

# Aurinkoneutriinot

Marko Siik

LuK-Tutkielma  
Fysiikan tutkinto-ohjelma  
Luonnontieteellinen tiedekunta  
Oulun yliopisto  
Toukokuu 2018

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Neutriino</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Neutriinon historia</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Neutriinojen synty</b>	<b>4</b>
4.1	pp- ketju . . . . .	5
4.2	CNO- kierto . . . . .	8
4.3	Neutriinovuo . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Neutriinojen havaitseminen</b>	<b>12</b>
5.1	Varauksellinen vuorovaikutus . . . . .	12
5.2	Neutraali vuorovaikutus . . . . .	13
5.3	Elastinen sironta . . . . .	13
5.4	Tuplabetahajoaminen . . . . .	13
5.5	Homestaken kloorikoe . . . . .	14
5.6	Sudburyn neutriino observatorio . . . . .	14
5.7	Borexino . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Taustahäiriöt</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>16</b>

# 1 JOHDANTO

Tässä kirjallisuuskatsauksessa perehdymme eksoottiseen hiukkaseen, neutriinon, jonka moniin erikoisiin ominaisuuksiin kuuluu kyky läpäistä ainetta: minut, sinut ja koko maapallon, lähes koskaan reagoimatta sen kanssa. Tämän ominaisuuden vuoksi neutriinot eivät ainoastaan ole hankala tutkimuskohde vaan myös tärkeä, sillä niiden avulla saadaan suoraa tietoa auringon sisuksista.

Tässä tutkielmassa perehdymme ensin, mitä neutriinot ovat, josta siirrymme niiden historiaan, tarkemmin sanottuna teoriaan mihin niitä tarvittiin. Mielestäni historian avaaminen on tärkeää, koska se osoittaa hyvin kuinka pitkä prosessi on luoda uutta fysiikassa, eikä ainoastaan siksi ettei kyseistä hiukkasta pystytä suoraan havaitsemaan, vaan myös koska fyysikotkin ovat ihmisiä, epäilyttävästä hapituksestaan huolimatta, jotka eivät hyväksyneet parasta teoriaa ainoastaan siksi, koska olivat päättäneet maailman kaikkeuden koostuvan kahdesta hiukkasesta.

Historiasta hyppäämme neutriinon tuotantoon ja keskitymme auringon tuotamiin neutriinoihin. Käymme läpi neutriinon tuotantoprosessin sivuten auringon energiatuotannon, johon neutriinotuotanto on sidottu. Käymme läpi pp-ketjua, jonka teoria alkaa olla suhteellisen vakaalla pohjalla. Tämän jälkeen käymme läpi hieman eksoottisempaa CNO-ketjun teoriaa sekä neutriinovuota, sen suuruutta, syitä ja sen teoriaa. Lopuksi perehdytään miten neutriinoja tutkitaan, koelaitteistoihin sekä niiden tekniikkaan. Se on huomattavasti populaarifysiikan antamaa "Tungettiin vettä tankkiin ja odotettiin valon pilkahdusta" -kuvaa kiehtovampi ja monimuotoisempi.

## 2 Neutriino

Neutriino on lähes valon nopeudella liikkuva hiukkanen, joka ei reagoi muun aineen kanssa. Neutriinoilla ei ole sähkövarausta, joten niihin ei vaikuta magneettitai sähkökentät. Painovoimankin vaikutus on mitätön, koska se on lähes massaton. Neutriinot vuorovaikuttavat heikon ydinvoiman kautta materiaan, joskin heikosti. Näin ollen neutriinoja ei voi havaita suoraan, vaan niistä tehdyt havainnot perustuvat niiden aiheuttamassa reaktiossa syntyneiden hiukkasten tutkimiseen. Neutriino on fermioni, jonka spin on  $1/2$  ja sähkövaraus 0. Neutriinoja on kuutta erilaista, kolme eri makua elektronin, myonin ja taun neutriinot sekä niiden antihiukkaset. [3]

### 3 Neutriinon historia

Vuonna 1914 James Chadwick huomasi mittauksissaan ettei  $\beta$ -hajoamisessa vapautuvan hiukkasen (elektroni) energia ollut etukäteen määritettävissä, toisin kuin  $\alpha$ - ja  $\gamma$ -hajoamisissa, vaan välillä elektroni ei näyttänyt saavan juurikaan liike-energiaa ja toisinaan se vaikutti ottavan kaiken tarjolla olevan. Elektronilla näytti siis olevan jatkuva energiaspektri. Neils Bohr ehdotti radikaalia ajatusta, ettei energian säilymlaki pätsi  $\beta$ -hajoamisessa. Wolfgang Pauli ei tätä ideaa kuitenkaan hyväksynyt ja ehdotti, että prosessissa syntyisi toinenkin hiukkanen, joka jakaisi energian elektronin kanssa. Hiukkanen, jonka varaus olisi neutraali. Vaikka ajatus vaikutti korjaavan ongelman, ei sitä tahdottu hyväksyä. Vallitsevana käsityksenä nimittäin oli, että atomi muodostui ainoastaan kahdesta erilaisesta hiukkasesta, protoneista ja elektroneista.[6]

