä tietyssä ympäristössä tutkiva biologi ei kadota tätä tasoa näköpiiristään. Tutkimuksen ja siten reduktionin kohteena on tällöin koko systeemi vuorovaikutuksineen, ei yksittäinen organismi, kuten anti-reduktionisti tyypillisesti kuvittelee. (Töttö sanoo käytännössä saman asian hieman toisin: funktionaalinen selittäminen on vetoamista selitettävää ilmiötä ylemmän tason rakenteisiin.) Tätä taustaa vasten reduktiivinen materialismi on perusteltavissa: se ei tuota ongelmia ja on vähemmän mystinen kanta kuin vaihtoehtoinen nk. emergeetti materialismi.

Etenkin Niiniluoto on omassa filosofiassaan puhunut vahvemman emergenssin puolesta. Enqvistin tapaan myös hän on materialisti, mutta kannattaa emergeettien ominaisuuksien osalta ontologista holismia: kokonaisuus on aina enemmän kuin osiensa summa. Juuri tätä ajattelua kutsutaan emergeetiksi materialismiksi. Yksi tapa suhtautua kiistaan on olla välittämättä siitä. Kyse on filosofisesta aiheesta, jolla ei näytä olevan kummankaan osapuolen kannalta relevantteja käytännön seurauksia. Pragmaattisesti ajatellen voidaan kuitenkin väittää, että reduktiivinen materialismi on tutkimustyön kannalta tervein strategia: emergeetti materialismi johtaa usein (Dennettin sanoin) 'zen holismiin', jossa tutkimuksen mahdollisuuksiin esim. tietoisuuden selittämisessä suhtaudutaan nihilistisesti.

Jäljelle jäävä materialismin laji on nk. eliminiatiivien materialismi. Sen kannattajia karakterisoi ehkä parhaiten nk. kognitiivinen semantiikka, jossa merkitykset selitetään pelkästään aivojen tiloina (ks. esim. Patricia S. Churchlandin *Neurofilosofia* (Terra Cognita 2002)). Ero mm. edellä mainittuun Hintikan peliteoreettiseen semantiikkaan on selvä. Samoin Daniel C. Dennettille biologinen evoluutio selittää tietoisuuden intentionaaliset (johonkin suuntautuneet) tilat aivojen, käyttäytymisen ja ympäristön vuorovaikutuksena. Maltillisesta reduktionismistaan huolimatta kumpikaan viimeksi mainituista ei kuitenkaan kannata emergenssin vahvaa tulkintaa.

B.6 Tieteiden ykseys

Ajatusta tieteiden ykseydestä korostivat etenkin loogiset positivistit 1900-luvun alkupuolella; myöhemmin keskustelua on nostanut E. O. Wilson em. teoksessaan. Kuitenkin esim. uuden tiedonsosiologian naturalistinen luonne on nimenomaan vastareaktio kaikkea yleistä tieteenfilosofiaa vastaan: tiedonsosiologia on lähes määritelmällisesti tiede- ja tapauskohtaista. Merkittävä osa modernia tieteenfilosofiaakin edustaa samaa kantaa.

Käsitystä ei kuitenkaan kannata, eikä voikaan, ohittaa olankohautuksella. Sosiologisesti ajattelua edustaa edellä kuvattu mertonilaisuus. Tieteen sisällön tasolla varsinkin luonnontieteet muodostavat osittain päällekkäin olevien alojen joukon. Tieteenalojen autonomian kannalta tässä ei ole mitään ongelmallista. Esimerkiksi kemiaa teoreettisemman pohjan löytyminen fysiikasta on vain rikastuttanut. Tieteellisen realismin ja totuuden vastaavuusteorian vastustus joutuu myös ahtaammalle. Onnekkaille sattumuksille jää vähemmän sijaan teorioiden kietoutuessa toisiinsa.

