

Het Tachyonische neutrino

J.L. van Amen

22 augustus 2012



?

=



Bachelorscriptie

Afdeling: Theoretische Hoge-Energiefysica

Begeleider: Wim Beenakker

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Het neutrino en de Zwitserse kaas	4
2.1	Een korte geschiedenis	4
2.2	Het probleem van de missende zonneneutrino's	4
2.3	Het Opera-experiment	5
2.4	Icarus-experiment	6
3	De speciale relativiteitstheorie	8
3.1	Lorentztransformaties en waarnemers	8
3.2	Energie en impuls	9
3.2.1	Consequenties	10
3.2.2	Negatieve energieën	11
3.2.3	Snelheden	12
3.3	Tijdreizen	13
4	Andere waarnemingen	16
4.1	Supernova 1987A	16
4.1.1	Mont-Blanc metingen	18
4.1.2	Kamiokande en Mont-Blanc detectoren	19
4.1.3	Gevolgen voor Cern	20
5	Conclusie	21

1 Inleiding

Het is intrinsiek aan de mensheid geweest om altijd zo snel en zo ver mogelijk te reizen. Nog voor het begrip kosmos bestond wilden mensen al naar de sterren reizen. Voordat men de begrenzing op snelheden wist, wilden mensen sneller dan geluid en licht naar andere planeten toe, met als droom deze te koloniseren. Deze menselijke interesse kreeg echter een flinke domper toen bleek dat er een absolute barrière was, de lichtsnelheid.

Tegenwoordig gelooft daarom ook niemand erin dat het mogelijk is om sneller dan het licht te reizen of sneller dan het licht informatie over te dragen. Het licht is niet in te halen en daarmee lijken we gebonden aan ons zonnestelsel.

Groot was dan ook het rumoer toen er in de Zwitserse bergen een barst in dit fundament kwam [1]. Bij Cern, in Genève, werd gemeten dat tijdens het Opera-experiment de neutrino's te vroeg aankwamen. Deze neutrino's kwamen eerder aan dan het licht, zodat ze sneller zouden moeten zijn dan het licht, hetgeen we aangeven met de term "tachyonisch". Een lawine aan media-aandacht, kritiek en conclusies kwam over de resultaten heen. Het zou een onzinnig resultaat zijn, we zouden opeens terug in de tijd kunnen reizen, ga zo maar door. Om in deze lawine van informatie inzicht te krijgen, zal ik in deze scriptie uitwijden wat de gevolgen zijn.

Daarbij wil ik in hoofdstuk 2 ingaan op wat een neutrino is, waarom het zo'n apart deeltje is en wat er in Genève nou precies waargenomen is. In hoofdstuk 3 wil ik daarna kijken of dit consequenties heeft voor de speciale relativiteitstheorie in zijn huidige vorm. Hoofdstuk 4 zal gaan over een specifieke supernova en hoe die wellicht binnen het plaatje van tachyonische neutrino's past.

2 Het neutrino en de Zwitserse kaas

Wat is het neutrino precies en waarom is het juist dit deeltje waarbij een vermoeden bestaat dat het wellicht sneller dan het licht zou kunnen zijn. Wat is er nu precies zo apart aan het neutrino. En wat is er, naast een hoop mediabuzz, nu echt gebeurd en gemeten in Genève.

2.1 Een korte geschiedenis

Het neutrino werd voor het eerst werkelijk overwogen door Wolfgang Pauli in het jaar 1930 [2]. Toen nog als een puur theoretisch deeltje, was het in het leven geroepen om het probleem van beta-verval op te lossen. In dit vervalsproces, in de oorspronkelijke waarneming, zag men een kern vervallen naar een andere kern met hetzelfde massa-getal, maar een andere lading, onder uitzending van een elektron. Tegenwoordig kan het probleem van toendertijd gerepresenteerd worden door de volgende vergelijking:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- \quad (1)$$

In dit proces leken er dingen te ontbreken. Er leek geen energiebehoud te gelden, geen impulsbehoud of impulsmomentbehoud. De makkelijkste manier om dit op te lossen was het invoeren van een deeltje, dat Pauli toendertijd neutron noemde. Dit zou een neutraal deeltje zijn dat in de kern zou moeten zitten¹. Nadat deze naam voor een andere deeltje gebruikt werd, postuleerde Enrico Fermi in 1933 het neutrino². Dit deeltje zou massaloos zijn en precies de juiste eigenschappen hebben. Het gepostuleerde deeltje werd in 1956 waargenomen door Cowan, Reines, Harrison, Kruse en McGuire. Oorspronkelijk werd er maar van één neutrino uitgegaan, maar later bleken er nog twee andere neutrino's te bestaan. Naast het oorspronkelijke elektron-neutrino (ν_e) zijn dat het muon-neutrino (ν_μ) en het tau-neutrino (ν_τ). Ook van deze werd in eerste instantie aangenomen dat ze massaloos waren.