Kun Rutherfordin kokeissa ilmeni, että atomi koostui hiukkasista, syntyi välittömäksi käsitykseksi, että maailma koostuu kahdesta hiukkasesta, protoneista ja elektroneista. Rutherford myös huomasi ettei tämä malli toiminut vetyä raskaammille atomeille. Hän huomasi atomi-ytimen tarvitsevan kolmannen hiukkasen, nimen tämän neutroniksi. Hän kuvasi sitä tiukaksi protonin ja elektronin paketiksi. Tämä kuvaus kuitenkin mureni vuonna 1927 kun löydettiin protoneilla ja elektroneilla olevan spin, joka on aina sama. Kun oli mitattu atomien ytimien spin, voitiin osoittaa, että tyypin ytimessä on oltava parillinen määrä hiukkasia. Tämän lisäksi kemia oli todistanut typpi-atomilla olevan 7 elektronia, typpi-atomien ytimessä oli siis oltava 7 protonia. Eli neutroni ei voinut olla protonin ja elektronin yhdistelmä, sillä tällöin typpi-atomien ytimessä olisi ollut 21 hiukkasta. Tästä Pauli otti kopin ja yritti lyödä kaksi kärpastä yhdellä lyönnillä, väittäen, että neutroni olisi oma hiukkasensa atomien ytimessä ja tämä olisi se hiukkanen joka jakaa energian elektronin kanssa  $\beta$ -hajoamisessa. Tämä tapahtui vuonna 1930. Vuonna 1931 Pauli keskusteli ideasta Enrico Fermi kanssa, joka, toisin kuin useimmat kollegat, silmin nähden piti ajatuksesta. Vuonna 1932 James Chadwick löysi todisteet neutronin olemassaolon atomien ytimessä. Tämä oli hyväksi Paulin teorialle kahdella tavalla: Ensinnäkin, Pauli oli oikeassa uudesta hiukkasesta, joka sijaitisi atomien ytimessä. Toiseksi, vaikkei neutroni sopinutkaan selittämään  $\beta$ -hajoamista suuren massansa vuoksi, oli se kuitenkin lisännyt hiukkasten lukumäärää 50%, jonka vuoksi ei ollut enää niin uhkarohkeaa ehdottaa uusia hiukkasia. Jonka Pauli välittömästi tekikin. Hän ehdotti, että  $\beta$ -hajoamisessa vapautuu hyvin kevyt neutraali hiukkanen, joka omien sanojensa mukaan "...ei ole olemassa enakkoon sen enempää kuin haukahdus koirassa.". Pauli lopetti kutsumasta tätä hiukkasta neutroniksi, mutta hänellä ei kuitenkaan ollut nimiehdotusta tällä uudelle hiukkaselle. Fermiltä sellainen löytyi. Hän ehdotti 'pienää neutronia' italiaksi: neutrino.[6]

Vuonna 1933, ensimmäisessä hiukkasfysiikan konferenssissa, neutriinoteoria sai lisävahvistusta. Bohr kuvitteli  $\beta$ -hajoamisessa rikkoutuvan energian säilymis-

lain korjaantuvan kun otetaan suuri määrä tapahtumia. Pauli ehdotti tekemään tarkat mittaukset  $\beta$ -hiukkasten energioille. Jos niiden energia ylittää tietyn raja-arvon olisi Bohr oikeassa ja neutriinoidea hylättäisiin. Jos taas hiukkasilla olisi selvä yläraja tarkoittaisi se sitä, että Paulin neutriinot ovat olemassa. Ilmeni etteivät elektronit koskaan ylittäneet tätä rajaa. Pauli oli siis oikeassa. Pauli ilmoitti ettei neutriinolla voinut olla paljoa enempää massaa kuin elektronilla, mahdollisesti se olisi jopa massaton. Lisäksi hän arveli neutriinon spinin olevan  $1/2$ . Hän uskoi ettei neutriinoa voitaisiin koskaan havaita, lyöden siitä vetoa laatikollisesta shampanjaa, jonka hän hävisi vuonna 1956.[6]

## 4 Neutriinujen synty

Neutriinoja syntyy erilaisissa hiukkahajoamisissa, pionin, taun, myonin- hajoamisissa sekä protonin  $\beta^+$ - hajoamisessa. Näistä helpoimpia tutkittavia ovat  $\beta^+$ -hajoaminen, sillä Auringon fuusioenergian tuotannossa syntyy juuri näitä neutriinoja.[4]

Varatun pionin hajoamisyhtälö

$$\pi^\pm \Rightarrow l^\pm + \nu_l \quad (1)$$

Missä  $l = \mu, e$

Myonin hajoamisyhtälö

$$\mu^+ \Rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

Tai

$$\mu^- \Rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3)$$

ytimen  $\beta^-$  - hajoaminen

$$n \Rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (4)$$

ytimen  $\beta^+$  - hajoaminen

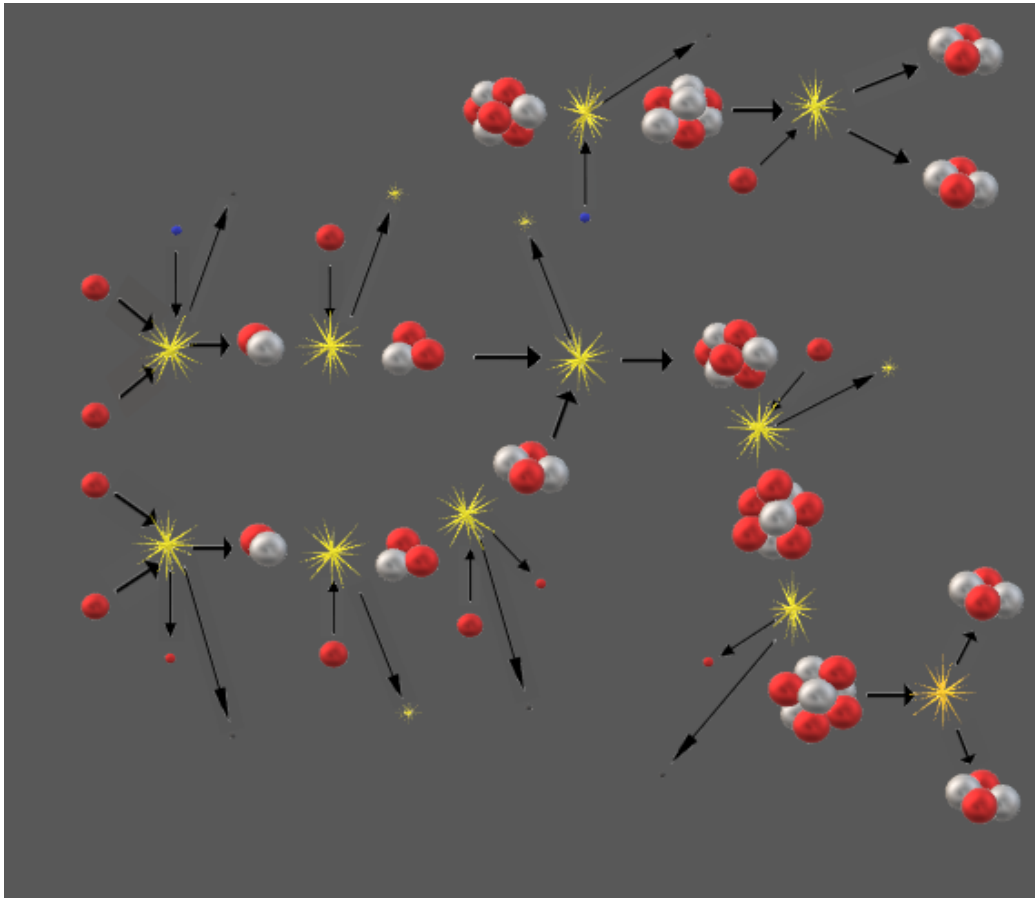
$$p \Rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (5)$$