Toisaalta luonnontieteet on myös pyritty eristämään muista tieteistä. Ihmistä ja yhteiskuntaa tutkivat tieteet on esim. nähty ymmärtävinä tai emansipatoorisina liikkeinä. Rajoittavaksi nähty kausaalisuuskin on haluttu liittää vain luonnontieteisiin. Edellä mainitussa teoksessa, jonka alaotsikko on *Teoria, empiria ja kausaalisuus sosiaalitutkimuksessa*, Töttö puolustaa kausaalisuuden merkitystä myös yhteiskuntatieteissä. Aivan erityisesti hän kritisoi käsityksiä puhtaasti laadullisesta (kvalitatiivisesta) tai määrällisestä (kvantitatiivisesta) tutkimuksesta. Kaikki selittäminen on kausaalista. Kausaalisuuden *havaitseminen* edellyttää säännönmukaisuutta. Säännönmukaisuuden havaitseminen edellyttää määrällisiä kriteerejä. Toisaalta vakavaan kvantitatiiviseen tutkimukseen liittyy aina laadullinen komponentti. Vain nk. 'latteassa' empirismissä tutkija syöttää numeerisen aineistonsa tilastotieteelliseen ohjelmaan ja julkaisee tulokset sellaisenaan. Tieteelliselle realistille tämä ei täytä tieteen vaatimusta yhtään sen enempää kuin puhtaasti laadullisenkaan tutkimus. Tötön lisäksi myös Panu Raatikainen korostaa ihmistieteiden kykyä objektiiviseen tieteellisyyteen pelkän subjektiivisen tulkinnan sijaan (*Ihmistieteet ja filosofia*, Gaudeamus 2004).

Evoluutiopsykologia pyrkii luomaan myös sisällöllistä yhteyttä luonnontieteiden ja ihmistieteiden välille. Aihe herättää tietenkin kiistoja. Mustasukkaisuuden kaltaisen tunteen biologisen taustan tunnustaminen ei kuitenkaan kumoaa yhteiskunta- ja ihmistieteiden autonomisuutta. Aikana jolloin avoimesti puhutaan 'sosiologian kriisistä', nämä luonnontieteelliset avaukset kannattaisi ehkä ottaa vakavasti. Janne Kivivuori tekee näin teoksessaan *Paha tieto — Tieteenvastainen ajattelu antiikista uusimpiin kiistoihin* (Nemo 2003). Samalla hän tulee käyneeeksi virkistävällä tavalla erilaista tieteesosiologista intressikeskustelua.

Mainitaan vielä, että Niiniluodon ehdotus 'kolmanneksi kulttuuriksi', luonnontieteiden ja ihmistieteiden yhdistäjäksi, on analyyttinen filosofia. Hintikan panoksesta tässä projektissa oli jo edellä puhetta.

Liite C

Tiedonhankinnan kyselymalli

Tiede on sosiaalinen konstruktio. Väitettä pidettiin viime vuosisadan alkupuolella liian radikaalina, ja mm. nk. loogisen empirismin kannattamassa tieteen hypoteettis-deduktiivisessa mallissa keskityttiin objektiiviseksi nähtyyn teorioiden todentamiseen niiden liian subjektiivisena pidetyn muodostuksen sijaan. Vuosisadan jälkipuoliskolla tieteen sosiologiaa painottava nk. uusi tieteenfilosofia puolestaan relativisoi tiedettä: tärkeintä oli teorioiden muodostus, mihin vaikuttivat hyvin moninaiset ulkotieteelliset tekijät. Tiedonhankinnan kyselymalli purkaa tätä vastakkainasettelua.

Kyselyllä on tiedonhankinnassa arvovaltainen historia, perustuihan jo Sokrateen metodi siihen. Uudelle ajalle tultaessa huomattiin, että kokeellisissa luonnontieteissä esitettiin kysymyksiä luonnolle, joka vastasi. Tällaista tutkijan aktiivisuutta korostaneita filosofejia oli mm. Francis Bacon ja Immanuel Kant. Filosoifeilla oli kuitenkin vaikeuksia kehittää ajatusta formaalisesti; puuttui mm. uskottava kysymysten ja vastausten logiikka. Vasta matemaattinen peliteoria loi sille pohjaa.

