

Hiukkasaine 1960 - 2023

Keijo Kajantie, prof(teoreettinen fysiikka, HY), em (vuodesta 2008). S. 31.1.1940, yo Helsingin Normaalilyseo 1957, sotaväki 1958, FT HY 1965, ap.prof HY 1970. keijo.kajantie@helsinki.fi

Perus- ja taustatiedot löytyvät kotisivuiltani <https://www.mv.helsinki.fi/home/kajantie>, erityisesti sinne linkatusta CVstä /CVKajantie.pdf tai jäähyväisluennosta /jaahluento.pdf (tekstiversiona /jaahluento_teksti.pdf). Tässä yhteydessä on kyllä todettava, että nämä linkit toimivat vain niin kauan kun joku hyväksyy (ja maksaa) HYN atk-palvelujen käyttö lupani. Tässä olisi muistitietojen kerääjälle pohtimista, mitä tehdä digimateriaalille.

Paljon ja yksityiskohtaisempaa muistitietoa on myös Kari Eskolan toimittamassa 60-vuotisjuhlakirjassani (Tiedeseuran Sarjassa Comm. Physico-Mathematicae, artikkelit 153-165/2000), jonka sisällön lähetän myös digitaalisesti zipattuna, Kajantie60.zip. Edelleen lähetän muutamia julkaistuja muistelukirjoituksia eri henkilöistä.

En itse sen kummemmin levittele tätä tiedostoa. Voidaan arkistoida nimelläni SKS:n arkistoon sekä käyttää tutkimuksessa.

1. Yleistä

Dokumentointihankkeen "Itsenäisen Suomen tieteen historia - muistitietoa ja kokemusta" puitteissa luonnostelen seuraavassa miten Suomeen on fysiikan sisälle kasvanut koulukunta, tutkimusala, josta käytän nimeä hiukkasaine (hituaine, alkeishiukkasaine, partikelmateria, (elementary)particle matter). Se kuvaa luonnon ilmiöitä mahdollisimman pienistä (alkeishiukkasfysiikka) mahdollisimman suuriin (kosmologia) etäisyyksiin erityisesti silloin kun kyseessä on tiivis aine, hiukkasia on paljon. Tavallinen aine toki myös koostuu hiukkasista, sähkömagnetismin ohjaamina liikkuvista atomeista, mutta nyt halutaan mennä äärimmäisiin olosuhteisiin, jossa muut luonnolait operoivat.

Kehityksen lähtöpiste oli Helsingin yliopiston teoreettisen fysiikan laitos 60-luvulla. Koulukunnan laajuutta voidaan mitata siitä tähän mennessä valmistuneiden tohtoreiden määrällä: 70 tohtoria, joista 35 on edelleen academiassa, 36 koulutusalan ulkopuolelle, "businessissa". Itse (Kajantie) olen toiminut professorina vuodesta 1970. Tohtoreista Kari Eskola (JY), Kimmo Tuominen (HY), Tuomas Lappi (JY), Kari Rummukainen (HY), Alekski Vuorinen (HY) ovat professoreja Suomessa ja Alekski Kurkela (Stavanger), Mikko Laine (Bern), Arttu Rajantie (Imperial College, Lontoo) professoreja ulkomailla. Koulukuntaa voinee erilaisin kriteerein pitää menestyksellisenä. Ainakin se laajenee edelleen, koska monet keskeiset ilmiöt luonnossa vielä kaipaavat selitystä. Kyvykkäitä nuoria houkutteluttaa mahdollisuus päästä tutkimaan luonnon perimmäisiä salaisuuksia. Mitä on pimeä aine? Missä ovat oikeakätiset neutriinot? Milloin tulee ensimmäinen tällä vuosituhanella syntynyt alan väittelijä?

Jukka Maalammen neutriinoryhmä ja Kari Enqvistin kosmologiaryhmä ovat muodostaneet erinomaisen ympäristön tiiviin hiukkasaineen koulukunnan kehitykselle. Enqvistin ryhmästä on 2000-luvulla valmistunut noin 30 tohtoria, joista yli 2/3 on jatkanut työtään koulutusalan ulkopuolella. Erinomainen koulutuspanos! Yhteydet Hoyerin Kvanttikromodynamiikkaan, Huidun Standardimallin kehitysryhmään ja Keski-Vakkurin matemaattiseen fysiikkaan ovat myös olleet saumattomia. En tässä luettele kansainvälisiä yhteyksiä.

Maantieteellisesti Suomessa toimitiin ensin Helsingissä Siltavuorenpenkereellä Laurikaisen ja Tallqvistin taloissa (nimet eivät ole vakiintuneet koska aietta hakata nimet kivilaattoihin ja muurata ne talojen seiiniin ei ehditty toteuttaa), josta maaliskuussa 2001 muutettiin Kumpulän kampukselle Physicumiin. Jyväskylään toiminta laajeni 70-luvulla. Hallinnollisesti merkittäviä yksiköitä olivat Teoreettisen fysiikan

tutkimuslaitos (TFT; 1964-1996) ja sen jatke Helsinki Institute of Physics (HIP, 1996-). Suomen ja CERNin (myöhemmin myös Dubnan) yhteyksiä hoitamaan Luonnontieteellinen toimikunta perusti Hiukkasfysiikan komitean (1968-1990). Suomihan loisi pitkään muiden maiden kustannuksella kunnes lopulta liittyi Cerniin 1991. Itse olen viettänyt Cernissä 7 vuotta, muita yli noin 2 vuotta siellä olleita teoreetikkoja ovat Roos, Hoyer, Maalampi, Enqvist, Rummukainen, Laine, Vuorinen, Kurkela, Paatelainen.