2.2 Het probleem van de missende zonneneutrino's

Toch waren er met dit massaloze neutrinomodel een aantal problemen. Het aantal van de zon afkomstige elektron-neutrino's dat gedetecteerd werd was maar de helft tot een derde van het aantal elektron-neutrino's dat door het standaard zonnemodel voorspeld werd. Aangezien men in die tijd dacht dat neutrino's massaloos waren en met de lichtsnelheid gingen³ werd snel verondersteld dat het zonnemodel niet klopte. Dit leidde tot veel vruchtenloze pogingen om een nieuw model op te zetten om het juiste aantal neutrino's te kunnen voorspellen. Dit bleef zo totdat laat in de jaren 70 voorgesteld werd dat neutrino's een massa zouden hebben. Ongelijke neutrinomassa's maken namelijk oscillaties tussen de verschillende toestanden mogelijk. Het verschijnsel van oscillaties is ondertussen meerdere malen bevestigd, maar naar de precieze neutrinomassa's wordt nog steeds gezocht. Omdat een neutrino praktisch met de lichtsnelheid gaat zijn er alleen bovengrenzen bekend voor de massa, maar is er nog geen bevredigend

¹Men ging er toen nog van uit dat alle deeltjes in de kern op een hoop zaten, en neutronen n_0 waren nog niet bekend

²Italiaans voor klein neutron

³Wat ze praktisch gezien ook doen

antwoord op wat de massa precies is en of de neutrino's wel echt langzamer gaan dan de lichtsnelheid. Wel zijn vanwege de oscillaties de massa-kwadraat verschillen bekend.

2.3 Het Opera-experiment

Het Opera-experiment is een collaboratie van het Cern onderzoekscentrum in Genève samen met het Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Gran Sasso [1]. Het is opgezet om goed de oscillaties van muon-neutrino's naar tau-neutrino's te kunnen meten. Dit wordt gedaan door in Genève koolstof te bombarderen met protonen. Hierdoor ontstaan pionen en kaonen, die vervallen in muonen en de daarbij horende neutrino's. De bundeleigenschappen van de neutrino's worden gemeten aan de hand van de overige vervalsproducten. De neutrino's reizen daarna als bundel door naar Gran Sasso, 730 kilometer verderop. Daar worden ze waargenomen en wordt ook gedetecteerd over welk type neutrino het gaat. In de jaren 2009 tot 2011 heeft men bij het Opera-experiment veel data over het oscillatieproces van $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ vergaard. Men bedacht zich later dat deze data ook kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de tijd die de neutrino's er over doen om de afstand tussen de laboratoria af te leggen. Hierbij verwachtte men dat de afwijking van de lichtsnelheid, bij de gebruikte energie van 17 GeV, klein zou zijn. Zelfs met een massa van 2 eV voor het zwaarste neutrino verwachtte men als bovengrens:

$$\frac{|v - c|}{c} < 10^{-19} \quad (2)$$

hetgeen ver beneden de meetnauwkeurigheid van de meetapparatuur valt. Voor muon-neutrino's met een maximale energie van 3 GeV was in een eerder experiment [3] gevonden dat:

$$\frac{v - c}{c} < (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5} \quad (3)$$

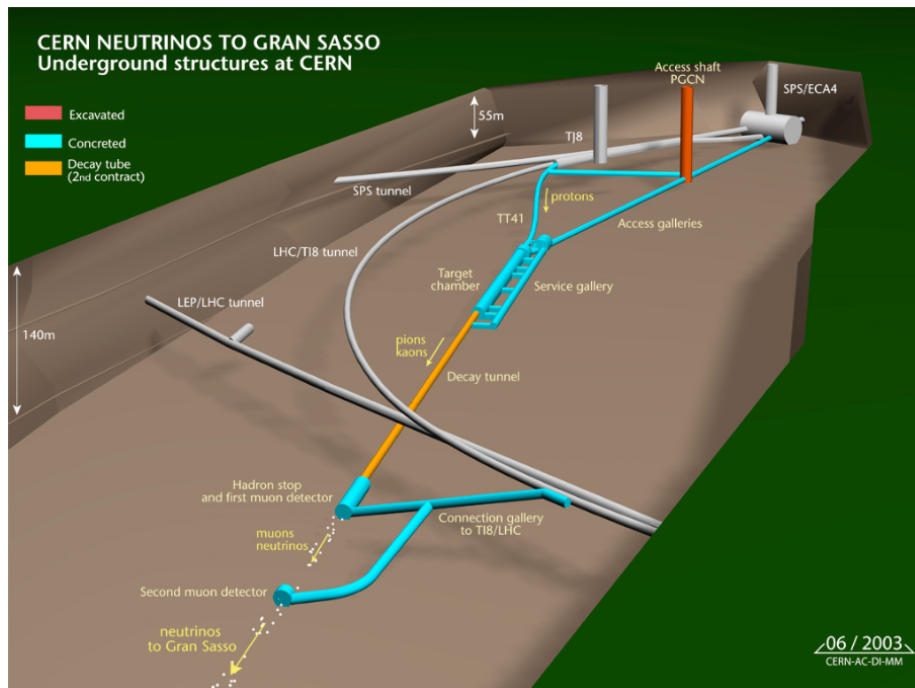
Wat tot hun verbazing uiteindelijk gevonden werd bij Opera op 22 september 2011, was een snelheid van de neutrino's die significant afweek van de lichtsnelheid:

$$\frac{v - c}{c} = \left(2.37 \pm 0.32 \text{ (stat)}_{-0.24}^{+0.34} \text{ (sys)} \right) \times 10^{-5} \quad (4)$$

Dat houdt in dat de neutrino's uiteindelijk eerder aankwamen dan het licht zou doen, namelijk

$$\delta t = 57.8 \pm 7.8_{-5.9}^{+8.3} \text{ ns} \quad (5)$$

eerder.



Dit was een statistisch significante afwijking, waaruit geconcludeerd kon worden dat $v > c$ voor de neutrino's. In de hele wereld was verbazing: "Zat Einstein eraast?" Het algemene gevoel was dat dit niet mogelijk was, dat dit resultaat nagekeken zou moeten worden. Vanuit Cern werd dan ook aan andere instituten gevraagd of ze deze resultaten konden controleren. Zelf gingen ze ook de experimentele opstelling nalopen.