Tässä tutkielmassa keskitymme Auringon tuottamiin neutriinoihin sekä niiden tutkimiseen. Auringon energiatuotanto perustuu pääasiassa protoni- protoni -ketjuun (pp-ketju), tosin Aurinko tuottaa myös pienen määrän energiaa CNO-kierroksi kutsutun reaktioketjun kautta. Kummankin ketjun eteneminen on helppo ymmärtää kun sisäistää, että on kaksi keskeisintä reaktiota, jotka vievät prosessia eteenpäin. Joko atomiytimeen yhtyy yksi protoni lisää tai ytimessä tapahtuu  $\beta^+$ -hajoaminen, joskin myös sekä  $\alpha$ -hajoamista, että elektronisieppausta tapahtuu. Näistä ainoastaan  $\beta^+$ -hajoamisessa ja elektronisieppauksessa syntyy neutriino. Auringon fuusioreaktioissa syntyy neutriinoja kahdeksan reaktion kautta, viisi pp-ketjussa ja kolme CNO-ketjussa. Kuudella kahdeksasta reaktiosta syntyvällä

neutriinolla on energiaspektri ja kahdella (pep ja  ${}^7Be$ ) niin kutsuttu neutriinoviiva (neutrino line) [3]. Neutriinoviivat syntyvät prosessissa, missä ei synny muita hiukkasia joiden kanssa neutriino voisi jakaa energian, auringossa tällainen tapahtuu kun ydin kaappaa elektronin. Aurinkoneutriinot ovat nimetty, joka helpottaa niiden tunnistusta tutkimuksissa. Nimi tulee reaktio-yhtälön vasemmasta puoliskosta, jossa neutriino syntyy. pp-ketjun neutriinot ovat pp-, pep-, hep-,  $Be$ - tai  $B$ - neutriino (taulukko 1), ja CNO-ketjun  $N$ -,  $O$ - sekä  $F$ -neutriinot (taulukko 2). Kaikki nämä ovat elektronineutriinoja [3].

## 4.1 pp- ketju

pp-ketju on prosessi jossa kaksi protonia yhtyy raskaammaksi ytimeksi, joka jatkaa yhdistymistä näin synnyttäen yhä raskaampia ytimiä. Aurinko koostuu pääasiassa vedystä, joka on ionisoitunut korkean lämpötilan vuoksi. Ionisoitunut vety tarkoittaa yksittäistä protonia. Tässä kuumassa protonipuurossa protonit törmäilevät, aika ajoin voittaen kahden protonin välisen Coulumbin voiman, muodostaen  ${}^2He$  atomiytimen, joka useinmiten hajoaa välittömästi takaisin kahdeksi erilliseksi protoniksi. Joskus kuitenkin näistä kahdesta toinen protoni ehtii hajota neutroniksi  $\beta^+$ - hajoamisen kautta, jossa vapautuu positroni ja neutriino, muodostaen vakaan  ${}^2H$ - atomiytimen [8]. Tässä reaktiossa syntyvää neutriinoa kutsutaan pp-neutriinoksi. Joskus, joskin harvoin, reaktioon yhtyy myös elektroni joka yhdistyy toisen protonin kanssa, luoden näin neutronin, jonka vuoksi reaktiossa ei vapaudu positronia vaan ainoastaan neutriino [8]. Tätä kutsutaan pep-neutriinoksi.



**Kuva 1: Reaktioketjut**

Kuvassa esitetään pääketju, jonka aloittaa 4 protonia ja päättää 2  $\alpha$ -hiukkasta. Ketjun aloittajahaaroissa on kuvattu kaksi eri reaktiopolkua, joista ylempi on alempaa huomattavasti harvinaisempi (pep-reaktio). Oikealla yläkulmassa on kuvattu  ${}^7\text{Be}$  ytimen elektronisieppaus, josta tulee lopuksi 2  $\alpha$ -hiukkasta  ${}^7\text{Li}$  ytimen kautta. Kuvasta puuttuu ketju, jossa kaksi  ${}^3\text{He}$ -ydintä yhdistyy  ${}^4\text{He}$  ja kahdeksi protoniksi. Kuva 1 mukaillee Neutrino Astrophysics kirjan kuvailemia reaktioita.

Näiden reaktioiden kautta syntyvät  ${}^2\text{H}$ -ytimet jatkavat reagoimista nopeasti protonin kanssa muodostaen  ${}^3\text{He}$ -ytimen. Tämä reaktio ei tuota neutriinoa.  ${}^3\text{He}$ -ydin jatkaa reagoimista toisen  ${}^3\text{He}$ -ytimen kanssa, muodostaen  ${}^4\text{He}$ -ytimen ja kaksi protonia. Tätä pidetään yhtenä pp-ketjun päätepisteenä, joka muuttaa neljä protonia yhdeksi  ${}^4\text{He}$ -ytimeksi. Vaihtoehtoisesti  ${}^3\text{He}$  fuusioituu  ${}^4\text{He}$ -ytimen kanssa, muodostaen  ${}^7\text{Be}$ -ytimen. Näistä kumpikaan ei tuota neutriinoita.  ${}^3\text{He}$  voi reagoida myös protonin kanssa, muodostaen  ${}^4\text{He}$ -ytimen  $\beta^+$ -hajoamisen kautta

eli syntyy positroni sekä neutriino, eli hep-neutriino, joka on auringon neutriinoista korkeaenergisin.