Hankkeen alkuvaiheessa noin 1960 tunnettiin vain perusteoriat kvanttimekaniikka ja yleinen suhteellisuusteoria ja varsinaisesta hiukkasfysiikasta vain kvanttielektrodynamiikka. Sähköisheikko teoria syntyi 1967 ja vahvoja vuorovaikutuksia hallitseva kvanttikromodynamiikka 1972. Näiden yhdessä muodostama standardimalli oli oleellisesti valmis noin 1975 ja silloin oltiin myös valmiita ulottamaan tutkimus systeemeihin, joissa oli paljon hiukkasia. Hiukkasaineen eli tiiviin ja tiheän alkeishiukkasaineen tutkimus oli syntynyt. Tätä ei mahdollisesti luonnossa esiinny missään, ehkä neutronitähtien sisällä. Laboratoriossa sitä kyllä voidaan hetkellisesti tuottaa törmäyttämällä kaksi isoa ydintä suurella energialla toisiaan vastaan. Pysyvästi sitä esiintyi luonnossa varhaisessa maailmankaikkeudessa, jonka big bang - skenario oli summittaisesti tunnettu jo 30-luvulla.

Tuntuu itse asiassa pöhköltä kirjoittaa Suomen kielellä tällaista historiikkiä yhden koulukunnan kehityksestä. Minulle on usein ulkomaisissa yhteyksissä ihmetelty mistä ihmeestä Helsingistä (ja nyt myös Jyväskylästä ja muualta mihin koulukunta on levinnyt) aina tulee uusia merkittäviä tutkijoita. Pohjimmiltaan kyse on alan vetovoimasta, mutta kyllä raamienkin kuvausta monessa paikassa mielellään luettaisiin. Jaa, täytynee panna käännösohjelmaan.

2. Ennen standardimallia, 60-luku

Kun aloitin jatko-opinnot Helsingin yliopistossa 1960 Brookhavenin ja CERNin kokeissa löydettiin uusia alkeishiukkasia, niiden hajoamistuloksia katsomalla. Sekä latinalainen että kreikkalainen kirjaimisto tyhjeni kun niille keksittiin nimiä. Helsingissä ei ollut varsinaista hiukkasfysiikan asiantuntemusta, mutta tätä löysin Lundista Ruotsista, jonne menin vuosiksi 1963-64 yhteispohjoismaisen Norditan (varsinaisesti Kööpenhaminassa) stipendiaattina. Ohjaajani siellä oli merkittävä ruotsalainen kenttäteoreetikko, Gunnar Källén. Källénillä oli kymmenkunta jatko-opiskelijaa, joista puolet sai hyvin formaalin ongelman (Wightmanin funktioiden analyttiset ominaisuudet), toinen puoli jotain hyvin käytännöllistä hiukkasfenomenologiaa. Onnekseni kuuluiin jälkimmäiseen kategoriaan, sain tehtäväksi laskea radiatiivisia korjauksia, siis aikaisempien tuloksien tarkennuksia, elektroni-protoni-sirontaan. Näitä kokeita piti tehdä Lundiin rakennettavalla elektroni-synkrotronilla (ei koskaan valmistunut). Todella hyödyllinen lasku kvanttielektrodynamiikassa, ainoassa silloin tunnetussa nykyisen standardimallin osassa. Väittelin laskun tuloksella HYssä keväällä 1965.

Gunnar Källén kuoli traagisesti kun hänen pilotoimansa pienkone syöksyi maahan Hannoverissa 13.10.1968. Suuri menetys Ruotsin ja koko maailman teoreettiselle fysiikalle.

Pieni episodi väitöskirjani julkaisemisesta. Mentorini ydinfysiikan professori Kalervo Vihtori Laurikaisen kanssa oli ajateltu että se julkaistaisiin Annales Acad. Scient. Fenn-sarjassa. Tarvittiin hyväksyntä toiselta Tiedeakatemian jäseneltä. Risto Niini asui Snellmaninkadun varrella, menin ovelle ja soitin ovikelloa keskellä päivää. Oven avasi naispuolinen palvelija, jolle esittelin asiani. Hän otti väitöskirjani, jäin seisomaan rappuun. Odottelin jonkun aikaa ja lopulta palvelija ilmestyi ovelle kädessään väitöskirjani Risto Niinen hyväksymismerkinnällä varustettuna.

Ja kun tuli mainittua KVL, K.V.Laurikainen, on myös paikallaan muistuttaa, että hän on kaiken tässä kerrotun takapiru Suomen fysiikassa. Suuri rakentaja, vakiinnutti teoreettisen fysiikan ja käynnisti kokeellisen hiukkasfysiikan Suomessa. Rakennutti talon itselleen Siltavuorenpenkereellä 1968. Laurikaisella oli erityinen taito esittää itsepintaisesti päättäjille hankkeitaan. Kerran 70-luvulla hän oli Opetusministeriössä esittelemässä ministeri Ulf Sundqvistille toiveitaan. Laurikaisen lähdettyä Sundqvist tuli ulos ja lausui "Meni päivä pilalle. Mennään pojat kahville".

Pohjoismaisen teoreettisen fysiikan instituutin Norditan merkitystä Suomen tieteele ei voi yliarvioida. Luettelen tähän ensimmäiset stipendiaatit (suluissa stipendikauden, yleensä kaksi vuotta, alkuvuosi) Ahmavaara (57), Laurikainen (57), Kustaanheimo (58), Hellman (58), Kilpi (59), Qvist (59), Kurki-Suonio (60), Mustelin (60), Tarjanne (61), Kallio (62), Byckling (62), Roos (62), Kajantie (63), Nyman (64), Lipas (64) Cronström (65), Perko (65). Listan nimet Perkoon asti toimivat viimeistään 1970-luvulla Suomessa professoreina, yliopistolaitos laajeni silloin poikkeuksellisella tavalla, joka stipendiaatille riitti virka. Perkokin toimi amanuenssina ja oli yleisen suhteellisuusteorian auktoriteetti Suomessa. Vuonna 1968 minulla oli meneillään samaan aikaan 6 professuurin hakua - mahdoton tilanne nykyään.