Peliteoriassa arvot (utiliteetit) liittyvät strategioihin, ja yksittäiset siirrot saavat arvonsa vain jonkun strategian osana. Esimerkiksi shakkipelissä hyviä siirtoja kuvaavat strategiset säännöt ovat mielenkiintoisempia kuin sallittuja siirtoja kuvaavat määrittelevät säännöt. Tunnettu suomalainen filosofi, Jaakko Hintikka, kehitti nk. peliteoreettista semantiikkaa, mikä johti myös uuden nk. riippumattomuus-ystävällisen (engl. independence-friendly, IF) logiikan syntyyn¹. Sen mahdollistama episteeminen logiikka loi pohjaa Hintikan nk. tiedonhankinnan kyselymallille, jossa ratkaisevia ovat strategiset säännöt määrittelevien sijaan.

¹Perinteisessä ensimmäisen kertaluvun episteemisessä logiikassa lause ”Tiedetään että joku [esim. teki jotain]” ilmaistaan $K(\exists x)S[x]$. IF-logiikan nk. slash-operaattorin avulla voidaan sanoa myös, että ”Tiedetään kuka [esim. teki jotain]”: $K(\exists x/K)S[x]$. Slash-operaattorin tarpeen voi kiertää vain kaikkein yksinkertaisimpien lauseiden kohdalla.

Luonnon lisäksi tutkija esittää kysymyksiä myös omalle muistilleen (myös nk. hiljaiselle tiedolle) sekä toisille tutkijoille ja heidän luomille tietolähteille (esim. julkaisut ja tietokannat). Tieto, ja siten myös tiede, ei ole vain ”konstruoitua”, vaan myös ”sosiaalisesti konstruoitua”.

C.1 Kyselymallin rakenne

Tiedonhankinnan kyselymallissa on kolmenlaisia askeleita: deduktiivisia, interrogatiivisia ja kriittisiä:

- Deduktiiviset askeleet edustavat loogisesti sitovaa päättelyä.
- Interrogatiivisissa askeleissa syntyy uutta informaatiota. Luonnolle tehtyihin kysymyksiin ja vastausten tulkintaan liittyy molempiin taustaoletuksia. Jälkimmäiseen liittyy myös kysymys induktiosta.
- Kriittisissä askeleissa epävarmoina pidettyjä taustaoletuksia ja vastauksia sulkeistetaan (engl. bracketing), so. niiden vaikuttavuuden astetta vähennetään.

Kysymysten ei tarvitse olla eksplisiittisesti muotoiltuja ja tiedostettuja. Esimerkiksi Charles Peircen 1800-luvulla lanseeraama abduktion käsite voidaan ymmärtää kyselymallin interrogatiivisena askeleena. Merkittävin ero tieteellisten teorioiden keksimisen ja niiden todentamisen välillä voikin liittyä jälkimmäisen prosessin vahvempaan tiedostamiseen: molemmissa on taustalla samanlainen logiikka ja em. kyselymalli.

Parhaat interrogatiivisen päättelyn strategiat ovat samoja kuin deduktiivisessä päättelyssä. Esim. ei-triviaalin (Peircen termeillä teoremaattisen) deduktion eksistentiaalisia instantiaatioita vastaavat nk. *wh*-kysymykset (engl. who, what, where,...), jotka puolestaan käyttäytyvät loogisesti samalla tavalla kuin kokeellisen tieteen kysymykset. Näin esim. nk. Sherlock Holmes –logiikka on todella olemassa: deduktio tukee strategisella tasolla kaikenlaista, myös uutta luovaa, päättelyä. Toimivaan strategiaan kuuluu mm. isojen kysymysten jakaminen pienempiin apukysymyksiin, kuten jo René Descartes tiesi, ja erilaisten analogioiden käyttö. Vaikka emme edelleenkään voi määritellä mekaanisia askelia, joiden perusteella uutta tietoa hankitaan, itse prosessia voidaan kuvata tietoteoreettisesti.