Op 23 februari werd er van mogelijke problemen melding gemaakt. Ten eerste was er een te trage oscillator die gebruikt werd om de tijdstempels van de gps goed te laten verlopen. Dit betekende dat de snelheid eigenlijk onderschat werd en dat de echte snelheid hoger was. Het tweede effect was echter een loszittende of niet goed functionerende optische kabel. De kabel zou het gps-signaal naar de klok moeten brengen. Dit had juist een versnellend effect, zodat de mogelijkheid bestond dat de deeltjes hierdoor 50 nanoseconden eerder leken aan te komen dan feitelijk het geval was. Hoe de compensatie van de twee effecten uit zal pakken wordt in het voorjaar opnieuw in kaart gebracht.

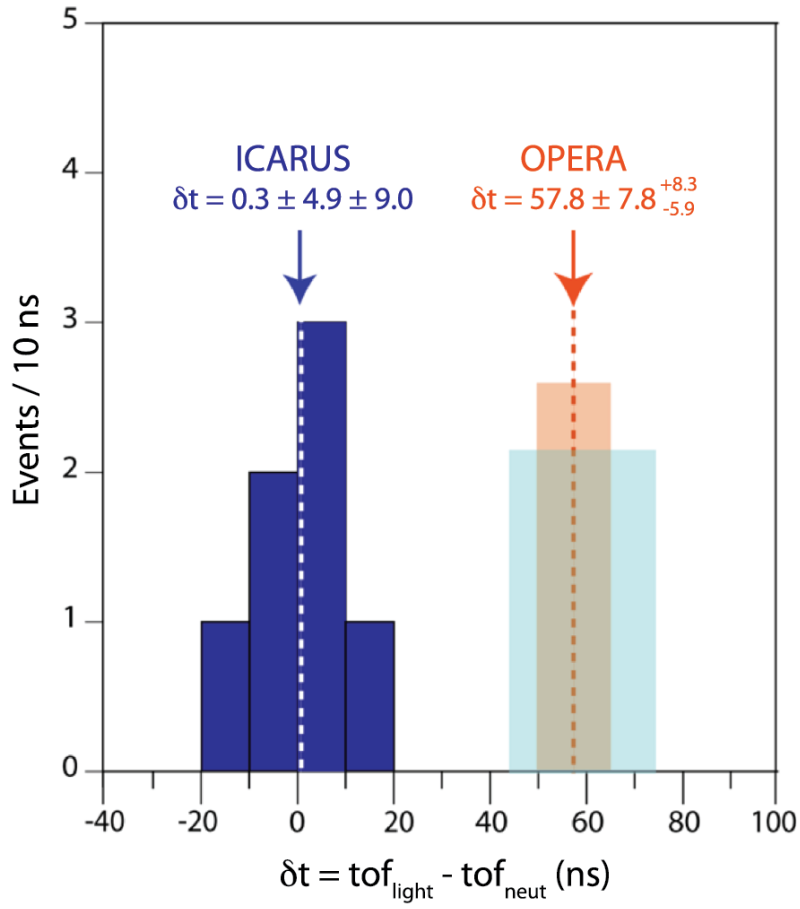
2.4 Icarus-experiment

Naar aanleiding van alle commotie is ook aan enkele onderzoeksinstituten gevraagd om dit verassende resultaat te controleren. Een van de eerste resultaten kwam op 15 maart van het Icarus-experiment, gevestigd in Italië [4]. Deze groep onderzoekt hetzelfde type neutrino's van dezelfde beam als Opera, maar via een ander detectiemechanisme. Aan het eind van 2011 liep de beam op een lage intensiteit. Hierdoor waren er veel minder events en werd het mogelijk per event te meten. Het Icarus-experiment lag op dat moment niet stil en heeft deze data gebruikt om na te meten hoeveel te snel de neutrino's waren. Daarbij kwamen

zij op een afwijking van:

$$\delta t = 0.3 \pm 4.9 \pm 9.0 \text{ ns}, \quad (6)$$

ofwel een niet significante afwijking van de lichtsnelheid, vooral als men kijkt naar afbeelding 1. Hierdoor is het resultaat van Opera onzeker geworden. Een herhaling van het Opera-experiment zal duidelijkheid moeten scheppen



Figuur 1: Het resultaat van Icarus tegen dat van Opera

3 De speciale relativiteitstheorie

De speciale relativiteitstheorie is een geteste theorie, die tot de dag van vandaag de tand des tijds goed doorstaat. Daarom is het een minimumvereiste voor een nieuw type deeltje dat deze in ieder geval niet in tegenspraak is met de speciale relativiteitstheorie. Voor een tachyonisch deeltje, moeten we daarom kijken aan welke eisen het moet voldoen.

3.1 Lorentztransformaties en waarnemers

De eerste stap is te kijken naar de lorentztransformaties. Einstein postuleerde ooit twee voorwaarden, waaraan alle inertiaalstelsels moeten voldoen⁴:

- de natuurwetten zijn hetzelfde in alle inertiaalstelsels,
- de lichtsnelheid is hetzelfde in alle inertiaalstelsels

Het eerste betekende dat een overgang van inertiaalstelsel O naar O' correspondeert met een lineaire coördinatentransformatie. Dit leidde samen met de tweede voorwaarde tot de lorentztransformaties. Als O' met snelheid V in de x -richting beweegt ten opzichte van O en als op tijdstip $t = 0$ de oorsprongen van O en O' samenvallen, dan wordt deze lorentztransformatie gegeven door:

- $x' = \gamma x - \beta \gamma ct$
- $y' = y$
- $z' = z$
- $ct' = \gamma ct - \beta \gamma x$