Tieteen arkipäivä oli jotain ihan muuta kuin nykyään. Edessä pöydällä oli kynä ja paperia, tänään edessä on näyttöpäätte. Joka huoneessa oli yleensä puhelin, mutta ulkomaille soitto oli hankalaa. Tieteellinen info levisi preprinttien muodossa, joka instituutilla oli oma monistettu julkaisusarjansa jotka postitettiin mahdollisimman laajalle joukolle toisia instituutteja. Kopiokoneita ei ollut, jos halusi kopion julkaisusta, tilattiin sellainen tekijältä preprint-pyyntökortilla. Nämä olivat haluttua tavaraa ja niitä kerättiin huoneeseen näkyvälle paikalle, määrä vastasi viitteiden määrää nykyään. Instituutin kahvihuoneen pöydällä oli joka päivää kohden pahvimappi, johon Claus Montonen jakoi päivän postissa tulleet preprintit ja siirsi viikon vanhat prerintit käytävän hyllystöön tai preprinthuoneeseen. Preprintit leimattiin päivämäärällä ja hienolla [TFT/FTF]-leimalla. Ikävä kyllä ei ole olemassa valokuvaa kahvihuoneen näkymistä. Julkaisujen käsikirjoitukset tehtiin leikkaa ja liimaa-menetelmällä - siis todella saksilla ja liimalla - ja vietiin sihteerille konekirjoitukseen. Yhtälöille jätettiin aukko ja ne kirjoitettiin käsin monistusvahalle. Kahvihuoneessa ei ollut tapana polttaa kahvihetkinä, mutta muuten ei kieltoa ollut. Erikoisen suuren vaikutuksen teki se tehokkuus, jolla USAhan muuttanut merkittävän aseman saavuttanut suomalainen Otaniemen fyysikko Eyvind Wichmann poltti paksua sikaria, savupilvi näkyi ja imun porina kuului. Seminaarihuoneessakin voi kessutella, jopa esitelmöitsijä. Kerran tunnettu fyysikko Roman Jackiw oli pitämässä seminaaria. Heti alkajaisiksi hänen piti sytyttää kessu. Eihän sen polttelusta seminaarin kuluessa tullut mitään, sätkä vaan lyheni sormissa, tuhka putoili ja lopulta tuli sammui. Ei hätää, uusi kierros. Ainoat apuvälineet luentosalissa olivat pitkään liitu ja karttakeppi, tussilla piirrettyjä kalvoja näyttävät projektorit ilmestyivät joskus 70-luvun alussa. Kun Burt Richter piti Nobel-luentoaan vanhan Fysiikan laitoksen luentosalissa 1976 näkyy kuvassa overhead-projektori. Kuten myös, kun Nils Törnqvist luennoi TFT:n luentosalissa samoihin aikoihin, ei meillä muuta kuvaa sieltä olekaan.

Varsinaisesti alkeishiukkasfysiikan tutkimukseen keskipisteeseen pääsin ollessani (palasista kootulla rahoituksella) Cernissä Genevessä vuodet 1966-67. Uusia hiukastiloja löytyi jatkuvasti, mutta erityisesti tutkittiin näiden vuorovaikutuksia, yksinkertaisia sirontaprosesseja, tyyppiä pioni + protoni -> hitu + nukleoni. Ei ollut mitään kaavaa, josta laskea todennäköisyydet prosesseille. Tiedettiin joitain yleisiä periaatteita ja kehitettiin erilaisia fenomenologisia malleja (Reggen navat, analyyttiset ominaisuudet)) näille sironta-amplitudeille. Ehkä on hyvä painottaa, ettei vielä tänäänkään, 60 vuoden päästä, näitä osata laskea kvanttikromodynamiikasta.

3. Standardimallin synty, 70-luku

Se miten oikeaan kaavaan, kvanttikromodynamiikkaan, QCDhen päästiin, on mielenkiintoinen pätkä tieteen historiaa. Gell-Mann ja riippumatta Zweig keksivät vuonna 1964 esittää että hiukkaset koostuisivat tietyistä rakennuspalikoista, kvarkeista, joilla on erikoinen uusi kvanttiluku, "väri". Vuorovaikutusdynamikka vaan oli epäselvää, kunnes vasta 1972 keksittiin että vuorovaikutuskvantti olisi ihan samanlainen kuin fotonit, mutta sekin kantaisi tuota väri-kvanttilukua. Vahvojen vuorovaikutusten teoria onkin yksinkertaisesti kvarkkien välisiä vuorovaikutuksia ohjaava lokaalisti SU(3)-symmetrinen relativistinen Yang-Mills-kenttäteoria (1954). Yang-Millsin paperia tuli kovasti tavattua 1960-luvun alussa, mutta eihän kukaan voinut arvata että se lopulta kuvaisi koko ydinfysiikkaakin - periaatteessa. Tosin tarvittiin vielä Ken Wilsonin nerokas paperi "Confinement of quarks" vuodelta 1974 ennen kuin koko vahvojen vuorovaikutusten työkalupaketti oli valmis. Tässä Wilson esitti kuinka QCD, joka aluksi muotoiltiin tavallisessa jatkuvassa avaruudessa, voitiin esittää diskreetillä hilalla niin että SU(3)-symmetria oli konkreettisesti näkyvillä. QCD oli nyt valmis numeerisiin laskuihin. Paperi oli kyllä ensi tutustumisella 1975 ihan käsittämätön. Tuntui kyllä, että tässä on jotain nerokasta, mutta tarvittiin lukuapua eli asian uudelleen formulointia ennen kuin sen periaatteessa yksinkertainen idea valkeni.