${}^7\text{Be}$  voi reagoida joko elektronin kanssa muodostaen sekä  ${}^7\text{Li}$ - ytimen että Be-neutriinon. Tästä syntynyt  ${}^7\text{Li}$ - ydin  $\alpha$ -hajoaa kahdeksi  $\alpha$ -hiukkaseksi yhdistyessään protonin kanssa.  ${}^7\text{Be}$  voi myös reagoida protonin kanssa muodostaen radioaktiivisen  ${}^8\text{B}$ - ytimen, joka  $\beta^+$ -hajoaa epävakaaksi  ${}^8\text{Be}^*$ - ytimeksi, positroniksi sekä B-neutriinoksi.  ${}^8\text{Be}^*$  jatkaa hajoamista kahdeksi  $\alpha$ -hiukkaseksi.[3]

Kuvassa 1 on esitetty kaikki pp-ketjussa tapahtuvat reaktiot, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 1), pois lukien reaktio  ${}^3\text{H} + {}^3\text{H}$ , joka ei tuota neutriinoja.

### Taulukko 1: Auringon energiatuotanto

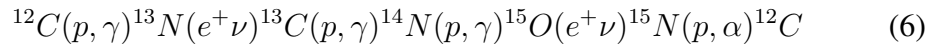
Taulukossa 1 on esitetty Auringossa tapahtuvat pp-ketjun reaktiot ja niistä syntyvien neutriinojen energiat.

reaktio	$\nu$ energia (Mev)
$p + p \Rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	$\leq 0.420$
Tai	
$p + e^- + p \Rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	1.442
${}^2\text{H} + p \Rightarrow {}^3\text{H} + \gamma$	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \Rightarrow \alpha + 2p$	
Tai	
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \Rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	
${}^7\text{Be} + e^- \Rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	(90%) 0.861
	(10%) 0.383
${}^7\text{Li} + p \Rightarrow 2\alpha$	
Tai	
${}^7\text{Be} + p \Rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	
${}^8\text{B} \Rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	$< 15$
${}^8\text{Be}^* \Rightarrow 2\alpha$	
Tai	
${}^3\text{He} + p \Rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	$\leq 18.77$



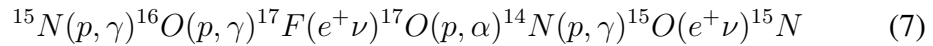
## 4.2 CNO- kierto

CNO-kierto on hiilen, typen ja hapen isotooppien luoma kierto, joka palaa takaisin lähtöyttimeen. Tämä kierto on hallitseva tähdillä, joiden massa on  $1.5M_{\odot}$  tai suurempi, sillä niiden sisus on tarpeeksi kuuma ja CNO-kierron reaktionopeus riippuu vahvemmin lämpötilasta kuin pp-ketjun [7]. On kuitenkin oletettavissa, että auringossakin tämä kierto on toiminnassa (noin 2% energiantuotannosta). CNO-kierrossa ydin joko ottaa yhden protonin tai  $\beta^+$ -hajoaa jokaisessa välivaiheessa. CNO-kierto alkaa  $^{12}\text{C}$ -isotoopista, ja jatkuu kunnes se saavuttaa  $^{15}\text{N}$ -ytimen, joka ottaa protonin ja  $\alpha$ -hajoaa palaten takaisin  $^{12}\text{C}$ -yttimeen, kaavan (6) mukaisesti.



Joissakin kirjallisuuksissa tätä ketjua kutsutaan CN-ketjuksi, mutta itse suosin nimitystä CNO-ketju, sillä onhan siinä myös happi mukana. Koska kierto päättyy samaan ytimeen kuin lähtikin, toimivat alkuaineet ainoastaan katalysaattoreina tälle energiatuotannolle, jonka lopputuloksena neljä protonia yhdistyy  $\alpha$ -hiukkaseksi ( $^4\text{He}$ -ydin), kahdeksi positroniksi sekä kahdeksi neutriinoksi.

Vaikka edellä mainittu kierto on pääkierto CNO-syklille on siinä sivuhaaroja, varsinkin kun aletaan tutkimaan reilusti raskaampia tähtiä kuin Aurinko. Auringossa tapahtuu yksi CNO sivuhaara, joka meitä kiinnostaa, sillä se tuottaa viimeisen ja pienimmän CNO-kierrossa syntyvän neutriinovuon,  $F$ -neutriinon.  $F$ -neutriino syntyy osana CNO-II-kiertoa. Tämä kierto on kuvattu kaavassa (7) ja se lähtee liikkeelle CNO-kierron sivuhaarasta, kun napatessaan protonin  $^{15}\text{N}$  ei  $\alpha$ -hajoakaan, vaan lähettää  $\gamma$ -säteen ja jääkin  $^{15}\text{O}$  josta lähtee myös CNO-II kiertona



Kun vertaamme reaktio kaavoja (6) ja (7) huomaamme että CNO-II on osittain sama CNO-I kierron kanssa.[8][3]

## Taulukko 2: CNO-ketju

Auringossa tapahtuva CNO-ketju ja sen tuottamien neutriinoiden energiat.

reaktio	$\nu$ energia (MeV)
$^{12}\text{C} + p \Rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$	
$^{13}\text{N} \Rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	$\leq 1.199$
$^{13}\text{C} + p \Rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$	
$^{14}\text{N} + p \Rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$	
$^{15}\text{O} \Rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$	$\leq 1.732$
$^{15}\text{N} + p \Rightarrow ^{12}\text{C} + \alpha$	

Auringossa on alueita joissa ei tapahdu CNO:n reaktiota loppuun liian matalan lämpötilan vuoksi, vaan silloin kiertäminen pysähtyy  $^{14}\text{N}$ -yttimeen. Tämä on havaittavissa  $N$ -neutriino- ja  $O$ -neutriinovoitteen pienenä erona (Taulukko 3).