Met:

$$\beta = \frac{V}{c} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (8)$$

Hierbij zijn x, y, z, t en x', y', z', t' de plaats en tijdcoördinaten in inertiaalstelsels O respectievelijk O' . De eerste vraag is nu of deze transformaties ook gelden voor tachyonen of dat hier andere transformaties van toepassing zijn. Is er misschien zoiets als een tachyonische waarnemer mogelijk binnen de speciale relativiteitstheorie? Het begrip van een tachyonisch deeltje staat voor het feit dat voor elke waarnemer het deeltje sneller zou moeten gaan dan de lichtsnelheid, in elk mogelijk inertiaalstelsel. Een tachyonische waarnemer zou suggereren dat er een inertiaalstelsel is waarnaar je kan transformeren, dusdanig dat je in het ruststelsel van het tachyon zit. Maar in het ruststelsel van een tachyon zitten betekent juist dat het deeltje geen tachyon is. Deze transformatie zou je namelijk over een cruciale grens heenvoeren, die van de lichtsnelheid, en haalt juist het tachyonisch aspect eruit. Er is dus, net zoals bij het foton, geen ruststelsel waarin we op de positie van het deeltje kunnen zitten. Om die reden is er ook

⁴Referentiestelsels waarbinnen deeltjes die geen kracht ondervinden eenparig langs een rechte wereldlijn bewegen worden inertiaalstelsels genoemd

weinig te zeggen over de fysica vanuit het perspectief van het tachyon en is er enkel over de waarneming door een niet tachyonische waarnemer te spreken. De enige manier om uitspraken te doen is via een normale waarnemer en zijn observaties.

3.2 Energie en impuls

Omdat voor tachyonische deeltjes vanuit de optiek van een normale waarnemer de normale spelregels gelden, betekent dit dat we ook weten hoe energie, impuls, plaats en tijd zich verhouden. Ten eerste is er de normale plaats viervector, gedefinieerd als:

$$x^\mu = \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Het inproduct van deze viervector met zichzelf is het kwadraat van de invariante lengte, de lengte die constant blijft onder coördinatentransformaties. Dit inproduct is:

$$s^2 = g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (10)$$

Nu weten we van een tachyon dat de ruimtelijke afgelegde weg groter moet zijn dan de afstand ct . Dit maakt het ruimtelijke deel groter dan het tijdgedeelte van het inproduct, dat wil zeggen $s^2 < 0$. Hierdoor is voor een tachyon de werkelijke invariante lengte een imaginair getal. Dit manifesteert zich ook in de waarneming, tachyonen kunnen net zoals fotonen slechts waargenomen worden door middel van interactie met normale materie, omdat ze zich vanwege de snelheid feitelijk voorbij onze waarnemingshorizon bevinden. Beide typen deeltjes zijn immers niet door middel van een lorentztransformatie stil te zetten.

De beweging (wereldlijn) van het deeltje op een bepaald tijdsinterval is Lorentzinvariant te parametriseren aan de hand van de afgelegde invariante lengte. Een deeltje met snelheid \vec{v} ten opzichte van een waarnemer, legt in een infinitesimale tijdsspanne dt een infinitesimale invariante lengte

$$ds = \sqrt{c^2 dt^2 - \vec{v}^2 dt^2} = c dt \sqrt{1 - \frac{\vec{v}^2}{c^2}} = \frac{c dt}{\gamma} \quad (11)$$

af. Dit leidt tot de invariante impuls-viervector:

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \equiv mc \begin{pmatrix} d(ct)/ds \\ dx/ds \\ dy/ds \\ dz/ds \end{pmatrix} = m\gamma \frac{dx^\mu}{dt} \quad (12)$$

Deze viervector heeft als energiecomponent $E = \gamma mc^2$ en als impulscomponent zien we dat geldt $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$. Bij beiden gebeuren nu wonderlijke dingen. In de eerste plaats staan er in beide vergelijkingen imaginaire getallen, gezien het feit dat voor een deeltjesnelheid groter dan c de factor γ complex wordt. Maar een complexe energie en complexe impuls zijn natuurlijk niet fysisch en ook niet fysisch te krijgen, we meten uiteindelijk altijd reële energiën en reële impulsen.

De enige oplossing hiervoor is om aan te nemen dat de massa van het tachyonisch

deeltje een imaginaire waarde heeft. Alhoewel dit in eerste instantie onlogisch lijkt, is het goed om te beseffen dat deze massa geen direct waarneembare parameter is. Een tachyon is niet te vragen om netjes op de weegschaal te gaan staan. Elke waarnemer gaat uiteindelijk trager dan de lichtsnelheid in zijn eigen inertiaalstel en neemt de massa daardoor gewoon waar via een reële energie en impuls.

3.2.1 Consequenties

Natuurlijk wordt het fysisch gedrag van een tachyon uiteindelijk wel anders, door het gegeven van een imaginaire massa en een snelheid die groter is dan de lichtsnelheid. Als we kijken naar de tachyonische impulsformule in absolute vorm:

$$p = |\vec{p}| = |\gamma m \vec{v}| = \frac{|m|v}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}} \quad \text{met} \quad v = |\vec{v}| \quad (13)$$

dan zien we dat het gedrag van de impuls heel anders is dan we gewend zijn (zie figuur 2). De impuls gaat richting oneindig als de snelheid vertraagt naar de lichtsnelheid. Beter gezegd lijkt het alsof een oneindige impuls nodig is om tot de lichtsnelheid te vertragen.