Työkalut hiukkaskiihdyttimillä tehtävien mittausten tulkitsemiseen olivat oleellisesti valmiina 1975, mutta vielä puuttui yksi elementti tutkimusalastani. Tein jettifysiikkaa, jettien tuottoa fotonit-fotonit-törmäyksissä, dileptonien tuottoa. Vieraillessani vuoden 1979 marraskuussa CERNissä Esko Pietarisen työhuoneessa, nojasin kyynänpäälläni korkeaan arkistokaappiin, jonka päällä oli sekalaisia papereita. Katseeni sattui monisteeseen, jonka etusivulla luki "Cosmology and particle physics", tekijä Gary Steigman. Ajattelin, että tuohan saattaa olla mielenkiintoista, tartuin julkaisuun ja vein sen mukana. Ja se avasikin aivan uusia näköaloja, tempaisi mukaansa. Pehdyin asiaan ja jo 19-22.5.1981 olin valmis esiintymään asiantuntijana ja pidin Norditassa Kööpenhaminassa 8 luennon luentosarjan otsikolla "Particle physics and the early universe". Sarja oli oikein menestynyt, 30 kuulijaa täytti salin. Olisinkohan jäänyt tästä paitsi, ellen olisi sattunut nojaamaan Pietarisen huoneen arkistokaappiin?

Kosmologian standardimalli valmistui kokonaisuudessaan 1983 kun big bang ulotettiin aivan alkuhetkiin eli Planckin skaalaan. Keksittiin eksponentiaalisen laajenemisen aikakausi inflaatio ja opittiin kvantisoimaan siinä painovoimakenttään ja aineeseen syntyvät skalaarit ja tensoriaaliset flukтуаatiot. Planckin vakio tuli siis mukaan. Oleellisinta tässä eli, että flukтуаatiot tänä päivänä voitiin myös laskea ja muodostaa havaittavia seurauksia. Kaiken lisäksi nämä näyttivät pitävän paikkansa.

Kahdeksankymmentäluvun alussa oli siis valmiina standardimalli (kvanttikromodynamiikka, sähköisheikko teoria, Einsteinin yleiseen suhteellisuusteoriaan perustuva big bang-kosmologia) ja seuraavina vuosikymmeninä keskityttiin näiden seurausten laskemiseen, yksityiskohtien viilaamiseen ja reuna-alueiden paikkaamiseen. Erityisesti reuna-alueille tehdyt uudet rakennelmat ovat järjestään rapistuneet. Standardimalli on ällistytävän stabiili. Mutta sen taakse pitää päästä.

4. Hiukkasaine, 80-luvun jälkeen

Standardimallin lait oli johdettu tutkimalla sen yksittäisiä rakenneosia, hiukkasia, ja niiden vuorovaikutuksia. Oli kuitenkin ilmeistä, että aivan uusia ilmiöitä liittyisi monen hiukkasen systeemeihin, alkeishiukkasaineeseen, hituaineeseen. Ensimmäinen paperi, jossa hituaine konkreettisesti esiintyy, on Collinsin ja Perryn, Phys. Rev. Lett, preprint valmis marraskuussa 1974. Jutusta näkee miten on hyvä olla mukana aivan alusta, hyvässä paikassa, olla uranuurtaja, jolloin kaikki on yksinkertaista. Se on ilmeisesti tohtoriopiskelija Malcom Perryn eka paperi, kerännyt 1600 viitettä. Tieto asymptoottisesta vapaudesta oli

tietysti levinnyt Cambridgeen pikavauhtia ja tässä sitä sovellettiin neutronitähden aineeseen: hyvin tiheänä se muuttuisi asymptoottisen vapauden takia vapaaksi fermi-kaasuksi. Uusi tosiasia, vanha systeemi, suorastaan triviaalit laskut, uudet tulokset ja näkymät uusiin tarkempiin laskuihin.

Valitsin hiukkasaineen tutkimussuunnaksi, ehkä siellä olisi vähemmän kilpailua kuin standardimallin edelleen kehittäessä. Näkökulmasta riippuen alalla on monta erilaista nimeä: havaitsemismenetelmän mukaan kyseessä voi olla suurenergisten raskasjoniormäysten fysiikka tai kosmologisten faasimuutosten dynamiikka, teoreettisen ratkaisumenetelmän mukaan äärellisen lämpötilan ja tiheyden kenttäteoria tai numeerinen kenttäteoria. projektisuunnitelman otsikkona kvarkkiaine tai kvarkki-gluoni-plasma, jne.

Tutkimussuunnan valinta syntyi ihan omasta päästä, mutta laatu vaati kontakteja ulkomaisiin uranuurtajiin. Elokuussa 1980 järjesti Helmut Satz Bielefeldissä kokouksen, johon hän oli kutsunut kaikki mahdolliset tutkijat, joilla saattoi olla yhteyttä hituaineen tutkimukseen. Alahan oli niin uusi, ettei vielä ollut muodostunut selkeää tutkijayhteisöä. Kokous oli suuri menestys, jatkokokous piti heti järjestää toukokuussa 1982. Sain näissä kaksi kontaktia, joilla on ollut ratkaiseva merkitys HYN hituainekoulukunnan kehitykselle: Larry McLerran (kylmän kvarkkiaineen ratkaisu häiriöteorialla, hituaineen termodynamiikan numeerinen lasku, QCD-aine raskasjoniormäyksissä) ja Joe Kapusta (kuuman kvarkkiaineen ratkaisu häiriöteorialla). Kun nimiä mainitaan, on hyvä ottaa esille myöhemmiltä ajoilta vielä avainhenkilö Misha Shaposhnikov, joka vuodesta 1993 alkaen opetti meille CERNissä kuinka perturbatiivisen (pieni kytkinvakio) hituaineen faasimuutosten laskussa on tehokasta ja luotettavaa lähteä efektiivisistä teorioista, integroida teorioista pois suuret skaalat, lämpötila tai tiheys. Päästään vielä efektiivisesti eroon aikadimensiosta, teoriaan jää kolme paikkadimensiota ja lämpö piilee teorian parametreissa.