### 4.3 Neutriinovuo

Neutriinovuotitiheyteen vaikuttaa kyseisen neutriinin synnyttämän reaktion todennäköisyys, ainemäärä, aineitiheys sekä hiukkasten nopeus. Tapahtuvien reaktioiden määrän aikayksikössä voi laskea yhtälöllä

$$R_{12} = \frac{n(1)n(2)}{(1 + \delta_{12})} \langle \sigma v \rangle_{12}, \quad (8)$$

missä  $n(1)$  ja  $n(2)$  on reaktiossa mukana olevien hiukkasten tiheydet ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $\sigma$  on vaikutusala eli reaktiotodennäköisyys ( $\text{cm}^2$ ),  $v$  on hiukkasten suhteellinen nopeus ja  $\delta_{12}$  on korjaustermi, jolla estetään ettei vastaavia hiukkasia lasketa kahteen kertaan.[3]

**Taulukko 3: Neutriinovuot (laskennalliset tiheydet)**

Lähde	Vuon tiheys ( $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
pp	6.0 ( $1 \pm 0.02$ )
pep	0.014 ( $1 \pm 0.05$ )
hep	$8 \times 10^{-7}$
${}^7\text{Be}$	0.47 ( $1 \pm 0.15$ )
${}^8\text{B}$	$5 \times 10^{-4}$ ( $1 \pm 0.37$ )
${}^{13}\text{N}$	0,06 ( $1 \pm 0.5$ )
${}^{15}\text{O}$	0.05 ( $1 \pm 0.58$ )
${}^{17}\text{F}$	$5.2 \times 10^{-4}$ ( $1 \pm 0.46$ )

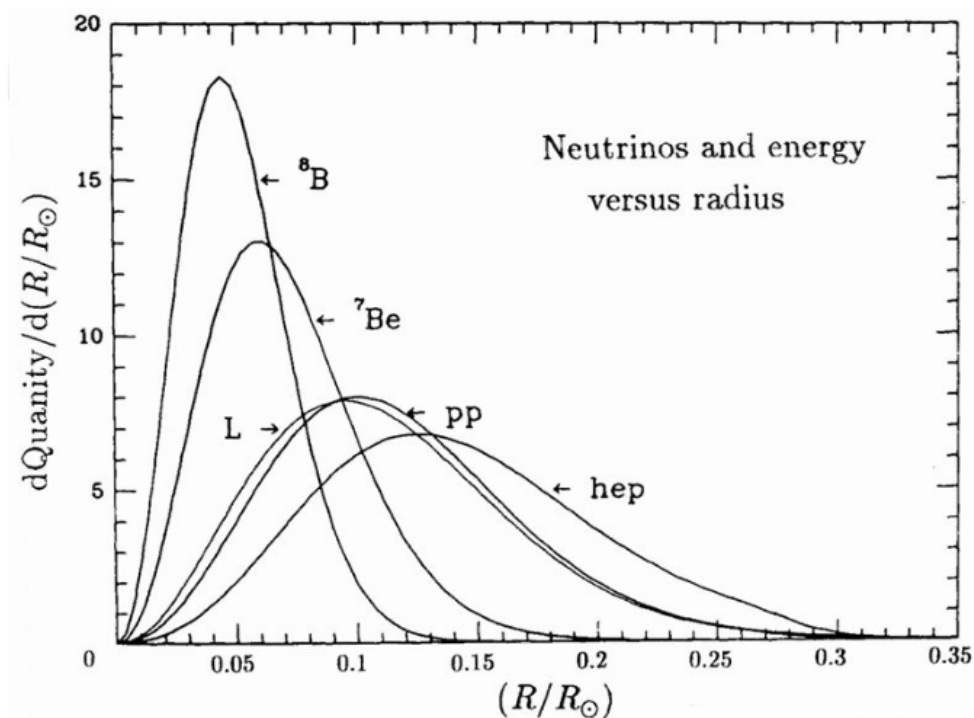
Kahden protonin fuusioitumiseen menee keskimäärin 10 miljardia vuotta auringon sisäisissä olosuhteissa. Kuitenkin havaitsemme Taulukosta (3), että pp-neutriinovuo on huomattavasti suurempi kuin minkään muun.[3] Tämä johtuu siitä, että aurinko koostuu noin 75% vedystä. pp-reaktio aloittaakin lähes poikkeuksetta pp-ketjun. Vain 0.4% pp-ketjun reaktioista tuottaa pep- neutriinon ja vain noin joka 50 000 reaktioketju tuottaa 2 pep-neutriinoa eikä yhtään pp-neutriinoa.

Deuteriumista  ${}^3\text{He}$  tapahtuu aina protonifuusion kautta.  ${}^3\text{He}$  reagoi 85 prosenttisesti toisen  ${}^3\text{He}$ -ytimen kanssa ja 15% tapauksissa  ${}^3\text{He}$  reagoi  ${}^4\text{He}$ -ytimen kanssa.  ${}^3\text{He}$ :n todennäköisyys reagoida toisen  ${}^3\text{He}$ -ytimen kanssa on näin ollen kuusi kertaa korkeampi kuin  ${}^4\text{He}$ -ytimen kanssa. Jälkimmäinen reaktio on tärkeä aurinkoneutriinoille, sillä sen ansiosta syntyy  ${}^7\text{Be}$ -ytimiä, jotka joko kaappaavat elektronin tai fuusioituvat protonin kanssa. On 1000 kertaa todennäköisempää, että  ${}^7\text{Be}$  kaappaa elektronin, kuin fuusioituu protonin kanssa. Fuusion kautta kuitenkin päästään tärkeään  ${}^8\text{B}$ -ytimeen, jonka  $\beta^+$ -hajoamisessa syntyy helposti havaittavia, korkeaenergisiä neutriinoja ( $< 15 \text{ MeV}$ ). Noin joka viides tuhannes pp-ketju päättyy tänne asti. Hep-reaktio on erittäin harvinainen.[3] Nämä selittävät osaltaan taulukossa (3) esiintyvien voitten tiheyksiä.

Auringossa oleva paine ja lämpötila nousevat mitä lähemmäksi keskustaa mennään. Tämä vaikuttaa reaktiotodennäköisyyksiin, jotka määräävät missä mikäkin reaktio on mahdollista. pp- neutriinovuo syntyy lähes samalla alueella kuin auringon luminositeetti. Huippu tuotto on kohdassa  $0.09R_{\odot}$ , jossa  $R_{\odot}$  on auringon säde. p-neutriinovuon ja luminositeetin puoliarvoveveyksien ero on vain  $0.01R_{\odot}$ . B-reaktiot tapahtuvat auringon sisimmissä osissa, alueella  $0.02\text{-}0.07R_{\odot}$ .

ja huippu  $0.05R_{\odot}$ , missä lämpötila on kyseiselle reaktiolle tarpeeksi korkea ( $T = 15 \times 10^6 K$ ). Be-reaktiot tapahtuvat näiden kahden välissä, huippu  $0.06R_{\odot}$  ja puoliarvoveveys  $0.03-0.10R_{\odot}$ . Hep-reaktio tapahtuu kaikkein laajimmalla alueella, puoliarvoveveys sijoittuu välille  $0.06-0.21R_{\odot}$  ja huippu  $0.13R_{\odot}$ . Suhteellisen suuren Coulumbin vallin ( $E_c$ ) vuoksi  ${}^3\text{He}$ -ydintä syntyy nopeammin kuin palaa, tuoden näin epätasapainon auringon ainemäärään.  ${}^3\text{He}$ -ytimen ainemäärän huippu on kohdassa  $0.27R_{\odot}$ . [3]

Voitten tiheydet ja radiaaliset jakaumat on esitetty taulukossa (3).