Als we deze uitdrukking naar v differentiëren en gelijk stellen aan nul om een minimum te zoeken, zien we:

$$\frac{c^2|m|}{(c^2 - v^2)\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}} = 0 \quad (14)$$

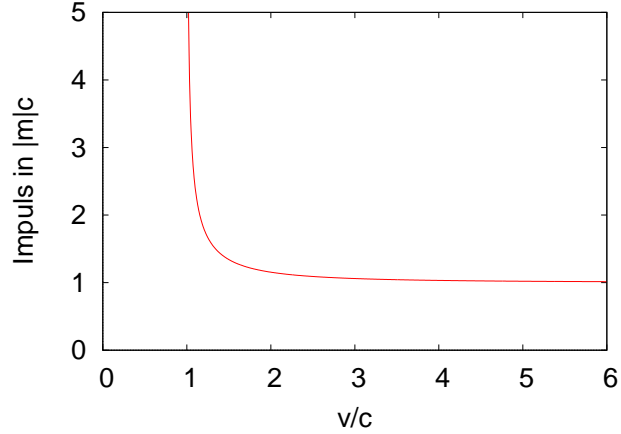
Deze uitdrukking wordt enkel en alleen nul als de snelheid v naar oneindig gaat. Maar als we kijken naar de impulsformule (13), dan zien we dat deze in de limietwaarde van v naar oneindig niet naar nul toe gaat, maar naar een limietwaarde van $|m|c$.

Beter gezegd bestaat er dus geen stelsel waarin de impuls van het tachyon nul is. De minimumimpuls noemen we voor het gemak p_0 .

Als we na het verhaal over de impuls kijken naar wat de energieformule ons vertelt:

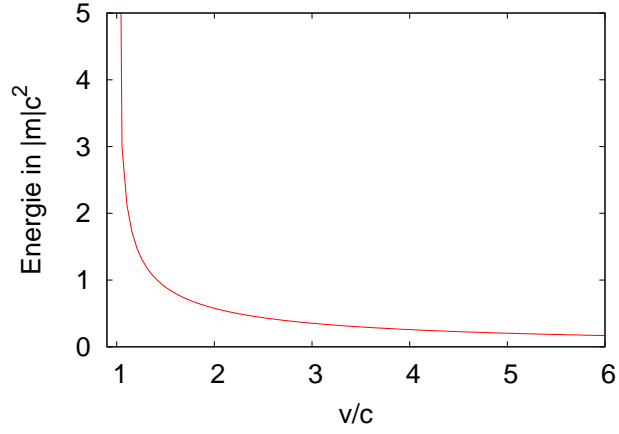
$$|E| = |mc^2\gamma| = \left| \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right| = \frac{|m|c^2}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}} \quad (15)$$

dan zien we iets anders.



Figuur 2: tachyonische impuls als functie van de snelheid

Zo is er voor de energie van een tachyon in de eerste plaats ook een barrière. Bij een snelheid die richting de lichtsnelheid gaat, gaat de energie naar oneindig. Aan de andere kant, als de snelheid oneindig groot wordt, gaat de energie naar nul. De energie van een deeltje kan, afhankelijk van het inertiaalstelsel, wel nul zijn in tegenstelling tot de impuls. Dit alles laat zien dat het voor een tachyonisch deeltje inderdaad niet mogelijk is om te vertragen naar een snelheid die lager is dan de lichtsnelheid, aangezien er een oneindige hoeveelheid energie nodig is om tot de lichtsnelheid te vertragen.



Figuur 3: tachyonische energie als functie van de snelheid

3.2.2 Negatieve energieën

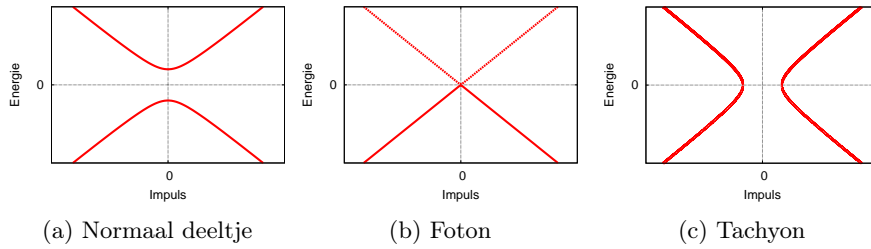
Natuurlijk is er ook nog de relatie tussen energie en impuls:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (16)$$

Gezien het feit dat onze massa imaginair is, kunnen we de vergelijking ook in een andere vorm schrijven:

$$E^2 = p^2 c^2 - |m|^2 c^2 \quad (17)$$

In onderstaande plots is te zien wat de verschillen zijn:



Figuur 4: Impuls-energie relaties

Als we de tachyonische grafiek vergelijken met die van deeltjes die trager dan de lichtsnelheid gaan dan zien we iets apart. Bij normale massieve deeltjes blijven de negatieve en positieve energieconfiguraties gescheiden. Bij fotonen of andere deeltjes die met de lichtsnelheid gaan, is dit ook nog net zo. Maar bij tachyonen kan een deeltje in de eerste plaats een totale energie van nul bereiken.