Jäsennän jatkossa tutkimussuunnat McLerranin Satzin ensimmäisessä miitingissä käsiteltyjen varhaistöiden mukaan, niin näkee miten kaukaa alkujuuria pitää etsiä: numeerinen kenttäteoria ja kuuma hituaine kosmologiassa, kuuma hituaine raskasjoniormäyksissä, kylmä ja tiheä hituaine neutronitähdissä.

4.1. Numeerinen kenttäteoria, kuuman hituaineen tilanyhtälö ja faasimuutokset

Kokouksen jälkeen nopeimmin lähti kehittymään termodynamiikan numeerinen lasku. QCDhän oli peräisin vuodelta 1973, mutta ensin ratkaistiin vain suuren energian asymptoottinen vapaus häiriöteoreettisesti. Ei-perturbatiivisen numeerisen kahliutumislaskun teki vasta Creutz 1979 ja McLerran et al. oli keksinyt tehdän saman äärellisessä lämpötilassa alkuvuodesta 1980. Hän raportoi tästä työstä mainitussa Satzin kokouksessa, mutta kun se oli tehty vain ei-fysikaalisessa yksinkertaisessa SU(2)-ryhmän tapauksessa, heräsi heti kysymys että mitä jos ryhmäksi pannaan oikea SU(3), värejä on kolme. Kannoin idean Helsinkiin, Montonen selitti mistä on kyse, Pietarinen väänsi koodin (hän on kyllä maailman ensimmäinen, joka simuloi SU(3)-matriiseilla) ja paperi oli valmis alkuvuodesta 1981. Tulos oli mielenkiintoinen, näytti (data oli kyllä aika surkeaa) että joku faasimuutos siinä on, ehkä ensimmäistä kertalukua.

QCD:n ja pian myös sähköisheikon teorian termodynamiikan laskemisesta tulikin pian hituainekoulukunnan tärkeimpiä kohteita. Mikä on hituaineen paine lämpötilan funktiona, onko sillä hyppyjä jossain lämpötilassa? Onko latenttia lämpöä, kun tavalliset hadronit jossain lämpötilassa sulavat osasiinsa, kvarkeiksi ja gluoneiksi?

Periaatteessa kyse on yhden kenttäteorian lausekkeen ratkaisemisesta. Tähän voidaan ryhtyä eri tavoilla: 1. Fenomenologisesti, fysikaalisella intuitiolla, 2. Approksimoimalla lauseketta jonkun pienen parametrin ekspansiolla ja laskemalla ekspansion termit tehostetusti kynällä ja paperilla eli tietokoneilla symbolisella laskennalla, 3. Laskemalla lauseke numeerisesti tietokoneilla. Menetelmät 2 ja 3 voidaan yhdistää,

apksimoidaan ensin analyttisesti ja lasketaan loput numeerisesti. Hituainelaskut olivatkin 90-luvulla suurimpia Suomen supertietokoneresurssien käyttäjiä, muut alat ovat jo kirineet ohi.

1. Faasimuutokset fenomenologisesti. QCD:n tapauksessa yksinkertaiset mallilaskut antoivat aiheetta olettaa, että on kvarkkifaasi ja hadronifaasi ja välissä latentti lämpö eli 1. kertaluvun transiio. Vierailija Tom DeGrandin 1984 sekä Hannu Kurki-Suonio kanssa 1986 laskimme mitä kaikkia mielenkiintoisia seurauksia olisi kosmologisesta 1. kertaluvun QCD-transitiosta. Hienoja efektejä, mahdollisesti havaittavie kosmisia inhomogeneiteettejä. Samanlaisia efektejä löytyi myös sähköisheikon transition ajalta, laskemassa olivat 90-luvun alussa Enqvist, Ignatius, Laine ja Rummukainen. Ikävä kyllä myöhemmät hila-Monte Carlo-laskut ovat osoittaneet, että QCD-transiio lähes varmasti on jatkuva, alemppaa kertalukua. Omat laskut taas osoittivat että myös sähköisheikko transiio varmasti on jatkuva. Mutta käytettyjä menetelmiä transition kinetiikalle, kuplanukleaatiota, käytetään aktiivisesti nykyäänkin, kun spekuloidaan mitä tapahtuu standardimallin ulkopuolella.

Tutkimusideat usein ilmenevät satunnaisesti. Kesällä 1991 olin vierailulla Brookhaven National Laboratoryssa. Joku koputti ovelle, sisään tuli yksi tunnettu hilafysikko, joka kysyi "tiedätkö onko eri QCD-aineen faasien rajapintojen termodynamiikkaa laskettu hilalla?". Katselin silmät pyöreänä ja osasin vastata vain ettei ole aavistustakaan. Uumoilin että atomifyysikoilla vasis olla hyödyllistä sanottavaa ja Suomeen palattua kysyin Risto Niemiseltä että mitens pintaenergia mitataan. "No, venytetään pintaa ja katsotaan kuinka kovaa pitää vetää". Toteutimme tämän idean hilalla ja kohta meillä oli tuloksia pintojen vapaan energian arvoista. Ajan mittaan opimme, Rummukaisen ja Kärkkäisen kanssa, että on tehokkaampaa vikitellä reunaehtoja käyttämällä hilasysteemi muodostamaan pinta omalla sisäisellä dynamiikallaan. Rajantie taas keksi miten tällä lailla saadaan tietokoneessa suprajohteelle Abrikosovin vorteksi.