C.2 Taustaoletukset

Informaatiota jalostettaessa ainakin nämä seikat vähentävät taustaoletusten vaikuttavuutta:

- Kysymysten taustaoletusten vaikutusta voidaan rajoittaa kasvattamalla mahdollisten vastausten määrää esim. kokeissa käytettyä teknologiaa kehittämällä.
- Yksittäisen interrogatiivisen askeleen taustaoletukset eivät tyypillisesti ole samoja kuin tutkimuksen suurten kysymysten oletukset.
- Kyselymallin kriittisten askelten takia prosessilla on itseään korjaava luonne: taustaoletukset muuttuvat prosessin myötä.
- Vastausten taustaoletusten rajoittavuutta voidaan vähentää panostamalla esim. matemaattisen tiedon kasvattamiseen.

Näissä huomioissa ei ole luonnontieteilijälle mitään uutta ja erikoista. Esimerkiksi kaukoputken ja mikroskoopin merkitys tieteen kehitykselle on ilmeinen. Tyko Brahen mittaukset auttoivat Johannes Kepleriä ratkaisemaan planeettojen ellipsiradat auringon ympäri, vaikka Brahe oli itse uskonut kosmologiaan, jossa aurinko ja kuu kiertävät maata, muut planeetat aurinkoa. Radioaktiivisuus ja auringon energian lähde selitettiin kumoamalla atomin käsitteeseen jo antiikin ajoilta sisällytynyt jakamattomuuden ajatus.

Taustaoletukset eivät siis muodosta periaatteellista estettä onnistuneelle tiedonhankinnalle. Aivan erityisesti voimme sanoa, että ne eivät perustu välittömään kokemukseen. Fenomenologian nimellä kulkeva filosofinen suuntaus tutkii maailmaa siten kuin se ilmenee tietoisuudelle välittömissä kokemuksissa, vieläpä jotenkin ”puhtaana” nk. fenomenologisen reduktion kautta. Hintikka muistuttaa, että ajattelu on suurelta osin tiedostamatonta ja jo siten fenomenologisen filosofoinnin ulottumattomissa. Seuraavassa osoitetaan, että edes empiirinen tutkimus ei ole rajoittunut fenomenologian olettamalla tavalla.

C.3 Induktio ja *a priori* –tieto

Deduktio on yksittäisten väitteiden tai totuuksien johtamista yleisistä väitteistä tai totuuksista, induktion yleisten hypoteesien ja teorioiden johtamista yksittäisistä havainnoista ja kokeista. Jälkimmäinen määrittely on peräisin David Humelta, joka tunnisti itse myös atomistisesta postulaatista (että luonto vastaa vain yksittäisiin väitelauseisiin) seuraavat ongelmat. Induktion ”ongelma” onkin vaivannut filosofeja nyt jo yli kaksisataa vuotta, Hintikan mukaan turhaan.

Hintikka on kiinnittänyt huomiota siihen, että ennen Humea induktion ajateltiin olevan jo valmiiden, alemman tason yleistysten yhteenliittämistä yleisemmäksi teoriaksi; esim. Aristoteles ja Newton ajattelivat näin. (Tämä muistuttaa William Whewellin myöhempää konsilienssin käsitettä.) Näin ollen Hintikan

kyselymallissa kiinnitetään vähemmän huomiota empiiristen yleistysten ongelmiin kuin esim. matematiikan ja muun *a priori* -tiedon merkitykseen mallin interrogatiivisissa askeleissa.

Edellä mainitut vastausten taustaoletukset liittyvät juuri tähän. Yksinkertaisimmillaan, jos kysytään kuka voitti presidentin vaalit, vastaukseksi ei riitä ”sen ja sen puolueen edustaja”, jos ei tiedä kehen sillä viitataan. Edelleen, kun kokeellisessa tutkimuksessa identifioidaan aineistoon sopiva funktio, myös tämä vaatii konseptuaalista, tässä tapauksessa matemaattista, tietoa jo saavutetun faktuaalisen tiedon lisäksi. Funktionaaliset riippuvuudet eivät ole atomistisen postulaatin mukaisia, eivätkä edes ihmisen kognitiivisten kykyjen tutkimus esim. kausaalisuuden havaitsemisessa tue ko. postulaattia.