Nog aparter is dat het deeltje via dezelfde curve een negatieve energieconfiguratie kan bereiken. Dit is problematisch, omdat dit suggereert dat deeltjes vrijelijk over kunnen gaan naar een negatieve energieconfiguratie in een ander inertiaalstelsel. Het deeltje lijkt zich dan opeens als anti-deeltje te gedragen en vice versa, terwijl deze domeinen normaal strikt gescheiden zijn. Als we nu kijken naar de definitie van de energie en impuls:

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = m\gamma \frac{dx^\mu}{dt} \quad (18)$$

dan kunnen we hiermee wellicht een uitspraak doen over de betekenis van een negatieve energie. Als het gaat om vrije deeltjes nemen wij altijd een positieve energie en een positieve tijdsvoortgang waar. Nu weten we dat de energie-component van de impulsviervector de component is die koppelt aan de tijd. Om een negatieve energie te krijgen moet het dus wel zo zijn dat de afgeleide van de tijdscomponent langs de wereldlijn van het deeltje negatief is. Dit zou suggereren dat de tijdsafgeleide negatief is, dat wil zeggen dat een negatieve energie correspondeert met een terug in de tijd reizend deeltje. De waarnemer, die een positieve tijdsvoortgang waarneemt en deeltjes als positieve energiekwanta ziet, ziet dus het spiegelbeeld hiervan. Deze neemt een deeltje waar dat het omgekeerde traject aflegt, maar met een positieve energie. Beter gezegd hangt het van het inertiaalstelsel af hoe deeltjespropagatie wordt waargenomen.

Verder, als we naar de energie is nul toestand kijken, zien we in vergelijking (16) iets bijzonders gebeuren. Namelijk om een waarneming te doen voor een deeltje met energie nul, moet gelden dat:

$$p^2 c^2 = -m^2 c^4 \quad (19)$$

Voor tachyonen heeft deze vergelijking een oplossing, omdat $m^2 = -|m|^2$. Er is geen minimumenergie zoals bij een normaal deeltje, maar een minimale impuls (zie figuur 2).

3.2.3 Snelheden

Dan rest in feite enkel nog de vraag hoe het dan zit met de tachyonische snelheden voor verschillende waarnemers. Wat gebeurt er als je een tachyon achterna reist? Inhalen zul je het niet, maar hoe verandert de waargenomen snelheid?

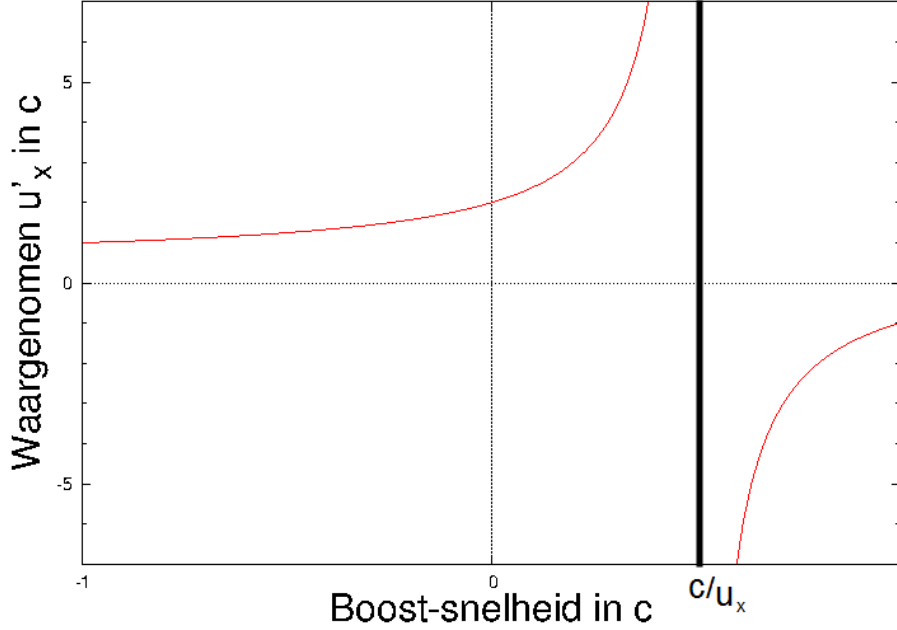
Beschouw een waarnemer in een inertiaalstel O en een tachyon dat zich met een snelheid \vec{u} ten opzichte van deze waarnemer voortbeweegt. Een tweede waarnemer bevindt zich in het inertiaalstelsel O' dat met een snelheid V in de x -richting beweegt ten opzichte van O . Voor de tweede waarnemer die in de x -richting reist heeft het tachyon de snelheid:

$$u'_x = \frac{u_x - V}{1 - \frac{Vu_x}{c^2}} \quad (20)$$

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma \left(1 - \frac{Vu_x}{c^2}\right)} \quad (21)$$

$$u'_z = \frac{u_z}{\gamma \left(1 - \frac{V u_x}{c^2}\right)} \quad (22)$$

Als we voor het gemak nemen dat $u_y = u_z = 0$, dan is de waargenomen snelheid u'_x als volgt grafisch weer te geven:



Figuur 5: Tachyonische snelheden voor verschillende waarnemers

In de eerste plaats is te zien dat voor een boost tegen de bewegingsrichting van het tachyon in, het tachyon vertraagt ten opzichte van de tweede waarnemer. Desondanks kan dit voor de tweede waarnemer geen reden zijn om toch maar achter het tachyon aan te gaan. Bij een boost in de bewegingsrichting van het tachyon, loopt de snelheid van het tachyon namelijk op. Dit zet zich voort totdat bij $\frac{V}{c} = \frac{c}{u_x}$ een asymptoot wordt bereikt en de snelheid van het tachyon van $+\infty$ naar $-\infty$ omslaat. De waargenomen bewegingsrichting klappt dus om op het moment dat $|u'_x|$ oneindig groot wordt en dus de energie verdwijnt. De omklap van de waargenomen bewegingsrichting van het tachyon valt samen met de omklap van de energie van het tachyon. Dit komt keurig overeen met de interpretatie van negatieve energieconfiguraties die in §3.2.2 is gegeven.

3.3 Tijdreizen

Nu roept het voorgaande waarschijnlijk al de vraag op: als een deeltje voor een waarnemer terug in de tijd reist, is het dan via tachyonische signalen mogelijk om een boodschap terug te laten gaan in de tijd? Daarvoor wil ik graag de volgende paradox voorleggen [5].