2. Tilayhtälö symbolisella laskennalla. Kuuman kvarkki-gluoniaineen fysiikan ymmärtämistä, esimerkiksi sen paineen laskemista suurilla lämpötiloilla monimutkaistaa niissä syntyvä hirmuinen määrä gluoneja. Maailmankaikkeus on täynnä fotoneja eikä niistä ole mitään ongelmaa, ne vaan kulkevat siellä omia aikojaan. Mutta gluoneilla on väri ja ne vuorovaikuttavat toistensa kanssa ja muodostavat puuron, jonka ominaisuuksia kukaan ei ole onnistunut tarkasti laskemaan. Paine voidaan kyllä kehittää sarjaksi kytkinvakion funktiona ja 1977 saakka oli tunnettua, että $g^6 \log(g)$ on termi, jonka kerroin voidaan määrätä tunnetuin symbolisen laskennan menetelmin. Tämä onnistui vuonna 2002.

Kertoimen määrittäminen antaa kuvan tieteen teosta näillä menetelmillä. Tulosta varten pitää laskea sanotaan 10 miljoonaa termiä, jotka sitten lasketaan yhteen ja saadaan yksi luku, tuo haluttu kerroin. Laskussa on mukana kontrolliparametreja, joiden pitää hävita yhteenlaskussa. Vuonna 2002 olimme kolmistaan, Kajantie, Laine, Schröder (ryhmän postdoc) Santa Barbaran teoreettisen fysiikan instituutissa. Schröderin laptop (HY:n rahoittama) oli pari kuukautta jauhanut laskua ja sopivasti vierailun aluksi sylki ulos tuloksen. Ei ollut kontrolliparametri hävinnyt! Laine löysi vielä pitkästä koodista merkkivirheen (pieni virhe, suuri vaikutus). Uudesta laskusta huomattiin, että kontrolliparametrin olivat monimutkaisia integraalirelaatioita, mutta ei ollut pois suljettua, että ne häviäisivät. Numeerisesti ne hävisivätkin, saatiin tulos kertoimelle ja paperi valmiiksi marraskuussa. Analyttinen todistus häviämislle seurasi myöhemmin. Näillä analyttisillä menetelmillä päästiin vain suuriin lämpötiloihin, joissa g on pieni asympotoottisen vapauden takia. Faasitransitioalueeseen päästiin vain Rummukaisen tekemillä numeerisilla menetelmillä. Analyttisen laskun merkitys on lähinnä periaatteellinen, tämäkin fakta kuumasta kvarkki-gluoniaineesta voidaan laskea, mutta sillä ei juuri ole merkitystä kokeiden tulkinnan kannalta.

2. ja 3., tilayhtälö yhdistetyin symbolisen laskennan ja numeerisen laskennan memetelmin. Tilanne kosmologiassa tärkeän sähköisheikon aineen kanssa poikkeaa kvarkki-gluoniaineesta. Siellähän odotus oli että suurissa lämpötiloissa kaikki hiukaset ovat massattomia, mutta kun T laskee, jossain Fermi skaalan tienoilla tapahtuu muutos faasiin, jossa hidut saavat normaalit massansa. Tämän tutkimista tavallisilla

numeerisilla menetelmillä suunnittelin Rummukaisen kanssa CERNissä 90-luvun alussa. Onneksi paikalla oli Misha Shaposhnikov, joka sanoi, että teoriastahan pitää ensin integroida analyyttisesti pois suuret lämpötilat ja sitten laskea numeerisesti tällä yksinkertaisemmalla 3-dimensionaalisella teorialla. Pois integrointi myös transiioalueessa onnistuu sähköisheikossa teoriassa, joka on heikommin kytketty kuin QCD. Pois integrointia tekemään tuli fenomenalisen taitava Mikko Laine niin että numeerisia tuloksia alkoi tulla keväällä 1996. Johtopäätös oli ilmeinen, silloin tunnetuilla Higgsin massan arvoilla ei ole mitään varsinaista transiitiota, olomuodon muutos on vähittäinen, ilman hyppyjä. Hyppyjä taas tarvitaan, jos halutaan esimerkiksi selittää miksi maailmassa ainetta on enemmän kuin antiainetta. Tulos oli niin yllättävä, ettemme uskaltaneet edes lausua sitä otsikossa vaan varovasti kyselimme "Onko transiitiota..." ja sitten tekstissä kerroimme, ettei sitä näy.

Standardimallin sähköisheikon sektorin suuren lämpötila termodynamiikan tyhjentävä selvittäminen on ehkä hituaine-koulukunnan tärkein tulos. Sillä on pysyvää arvoa. Sen jälkeen, kun Higgsin massa oli kokeellisesti määritetty, voitiin luotettavasti laskea, miten transiio täsmälleen meni, ilman mitään hyppyjä, latenttia lämpöä. Tulos on muodollisesti negatiivinen, mutta antaa tärkeää osviittaa siitä mihin suuntaan standardimallia pitäisi kehittää.

Cernissä tapahtui tuohon aikaan muutakin merkittävää. Kerran syksyllä 1992 istuin huoneessani päätteen ääressä. Rummukainen tuli huoneeseeni, seisoi selkäni takana ja sanoi "kirjoita siihen www". Vähän ihmettelin mistä on kyse, mutta tein työtä käskettyä. Näyttöön ilmestyi rivimoodissa julkaisuluettelo Stanfordista ja kymmenkunta muuta vastaavaa tietolähdettä. Rummukainen selitteli mistä www:n kehittämisessä oli kyse muttei kukaan voinut arvata millaisesta informatiovallankumouksesta oli kyse. Jatkossa tuli usein kirjoitettua www, kunnes pian selainpohjaiset Mosaic ja Netscape ilmestyivät joskus 1993 alusta.