Vastausten taustaoletukset liittyvät nk. identifikaatiosysteemeihin (ks. alempana). Perinteisen induktion voisi tulkita perspektiiviseksi identifikaatioksi, ja vasta julkinen identifikaatio esim. matemaattisen lain muodossa on tieteellisesti arvokasta. Hintikka jopa vertaa edellistä salakirjoitetun viestin saamiseen ja jälkimmäistä sen purkamiseen!

Vaikka tässä korostetaan (hieman epätarkasta lausuttuna) havaintojen ’käsitteipitoisuutta’, matemaattisilla funktioilla on kuitenkin selkeä objektiivinen luonne. Vastausten taustaoletukset eivät johda minkäänlaiseen relativismiin.

C.4 Informaatio, tieto ja totuus

Edelliset kolme kohtaa kuvaavat Hintikan tiedonhankinnan kyselymallin peruspiirteitä. Tässä käydään vieläkin lyhyemmin läpi laajempaa tietoteoreettista termistöä siten kuin Hintikka ne määrittelee.

Kyselymallissa käsitellään informaatiota; episteemisen (so. tiedon) logiikan sijasta pitäisi ehkä puhua informaation logiikasta. Hintikan tietoteoriaan liittyy myös tarkempaa analyysiä informaation luonteesta. Puhutaan mm. pinta- ja syvyysinformaatiosta; edellinen syntyy loogisessa päättelyssä, jälkimmäinen on empiiristä. Pintainformaationkaan ei tarvitse olla triviaalia, syntyyhän sitä mm. tietokoneen analysoidessa mitattua raakadataa erilaisin menetelmin.

Tieto liittyy *käytännön tietoteoriaan* auttaessaan karsimaan pois tiettyjä vaihtoehtoja päätöksenteon aikana. Tällaisen tiedon teoreettinen määrittely on mahdotonta. Tiedon kriteerit ovat kuitenkin objektiivisia, toisin kuin uskomusten kriteerit. Vaikka jälkimmäisetkin syntyvät kysymys-vastaus – prosessilla, tiedonhaun välituloksia ei siis voi tulkita uskomuksiksi.

Hintikka tekee eron objektitiedon ja propositiotiedon välille. Jälkimmäinen edustaa tiedon perustyyppiä, jonka avulla myös edellistä (oikeammin sanottuna entiteettitietoa) voidaan analysoida.

Semantiikka tutkii merkkien suhdetta niitä vastaaviin asioihin tai olioihin. Objektitietoon liittyy viittauksen semanttinen käsite. Hintikan viittaussysteemi liittyy annetun skenaarion (’mahdollisen maailman’) sisällä tapahtuvaan olion valintaan jonkin määrittelyn avulla. Identifikaatiosysteemi määrittelee puolestaan eri skenaarioiden väliset identtiset oliot. Se jakaantuu vielä perspektiiviseen ja julkiseen systeemiin.

Toisin kuin informaatioon, tietoon liittyy totuuden käsite; propositiotietoa kutsutaankin myös tosiasia- tai totuustiedoksi. Peliteoreettisessa semantiikassa totuus liittyy pelin voittavan strategian olemassaoloon, eli kyse ei ole aktuaalisesta, pragmaattisesta pelitapahtumasta, diskurssista. Semanttiset pelit konstitutioivat merkityksiä luovia linkkejä kielen ja maailman välille. Totuutta voidaan siis pitää (ainakin tiettyssä abstraktissa mielessä) tosiasioihin vastaamisena. Juuri tämä tekee totuudesta semanttisen käsitteen.