**Kuva 2: Neutriinon synty eri syvyydessä**

Kuvassa esitetään neutriinon synty eri syvyydellä, mukana oleva L on Luminositeetin syntyalue, joka on otettu kuvaan mukaan havainnollistamaan kuinka hyvin se mukailee pp-neutriinon syntyalueetta. Kuva 2 otettu kirjasta Neutrino astrophysics [2]

Kuvassa 2 on esitetty B-, Be-, pp-, hep-neutriinon synnyn radiaalinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty myös luminositeetin syntyalue, joka havainnollistaa kuinka hyvin pp-neutriinovuon syntyalue mukailee sitä.

Kun vertaamme reaktioketjuja lämpötilaan, havaitsemme B-reaktioiden tuot-

taman neutriinovuon kasvavan lämpötilan noustessa, kun taas, vastoin maalaisjärkeä, pp-reaktion neutriinovuoto pienenee. Tämä on selitettävissä  ${}^3\text{He}$ -ytimen käyttäytymisen kautta, sillä kun lämpötilaa nostetaan, kasvaa todennäköisyys reaktiolle  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  reaktion  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$  sijaan, joista ensimmäinen tuottaa ainoastaan yhden matalaenergisestä pp-neutriinon kun taas jälkimmäinen tuottaa kaksi. Ensimmäinen reaktio tuottaa Be-ytimen.[3]

## 5 Neutriinon havaitseminen

Neutriinoja ei voi havaita suoraan vaan niitä pitää tutkia niiden aiheuttamien reaktioiden kautta. Neutriinot vuorovaikuttavat vain heikon vuorovaikutuksen kautta muuhun aineeseen. Välittäjähiukkasina toimivat  $W^+$ -,  $W^-$ - ja  $Z$ -bosonit. Neutriinoja tutkitaan kolmella eri vuorovaikutuksella ydin- ja hiukkanenreaktioissa: varauksellinen vuorovaikutus (CC), neutraali vuorovaikutus (NC), elastinen sironta (ES), joissa käyttämällä eri aineita pystytään tutkimaan eri energiaalueen neutriinoja. Lisäksi neutriinottomalla kaksoisbeeta-hajoamisella, tuplabeta-hajoaminen (BB), saadaan tietoa neutriinoista.

Ympäri maailman löytyy neutriinotutkimuskeskuksia, jotka ansaitsisi mainitsemisen, Super-Kamiokande, GNO, Icecube jne, mutta jos käymme jokaisen koejärjestelyt läpi, tulisi tästä kirjallisuuskatsauksesta todellinen tiiliskivi. Kuitenkaan neutriinotutkimuksesta ei voi mielestäni puhua mainitsematta Homestaken kloorikoetta, sillä se oli pari vuosikymmentä ainoa neutriinotutkimuslaitos, jonka koejärjestely oli hämmästyttävän yksinkertaisesti pystytty toteuttamaan. Siis todellinen taidonnäyte. Myös Sudburyn neutriino observatorio (SNO) on mielestäni tärkeä mainita. Sekä Italian Gran Sassaossa sijaitseva Borexino, johon perehdymme hieman tarkemmin. Kaikki kolme koejärjestelyä on sijoitettu syvälle joko kaivokseen tai vuoren sisään. Sillä tavoin saadaan kosmisten säteiden aiheuttamia taustahäiriötä vähennettyä.

### 5.1 Varauksellinen vuorovaikutus

CC-reaktion välittäjähiukkasina toimivat  $W^+$ - ja  $W^-$ -bosonit. Tunnetuimpina CC-reaktioina ovat  $\beta^-$ -hajoamiset, missä neutroni muuttuu protoniksi. Tässä välittäjähiukkasena siis toimii  $W^-$ -bosoni. Tämän kautta on mielestäni helppo ymmärtää mihin CC havaitseminen perustuu, sillä siinä missä neutriino menee ytimeen, tulisi  $\beta^-$ -hajoamisessa antineutriino ulos. CC-reaktio tunnetaan myös nimellä käänteinen (neutroni)  $\beta^-$ -hajoaminen. Alla SNO:ssa käytetty reaktiokaava:



Koska Auringon neutriinon energia on pienempi kuin muon- ja tau-leptonien massa, ei tähän reaktioon osallistu muut kuin elektronin neutriino.

## 5.2 Neutraali vuorovaikutus

NC-reaktion välittäjänä toimii Z-bosoni, jolla ei ole varausta. SNO:ssa tämä reaktio rikkoo raskaan veden deutronin protoniksi ja neutroniksi. Neutroni voi reagoita raskaan veden kanssa, jonka seurauksena syntyy  $\gamma$ -säde (noin 6 MeV), joka pystytään havaitsemaan. Neutriino ei häviä prosessissa vaan se jatkaa matkaa hie-man pienemmällä energialla. Alla SNO:ssa käytetty reaktio,



jossa  $\nu$ :n alaindeksi  $x = \mu, \tau, e$  ilmaisee, että reaktion voi aiheuttaa mikä tahansa kolmesta neutriinon mausta.

## 5.3 Elastinen sironta

ES-reaktiossa neutriino töytäisee atomista elektronin, joka voidaan havaita esimerkiksi Cherenkov säteilynä. Alla SNO:ssa käytetty reaktio.[2]



johon voi osallistua kaikki neutriinon maut Z-bosonin välityksellä, mutta koska elektronin neutriino voi osallistua myös  $W^-$ -bosonin välityksellä, dominoi se tätä reaktiota.