4.2. Kuuma QCD-aine raskasjoniörmäyksissä

QCD-aineen tutkimus raskasjoniörmäyksissä lähti liikkeelle 80-luvun alussa suorastaan räjähdysenomaisesti. Tutkimussuunnalle oli selkeä tilaus, koska kokeelliset mahdollisuudet olivat ilmeiset. Nyt kyse oli tehdä QCD-ainetta laboratoriossa ja mitata sen ominaisuuksia. McLerran et al arvioivat QCD-plasman tuottoa, kun maalihiukkanen on levossa, paperi submittoitu heinäkuussa 80 ja raportoitu Satzin miitingissä 1, minä puhuin siellä omista arvioistani. Maaliskuussa 1981 (jatkossa vielä toukokuussa 82) julkistin Hannu I Miettisen kanssa tekemäni laskut leptoniparien tuotolle näissä prosesseissa. Termi "little bang" on tehdyn etsinnän mukaan tullut ensimmäistä kertaa esille näissä. McLerran vieraili Helsingissä keväällä 82, ylensimme tehdyt arviot hydrodynaamisiksi laskuiksi ja niiden alkuarvoiksi. Olisi vaan pitänyt älytää mennä keskialueeseen, jossa suihku ja maali menevät valokartiolla päivästäisiin suuntiin. Bjorken teki tämän, viitatenkin fragmentaatioalueelaskuihimme, ja kirjoitti alas ikonisen Bjorkenin virtauksen kesällä 82.

Syksyllä 82 alalle rekrytoituivat myös Vesa Ruuskanen (fotoniemissio QCD-plasmasta), Risto Raitio (hän on kyllä maailman ensimmäinen, joka on kirjoittanut relativistista hydrokoodia QCD-plasman laajenemiselle) ja Hannu Kurki-Suonio (deflagraatiot ja detonaatiot QCD-plasman laajetessa). Tarkoitus oli järjestää alan maailmankongressi Helsingissä, mutta kokeelliset fyysikot olivat heränneet USAssa ja oivaltaneet, että heillä oli mahdollisuus rakentaa juuri näitä tutkimuksia varten uusi törmäytin Brookhaveniin. He suorastaan vaativat kongressin järjestämistä Brookhavenissa ja todella onnistunut (250 osanottajaa, aivan uusi ala) Quark Matter 1983 järjestettiin syyskuussa 83. Olin viettänyt kesä- heinäkuun Seattlessa McLerranin luona, mutta minut komennettiin palaamaan takaisin USAan heti syyskuussa pitämään plenary-puhetta hydrodynamiikasta QM83:ssa. Helsingissä sitten järjestettiin QM84. Tämän oli alkusoittoa sille, että

ensimmäiset jossain määrin vakuuttavat kokeelliset tulokset QCD-plasmalle julkistettiin Brookhavenissa kesäkuussa 2000.

Pitänee myös todeta, että QCD-aineen tutkimus herätti myös ennakkoluuloja ja jopa ylenkatsetta. Mitä luulette saavanne irti sotkuisesta ydin-ydin-törmäyksestä? Hiukkasfysiikassa oli totuttu etsimään harvinaisia pistemäisiä tapauksia, nyt mentiin toiseen äärimmäisyyteen ja haluttiin mahdollisimman paljon tavaraa ulos törmäyksestä. Epäluulot ovat kyllä täysin hälvenneet ja ison skaalan ilmiöiden tuotto ja mittaus ovat tärkeä osa Cernin kokeellista timintaa.

Relativistinen heavy ion-fysiikka siirtyi Helsingistä Jyväskylään, kun Vesa Ruuskanen (Jyväskylässä vuodesta 72) omistautui sille ja Kari J. Eskola siirtyi sinne 1997 ja samoin vielä Tuomas Lappi 2009 (ryhmänjohtajana yhteistyössä HIPin kanssa). Raskasjonikokeissa tarvitaan tietoa ytimien sisältämien kvarkkien ja erityisesti gluonien määrästä. Kokeilijat ovat tottuneet löytämään tämän tiedon Eskolan pitkälti yli tuhannen sitaation papereista. Kun 2002 HYssä keskusteltiin Lapin kanssa väitöskirjan aiheista, kaivettiin esille McLerranin ajatuksiin perustuva teoria QCD-aineen synnystä raskasjonitörmäyksissä. Totesin että kirjoitas tosta kunnollinen numeerinen koodi ja sinusta tulee alalla maailmankuulu. Lappi teki työtä käskettyä (ei hän muuta ohjausta kaivannutkaan) ja hänestä tuli todella alalla kiistaton auktoriteetti. Rahoittajat ovat myös huomanneet Jyväskylän heavy ion-fysiikan ryhmän tieteellisen menestyksen.

4.3. Kylmä ja tiheä hiukkasaine

Tämä tarina alkoi Collinsin ja Perryn huomiosta 1974 sekä sen sofistikoituneesta jatkosta, McLerran-Freedmanin kylmän ja tiiviin kvarkkiaineen paineen laskusta 1977. Hituainekoulukunnan uusin paksu, terve ja elinvoimainen haara jatkaa tästä eteenpäin.

Kuuman plasman laskun tekee monimutkaiseksi gluonien proliferaatio ja monimutkaiset vuorovaikutukset, kylmän ja tiiviin kvarkkiaineen laskun tekee monimutkaiseksi Paulin kieltosääntö: systeemin tilafunktion nollalämpötilassa tulee olla antisymmetrinen kvarkeissa. Ei ole keksitty, miten tämä ehto voitaisiin ottaa huomioon numeerisessa laskussa, johon on sisäänrakennettu tarvittavat symmetriat. Pienen kytkinvakion ekspansio, jonka alkupään Freedman-McLerran laskivat, voidaan kuitenkin formuloida. HY:n Aleksi Vuorinen, yhteistoiminnassa Stavangeriin sijoittuneen Aleksin Kurkelan kanssa, on kaivanut itselleen ison tiede-ekologisen lokeron jatkamalla tätä ekspansiota ja soveltamalla sitä neutronitähtihavaintoihin. Näiden analyysiin on syntynyt luokkaa 10 hengen ryhmä, joka on onnistunut hankkimaan rahoitusta monista lähteistä. Uutta täydentävää näkökulmaa ratkaisumenetelmiin tuo mm Niko Jokela, tunnettu specialisti gauge/gravity -dualitetin menetelmien soveltamisessa. Mukaan on tullut useita seuraavan polven tutkijoita. Nimistä Marri Järvinen, Risto Paatelainen ja Joonas Nättiä kuullaan vielä paljon. Ja voisi listaa jatkaa pidemmällekin.