C.5 Kyselymallin merkitys

Postmoderni uusi tieteenfilosofia on onnistunut erinomaisesti omassa propagandassaan. Filosofien lisäksi myös monet luonnontieteilijät ovat hyväksyneet ajatuksen radikaalista filosofisesta vallankumouksesta, joka kaatoi loogisen empirismin mukana koko nk. analyttisen filosofian. Todellisuudessa ”uuden” filosofian anti on jäänyt vähäiseksi; juuri tähän Hintikka viittaa puhuesaan filosofian köyhyydestä (Hintikka, 2001). Rikkautta ovat tietenkin nyt uuteen vauhtiin päässeet analyttisen filosofian lupaukset, kesken jääneen projektin jatkaminen uusin eväin.

Analyttisen filosofian läheiset suhteet luonnontieteisiin tunnetaan. Ilkka Niiniluoto on tulkinnut sen myös nk. ’kolmanneksi kulttuuriksi’, luonnontieteiden ja ihmistieteiden yhdistäjäksi. Ajatus ei ole mitenkään outo esim. tässä esitetyn kyselymallin kohdalla: kyse on loppujen lopuksi humanistisesta² perusajatuksesta, jota analysoidaan logiikan keinoin. Samaa todistaa myös mallissa vaikuttava pragmatismen perinne.

Pragmatismi tutkii maailmaa siten kuin se ilmenee ihmisille käytännön vuorovaikutuksissa (vrt. fenomenologia). Charles Peirce oli yksi suuntauksen perustajista, ja — kuten edellä on nähty — Hintikan filosofia on saanut häneltä paljon vaikutteita. Useimmat, etenkin modernimmat, pragmatismen versiot ovat myös ideologisesti humanistisia filosofioita. Jyrkimmillään tämä tarkoittaa semanttisesta totuusteoriasta luopumista: totuus on esim. jotain joka

²Mm. R.G. Collingwood (*An Essay on Metaphysics*, 1940) ja H.-G. Gadamer (*Truth and Method*, 1960) ovat spekuloineet jonkinlaisen tiedon kyselymallin mahdollisuudella. Gadamer edusti nyt jo marginaalista filosofista suuntausta, hermeneutiikkaa, jossa ihminen ”avautuu” tiedolle, joka ei ole saavutettavissa rationaalisin keinoin.

toimii käytännössä. Mutta vaikka Hintikka ei esim. tee jyrkkää erottelua semantiikan ja pragmatiikan välille³, tällä ei ole sellaisia radikaaleja seuraamuksia, jotka asettaisivat luonnontieteet ja niiden totuudenetsinnän mitenkään arveluttavaan valoon.

Perinteisen filosofisen käsityksen mukaan mielen tilat ovat suuntautuneita, esim. ajattelu on jonkin ajattelemista. Mielen filosofiaan erikoistunut Daniel C. Dennett ymmärtää tämän nk. intentionaalisuuden aivojen, käyttäytymisen ja ympäristön vuorovaikutuksena, jossa mm. merkityksen kaltainen semanttinen käsite siirtyy osittain mielen ulkopuolelle. Hän pohjaa ajattelunsa biologiseen evoluutioteoriaan, eikä hänelle ole ongelmallista puhua esim. semanttisten käsitteiden evoluutiosta. Myös Hintikan käsitys totuudesta sopii tähän ajatteluun hyvin: semanttiset pelit ovat olemassa ennen kieltä.

Analyyttinen filosofia tavoittelee kunnianhimoisempia päämääriä kuin subjektiiviset fenomenologia tai pragmatismi. Ei siitä, että ihmiset esim. elävät omien käytänteidensä kautta, tarvitse tehdä nihilistisiä päätelmiä kyvystämme ymmärtää maailmaa. Ja jos haluamme ymmärtää ihmistä, meidän tulee ymmärtää myös elämää ja sen evoluutiota yleensä. Fenomenologia ja pragmatismi ovat määritelmällisesti ongelmallisia filosofisia suuntauksia tällaisen menneisyys-argumentin edessä.