## 5.4 Tuplabetahajoaminen

Tuplabetahajoaminen ei tutki aurinkoneutriinoja vaan sen avulla yritetään selvittää onko neutriino itsensä antineutriino, eli niin sanottu Majorana-hiukkanen. Tutkimus perustuu kaksoisbeta-hajoamiseen, jossa ydin hajoaa kahdella samanlaisella  $\beta$ -hajoamisella. Normaalissa kaksoisbeta-hajoamisessa tulee kaksi (anti-) neutriinoa ja kaksi elektronia. Mutta jos neutriino on Majorana-hiukkanen pitäisi olla niin kutsuttu neutriinoton kaksoisbeta-hajoaminen olla mahdollista, jossa ei neutriinoja syntyisi. Tätä reaktiota voisi käyttää myös neutriinon massan tarkentamiseen.

## 5.5 Homestaken kloorikoe

Kahden vuosikymmenen ajan Homestaten kloorikoe (Lead, Etelä Dakota, Yhdysvallat) oli ainoa neutriinovuota tutkiva koe. John Bahcallin laskuihin perustuvan koelaitteiston suunnitteli Raymond Davis, ja siinä käytettiin  $10^5$  gallonia ( $380 \text{ m}^3$ ) tetrakloorieteeniä ( $C_2Cl_4$ ). Valinta tehtiin aineen suuren klooripitoisuuden vuoksi. Se reagoi neutriinon kanssa kaavan



mukaisesti. Reaktioon vaadittu kynnsenergia on  $0.814 \text{ MeV}$ .

Muutaman kuukauden välein Davis kollegoineen erotteli argonin nestetankista kemiallisesti. Argonin määrä oli noin 15 atomia, kun taas koko nestetankissa oli luokkaa  $10^{30}$  atomia. Erottelu suoritettiin kuplittamalla tankki heliumilla. Argonin määrä oli huomattavan pieni, jopa 70 % pienempi kuin Bahcallin laskut ennustivat. Sekä koelaitteisto että Bahcallin laskut tarkistettiin moneen kertaan, vikaa löytämättä. Oli syntynyt ongelma, joka tunnetaan nimellä aurinkoneutriino-ongelma.[3]

Eräs aurinkoneutriino-ongelman ratkaisuksi esitetty teoria oli niin kutsuttu neutriinoskillaatio, jonka mukaan tietyillä parametreillä neutriino voi vaihtaa makuaan. Tämän teorian suurin ongelma oli se että se vaati neutriinoilla olevan massa, joita oltiin pidetty siihen asti massattomina hiukkasina.

## 5.6 Sudburyn neutriino observatorio

Raskaan veden ( $D_2O$ ) Cherenkov-säteilyyn perustuva neutriinoilmaisain. Ilmaisain havaitsee kaikki kolme vuorovaikutustapaa (CC, NC ja ES), jotka on yllä kuvattu. Pallon muotoinen, halkaisijaltaan 6 metrin akryllisäiliö on täynnä raskasta vettä, missä reaktioita valvoo 9 600 fotomonistinputkea. Säiliö on upotettu 22 metriä leveään ja 34 metriä syvään onkaloon, joka on täytetty vedellä ( $H_2O$ ). Radioaktiivinen tausta asetti havaitulle Cherenkov säteilylle kynnsrajan  $4 \text{ MeV}$ . Myös raskaan veden radioaktiivisen aineen saastumisaste on täytynyt olla erittäin alhainen, toriumilla (Th) alle  $3.5 \times 10^{-15} \text{ g/ml}$  ja uraanilla (U) alle  $2.7 \times 10^{-14} \text{ g/ml}$ . Tällä tavoin voitiin varmistaa että NC:n reaktio osuus havaittavasta datasta oli suuri.[9]

Kokeen pääasiallinen kohde oli  ${}^8\text{B}$  -neutriinot, joiden avulla saataisiin selville kuinka suuri osa neutriinoista olisi elektronineutriino, sillä *hep* neutriinovuon odotettiin olevan huomattavasti  ${}^8\text{B}$  vuotta alhaisempi. Mutta koska *hep* neutriino-

jen energia spektri ylittää  ${}^8B$  neutriinon energian huipun muutamalla MeV:llä, oli mahdollista laskea uusi alaraja *hep* neutriinovuolle.[9]

Tutkimus löysi kadonneet neutriinot, ja osoitti neutriino-oskillaation todeksi sekä näin todistaen neutriinoilla olevan massa.

## 5.7 Borexino

Borexino oli ensimmäinen tutkimuskeskus, joka mittasi matalaenergisii aurinkoneutriinoja ( $<3\text{MeV}$ ). Jotka ovat luonnollisten beta-hajoamisneutriinon ( ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$  ja  ${}^{238}\text{U}$ ) energioiden alapuolella. Borexino teki ensimmäiset  ${}^7\text{Be}$ ,  $\text{pep}$  ja  $\text{pp}$  neutriino havainnot ja alensi kynnyksen  ${}^8B$  neutriinoille. Tulokset ovat syventäneet auringon standardimallia ja tukevat MSW-LMA-oskillaatiomekanismia. Lisäksi Borexino on havainnut anti-geoneutriinoja ja on asettanut uuden ylärajan teoreettiselle aurinko-anti-neutriinovuolle.[1]

Laitteisto: Ohut läpinäkyvä nailonpallo, jonka halkaisija on 8.5 m, on täynnä tuikeainetta. Tuikeaine koostuu 1,2,4-trimedylibentseenistä (PC) johon on liuotettu PPO:ta (fluori). Neutriino havaitaan tuikeaineessa elastisen neutriino-elektronin (ES) reaktion kautta. Vapautuvan elektronin kineettinen energia muuttuu välittömästi fotoneiksi ( $\lambda = 400\text{nm}$ ), jotka havaitaan 2212 fotomonistinputkilla. Fotomonistinputket sijaitsee 13.7 m halkaisijaltaan ruostumattomasta teräksestä valmistetun pallon (SSS) pinnalla. Nailon- ja teräspallon välissä on 889 tonnia PC:tä, joka toimii suojana ulkoisilta gammasäteiltä ja neutroneilta. Suuremman nailonpallon (halkaisija 11.7 m) tarkoitus on suojata tuikeainetta radonilta ja muilta radioaktiivisilta ainejäämiltä jotka ovat saattaneet jäädä monistinputkiin ja ruostumattomaan teräkseen. Teräspallo on upotettu 2100 tonniin veteen, jossa Cherenkov-ilmaisimien on tarkoitus havaita kosmiset muonit.[1]