5. Nyt ja tulevaisuudessa

Fysiikka on empiirinen tiede ja teoreettinen tutkimus menee sinne missä on kovaa dataa. Tämä pätee konkreettisesti QCD-aineen suhteen. Sitä voidaan jopa tuottaa laboratoriossa mittauksia varten ja hituainekoulukunnalla on ollut ja edelleen on keskeinen rooli tämän analysoinnissa. Vielä jonkun aikaa dataa tulee Cernistä, mutta 10 vuoden horisontilla painopiste tulee siirtymään USAhan, jonne rakennetaan uusi electron-ion-collider. Siinä siis ei törmäytetä kahta ydintä vaan tutkitaan yhtä ydintä elektronisuihkulla. Työtä joudutaan näin uudelleensuuntaamaan aineesta enemmän hiukkasten suuntaan.

Sähköisheikkoo ainetta ei millään voi laboratoriossa valmistaa, energia ei riitä, ja katse joudutaan suuntaamaan luonnon laboratorioon eli kosmologiaan. Big bangin voidaan kevyesti ulottaa tekijällä 10^{26} nykyistä korkeampiin lämpötiloihin. Tällöinkin ollaan vielä 5 kertalukua teoreettisen maksimin eli Planckin skaalan alapuolella. Tässä kohtaa on hyvä muistaa, että big bang on empiirisesti verifioitu vain siihen asti kun $T \sim \text{MeV}$ eli $t \sim \text{sec}$, tämäkin vastaa reshiftiä $z \sim 10^{10}$. Ei sen kummallisempaa fysiikkaa kuin tähtien astrofysiikassa. Ja tämä tieto on peräisin 40 vuoden takaa. Mutta esimerkiksi kosmologisesta QCD-transitiosta redshiftillä $z \sim 10^{12}$ ei oikein ole empiiristä signaalia - kun se on jatkuva eikä ensimmäistä kertalukua. Olisiko siellä piilossa jotain?

Standardimallin sähköisheikko transiitio on jatkuva ja siitäkin on näin ollen vaikea löytää empiiristä signaalia. Yksi idea eteenpäin pääsyyn on olettaa, että luonnossa on vielä lisäkenttiä, joiden seurauksena transiitio onkin vahva, ensimmäistä kertalukua. Seurauksena saataisiin ehkä myös selitys sille, että maailmassa on ainetta ja vain ripaus antiainetta. Todella arvokas tulos. Tähän suuntaan tehdään hituainekoulukunnan sisällä paljon työtä. Toki on mahdollista, että lopulta osoittautuu että transiitio onkin jatkuva, aivan kuten QCD-transition.

Aivan uusi askel, suorastaan paradigman muutos, on tehdä havaintoja käyttämällä sanansaattajana gravitaatiovälittäjiä. Rummukaisen ympärille on keräytyneet iso ryhmä, mm Mark Hindmarsh Englannista, jonka päätehtävänä on tutkia gravitaatiovälittäjäsignaalia kosmisesta sähköisheikosta faasimuutoksesta ja sen havaitsemista kolmen detektorin muodostamalla satelliittikonfiguraatiolla.

Samalla lailla uusi sanansaattaja maailmankaikkeudesta voisi olla pimeä aine. Kimmo Tuomisella on iso ryhmä käymässä läpi monia mahdollisia tyyppisiä pimeää ainetta, Rajantie on jopa monopoleja etsivän kokeellisen Cernin ryhmän jäsen. Tyypillistä näille hankkeille on, että todennäköisyys löytää jotain on $\epsilon \ll 1$, mutta mahdollinen löydön arvo on $1/\epsilon \gg 1$.

6. Kansainvälinen rekrytointi.

Tutkimustyö on luonnostaan kansainvälistä eikä sitä ole edellä ole tarvinnut erityisesti painottaa. Hiukkasaine-koulukunnan puitteissa on kuitenkin perusteltua kritisoida viime vuosina muotiin tullutta ajatusta, että professorien rekrytointi Suomeen ulkomailta olisi jotenkin arvo sinänsä. Erityisesti tekniikan alalla tätä on tehtykin runsaasti ja ehkä siellä kotimaisia huippuresursseja on vaikea löytää, mutta hiukkasainetutkimuksen alalla näin ei ollenkaan ole asian laita. Ja rohkenen väittää, että fyysikaalisen tiedon rajojen siirtäminen pienten ja suurten etäisyyksien suuntaan on erityisen merkittävää tutkimusta, jota ei saa laiminlyödä. Perusteluna voi sanoa, että juuri näihin asioihin kiinnostunutta opiskelijaa on ovella jonoksi asti. Yllä mainituista tutkijoista kolme on päätenyt professoreiksi merkittäviin yliopistoihin ulkomaille, Kurkela Stavangeriin, Laine Berniin ja Rajantie Imperial Collegeen Lontoossa. Kaikki olisivat mielellään sijoittuneet Suomeen. Minusta tämä on suuri menetys Suomelle, kun samaan aikaan rekrytoidaan professoreja ulkomailta.

Yllä oleva valaisee myös sitä miksi Helsingin yliopiston Shanghai-ranking on jatkuvasti laskenut. Ei heille ole löytynyt paikkaa HYstä - sen sijaan on löytynyt ulkomaalaisista huippuyliopistoista.

Samaa ongelmaa sivua se, että tietysti on vielä monta, jotka eivät ole saaneet professoritason paikkaa edes ulkomailta. Kaikille kyllä löytyy työpaikka "businessista", mutta sitten kyvyt tutkimukseen jäävät hyödyntämättä.