C.6 Lähteet

Hintikan kyselymallia koskevia englanninkielisiä julkaisuja on koottu kahden teoksen, Hintikka (1999) ja Hintikka (2007). Kaksi ensimmäistä edellisen artikkelia (*Onko logiikka kaiken luovan päättelyn avain, Logiikan rooli päättelyssä*) on julkaistu suomeksi teoksessa Hintikka (2001). Myös Sintonen (2009) käsittelee kyselymallia teoksessa, johon on kerätty suomalaisten filosofien Hintikka-aiheisia artikkeleja. Merkittävin vastaava englanninkielinen teos on Auxier ja Hahn (2006) sarjassa *The Library of Living Philosophers*, johon pääsyä verrataan filosofian alalla yleisesti Nobelin palkinnon saamiseen.

- Auxier, Randall E. ja Lewis Edwin Hahn (toim.), 2006, *The Philosophy of Jaakko Hintikka*, *The Library of Living Philosophers*, Vol. XXX, Open Court.
- Hintikka, Jaakko, 1999, *Inquiry as Inquiry: A Logic of Scientific Discovery*, Selected Papers 5, Kluwer Academic Publishers.

³Ajattelun taustalla on Peircen filosofian lisäksi mm. Wittgensteinin kielipelit.

- Hintikka, Jaakko, 2001, *Filosofian köyhyys ja rikkaus*, Art House.
- Hintikka, Jaakko, 2007, *Socratic Epistemology*, Cambridge University Press.
- Manninen, Juha ja Risto Vilkko (toim), 2009, *Ajattelun välineet ja maailmat*, Gaudeamus.
- Sintonen, Matti, 2009, *Alussa oli kysymys!*, teoksessa Manninen ja Vilkko (2009).

Liite D

Fysiikan osa-alueet ja mittakaavat

Fysiikka voidaan jaotella tutkimuskohteen mukaan osa-alueisiin, joilla kullakin on aivan oma mittakaavansa.

Osa-alue	Tutkimuskohde	Mittakaava [m]
hiukkasfysiikka	alkeishiukkaset	10^{-15}
ydinfysiikka	atomien ytimet	10^{-14}
atomifysiikka	atomit	10^{-10}
molekyylifysiikka	molekyylit	$10^{-9} - 10^{-7}$
kiinteän aineen fysiikka	kiinteä olomuoto	$10^{-8} - 10^{-2}$
biofysiikka	elollinen luonto	$10^{-7} - 10^1$
geofysiikka	maapallo ja lähiympäristö	10^7
astrofysiikka	tähdet	$10^7 - 10^{12}$
astronomia	galaksit	10^{20}
kosmologia	maailmankaikkeus	10^{26}

Liite E

Fysiikan perussuureet

SI-järjestelmässä on seitsemän perussuuretta. Muut suureet on määriteltävissä niiden avulla. Esimerkiksi paine ilmaistaan pascaleina $\text{Pa} = \text{Nm}^{-2}$, missä N on voiman yksikkö Newton; sille puolestaan $\text{N} = \text{kg}\cdot\text{ms}^{-2}$.

Suure	Symboli	Yksikkö	Lyhenne
pituus	l	metri	m
aika	t	sekunti	s
massa	m	kilogramma	kg
sähkövirta	I	ampeeri	A
lämpötila	T	kelvin	K
valovoima	I	kandela	cd
ainemäärä	n	mooli	mol

Liite F

Fysiikan perusvakiot

Fysiikan perusvakiot on lueteltu oheisessa taulukossa.

Vakio	Symboli	Lukuarvo ja yksikkö
gravitaatiovakio	G	$6,67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$
valon nopeus	c	$2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
Planckin vakio	h	$6,6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}$
elektronin varaus	e	$1,60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$
elektronin massa	m_e	$9,1093897 \times 10^{-31} \text{ kg}$
protonin massa	m_p	$1,6726231 \times 10^{-27} \text{ kg}$
hienorakennevakio	α	1/137,0359895