Borexinon koelaitteisto on huolella suunniteltu. Siinä on alusta asti pyritty huomioimaan pienetkin yksityiskohdat. Kaikki teräksisten pinnat, seinät, putket ja venttiilit ovat elektrolyytisesti kiillotetut. Nailonsäiliöt ovat pursottu puhdashuoneessa. Kaikki operaatiot on toimitettu joko puhdashuoneessa tai  $N_2/Ar$  tilassa. Fotomonistinputket on valmistettu lasista ja keramiikasta, joiden radioaktiivisten aineiden määrä on mahdollisimman pieni. Tuikeaineen PC plus PPO valinta johtuu sen korkeasta valontuotosta (50 kertainen Cherenkoviin verrattuna). PC:n valmistuksessa käytetty öljy on mahdollisimman vanhaa, jotta sen  ${}^{14}\text{C}$ , jota syntyy yläilmakehässä, pitoisuus on mahdollisimman alhainen. PC puhdistettiin poistamalla vesi, tislamalla, kuplittamalla  $N_2$  ja ultrasuodattamalla. Ultrasuodatus tehdään johtamalla liuos puoliläpäisevän kalvon läpi suurella paineella. Kuplituksessa käytetty tyyppi oli ennen käyttöä puhdistettu mahdollisimman hyvin  ${}^{222}\text{Rn}$ ,  ${}^{39}\text{Ar}$  ja  ${}^{85}\text{Kr}$  aineista hyödyntäen kryogeeniikkaa.[5]



## 6 Taustahäiriöt

Neutriinojen tutkimisen yksi haasteita lisäävä tekijä on tutkittavan kohteen ulkopuoliset neutriinot, joita ei voi sulkea millään pois. Ympäri maailmankaikkeutta tulee neutriinoita ja ne häiritsevät energia-alueestaan riippuvia tutkimuksia. Esimerkiksi tähden sisuksen romahtaminen eli supernova tuottaa suurenergisiä neutriinoja jotka tuottavat taustaa Hep- neutriinotutkimuksille. Tutkimuksia häiritsevät supernovaneutriinot ovat käytännössä kaikki linnunradalta, sillä ulkopuolisissa galakseissa syntyviä supernovaneutriinoja nykyiset laitteet pystyvät havaitsemaan keskimäärin alle 1 per supernova [2].

Myös maan sisuksista tulee neutriinoja. Näitä kutsutaan anti-geoneutriinoiksi, joiden pääasiallinen lähde on  $^{40}K$ :n,  $^{232}Th$ :n sekä  $^{238}U$ :n  $\beta^-$ -hajominen. Ilman sisältämä radon aiheuttaa myös taustaa, joka ilmeisesti kasvaa mentäessä maan alle, missä neutriinotutkimuksia pääasiassa tehdään.

Borexinon tapauksessa on erikseen huomioitava sen oma taustan aiheuttaja, sillä itse tuikeaine sisältää hiilen radioaktiivista isotooppia  $^{14}C$ .  $^{14}C$  syntyy kosmisten säteiden iskeytyessä yläilmakehään, jonka vaikutuksesta syntyy muun moassa neutroneja, jotka fuusioituvat  $^{14}N$  kanssa luoden  $^{14}C$  atomeja.  $^{14}C$  imeytyy kasveihin ja kasveista eläimiin. Kuoleman jälkeen niihin ei enää imeydy lisää  $^{14}C$ , joten pitoisuus alkaa pikku hiljaa hajoamaan. Tämän vuoksi PC:hen käytetyn öljyn halutaan olevan mahdollisimman vanhaa, jotta sen  $^{14}C$  pitoisuus olisi mahdollisimman alhaista.

## 7 Pohdinta

Tutkielmassa on keskitytty esittämään mitä neutriinot ovat ja mitä niistä tiedetään, jättäen niiden todistelut kaavojen muodossa pois. Tämä mielestäni selkeyttää tekstiä ja laajentaa lukijakunnan pois neutriinotutkijoista, vieden sen ymmärrettävälle tasolle kaikille asiasta kiinnostuneille joilla fysiikanopintoja on alla. Pyrkimyksenä oli yrittää tuoda myös asiaan perehtyneillekin uutta, avaamalla hieman tarkemmin neutriinon historiaa. Jos tässä tutkielmassa on yksikin ennestään tuntematon lause jokaiselle lukijalle, opiskelutasosta riippumatta, olen mielestäni onnistunut tavoitteessani hyvin. Jos ei muuta, niin ainakin kuva 1 on varmasti ennestään näkemätön, sillä sen on allekirjoittanut itse tehnyt.

## Viitteet

- [1] M. Agostini et al., *Seasonal Modulation of the 7 Be Solar Neutrino Rate in Borexino*, (2017).
- [2] B. Aharmim et al., *A Search for Neutrinos from the Solar hep Reaction and the Diffuse Supernova Neutrino Background with the Sudbury Neutrino Observatory*, *The Astrophysical Journal* **653** (2006), no. 2, 1545–1551.
- [3] John N Bahcall, *Neutrino astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989 (eng).
- [4] V Barger, Danny Marfatia, and Kerry Lewis Whisnant, *The Physics of Neutrinos*, Princeton University Press, Princeton, 2012 (English).
- [5] Gianpaolo Bellini, *The impact of Borexino on the solar and neutrino physics*, *Nuclear Physics B* **908** (2016), 178–198.
- [6] F E Close, *Neutrino*, OUP Oxford, Oxford, 2010 (English).
- [7] Hannu Karttunen, Heikki Oja, Karl Donner, Markku Poutanen, and Pekka Kröger, *Tähtitieteen Perusteet*, 5 ed., Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry, Helsinki, 2010.
- [8] Claus E. Rolfs and William S. Rodney, *Couldrons in the Cosmos*, The University of Chicago Press, London, Chicago, 1988.
- [9] SNO, *The Sudbury Neutrino Observatory Homepage*, (2011), no. June, 431–465.