We nemen twee personen, Alice en Bob. Alice reist in een ruimteschip weg van de aarde in de positieve x-richting met een snelheid v en ze wil graag communiceren met haar vriendje Bob, die thuis achtergebleven is. Laten we er van

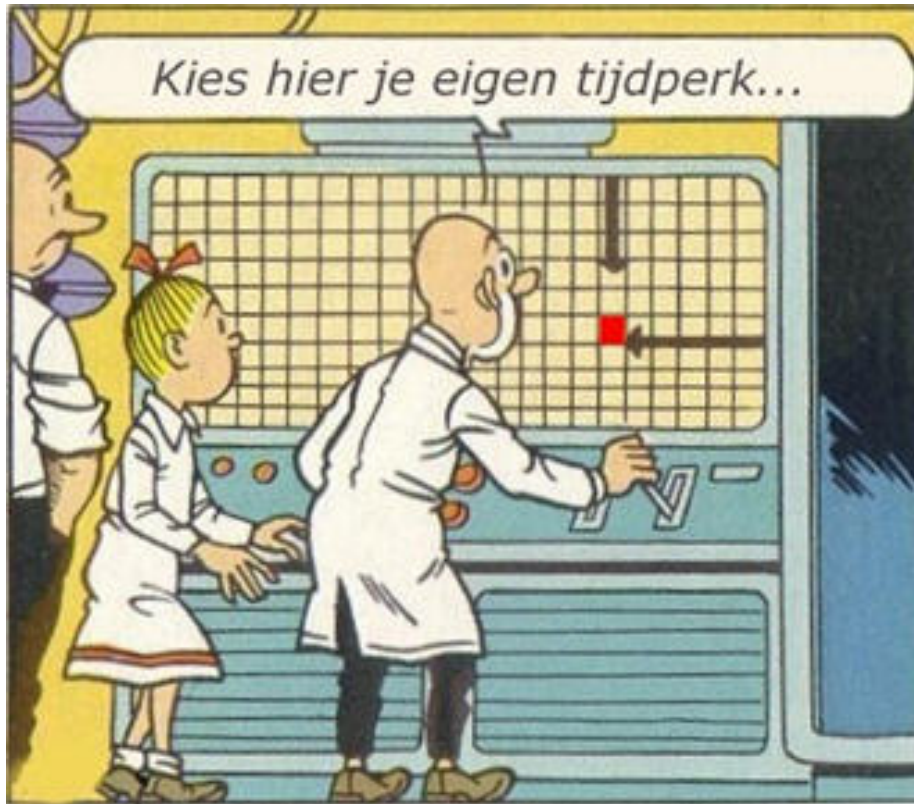
uitgaan dat ze allebei een tachyonische verzender hebben, die in staat is signalen met een snelheid groter dan die van de lichtsnelheid te versturen en te ontvangen. Alice gebruikt dit om een signaal te verzenden met een snelheid $a'c$ in de negatieve x-richting, waarbij $a' > 1$. Bij ontvangst stuurt Bob, die een goede typecursus gevolgd heeft, instantaan een signaal terug met snelheid ac in de positieve x-richting, waarbij opnieuw $a > 1$. Op het moment dat het signaal van Alice bij Bob aan zou komen, definiëren we de afstand tussen de twee als de lengte L . De oorsprong van beide inertiaalstelsels ligt op de locatie van Bob, waarbij we Bob's inertiaalstelsel definiëren als O en het inertiaalstelsel van Alice als O' . Hiermee kunnen we kijken met welke snelheid Alice het teruggaand signaal van Bob waarneemt. Gebruik makend van formule (20), weten we dat het signaal in het inertiaalstelsel van Alice een snelheid

$$v' = \frac{ac - v}{1 - \frac{va}{c}} \quad (23)$$

heeft. Dat betekent dat in het frame van Alice het signaal er schijnbaar $\frac{L}{a'c}$ over doet om bij Bob te arriveren en dat het $\frac{L}{c} \left(\frac{c-av}{ac-v} \right)$ tijd nodig heeft om terug te komen. Dat betekent dat de totale tijd Δt dat het signaal er over doet, op te schrijven is als:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{a'} + \frac{c-av}{ac-v} \right) \quad (24)$$

Nu is snel te zien dat dit mis gaat: a en a' hebben beiden geen bovengrens en hierdoor wordt bij grote waarden de totale tijdsduur negatief. Beter gezegd betekent dit dat het signaal terug reist in de tijd. Het signaal draagt hiermee informatie over aan het verleden. Dit heeft enorme consequenties: dit zou causaliteit compleet schenden. Zelfs in het geval dat beide tachyonische verzenders een zelfde maximumsnelheid ingebouwd zouden hebben, gaat het nog mis voor het geval dat $v > \frac{2ac}{1+a^2}$, of zoals professor Barabas het zou zeggen:

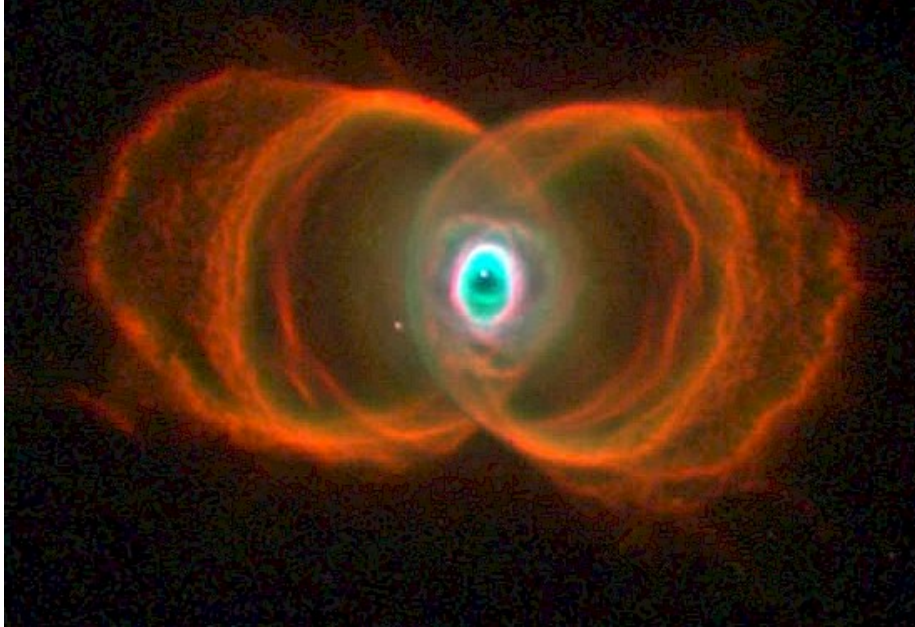


Echter, dit klopt niet helemaal. Als we namelijk terugkijken naar het verhaal bij sectie (3.2.3), zien we dat als het product van de snelheden te hoog is, voor de waarnemer de snelheid omklapt en deze dus een deeltje van hem ziet vertrekken. Hiermee rekening houdend kan je dus zeggen dat voor het eerste signaal, dat van Alice naar Bob gaat, dit wellicht van belang kan zijn. Op het moment dat Bob een deeltje zou observeren met een omgeklapte snelheid, zou dit betekenen dat hij het deeltje feitelijk niet zit arriveren, er lijkt hooguit een deeltje door zijn apparatuur verstuurd te worden (als hij dat al kan waarnemen). Daarmee is voor hem niet te bepalen of er een signaal naar hem verstuurd is. Als we dit meenemen in vergelijking (24), dan weten we dat voor het aankomend signaal de beperking $a'v < c$ geldt, zodat:

$$T = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{a'} + \frac{c - av}{ac - v} \right) > \frac{L}{c} \left(\frac{v}{c} + \frac{c - av}{ac - v} \right) = \frac{L}{c} \left(\frac{c - v^2/c}{ac - v} \right) > 0 \quad (25)$$

We zien dat de minimale tijd die dat signaal er over doet om heen en terug te gaan altijd positief zal zijn. Dit betekent dat als Alice een signaal naar Bob krijgt op een manier zodat Bob dit ook als signaal waarneemt, dit geen causaliteitsschending oplevert. Bij een hogere snelheid van het signaal richting Bob neemt Bob geen signaal waar, hij ziet hooguit bij hemzelf slechts een botsing ontstaan waarna een onbekend deeltje met onbekende eigenschappen zich van hem verwijdt. Hij weet daardoor niet dat dit feitelijk een signaal was van Alice, waardoor hij geen bericht terug zal kunnen sturen. Hierdoor kan hij niet terug in de tijd gaan communiceren. Daarmee is de paradox opgelost.

4 Andere waarnemingen



Nu moeten we ons afvragen of er buiten Cern meer aanwijzingen zijn voor tachyonische manifestaties van deeltjes dan enkel in Cern, en dan voornamelijk bij de kandidaat hiervoor, de neutrino's. We kunnen bijvoorbeeld gaan kijken naar astronomische waarnemingen, want in het heelal komen veel neutrino's voor met hoge energieën, afkomstig van astrofysische processen. Een mooie kandidaat om te bekijken is een Supernova. Deze genereert namelijk veel hoog energetische neutrino's, die vaak enkele uren aankomen voor het licht dat doet. Tot dusver is altijd aangenomen dat dit het gevolg was van vertraging van het licht in het supernovamedium en dat neutrino's veel minder vertraagd worden. Maar wat als dit nu niet het geval was, als de neutrino's gewoon sneller dan het licht zijn geweest.

4.1 Supernova 1987A

In 1987 werd om 23.443 universal time de eerste heldere vlek waargenomen van een supernova aan de sterrenhemel [6] [7], op een afstand van 167.885 lichtjaar. De foto waarop dit zichtbaar was, werd gemaakt door R.M McNaught, die op dat moment dienst had. Na enkele andere waarnemingen werd officieel vastgesteld dat het om een supernova ging. Wat hierna volgde was een stortvloed aan data en werk voor de astrofysici, want deze supernova presenteerde een kans als geen ander.

Zo werden er enkele uren voor de optische supernova-observatie buitengewoon veel neutrino-events waargenomen, elk event met een hogere energie dan de achtergrondstraling: 3 uur, 2 minuten en 52 seconden voor de eerste optische

observatie kwam een neutrino-burst binnen in Kamiokande II en IMB, zie tabel 1 voor de Kamiokande II data. Omdat deze burst zo significant boven de achtergrondruis uitstak en zo'n korte tijdsduur voor de optische waarneming was, is deze gekoppeld aan de supernova zelf. Toevalligerwijs was er 7 uur en 42 minuten voor de optische waarneming ook een kleine burst aan events in de Mont-Blanc detector waargenomen, zie tabel 2. Deze events waren tot nu toe altijd terzijde geschoven, aangezien deze tweede set observaties niet binnen een fysisch model paste. Dit willen we graag re-evalueren en kijken of dit wel terecht was.

Tabel 1: Neutrino's gemeten door Kamiokande II, voornamelijk via de reactie $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

event	tijd (s)	zichtbare energie in MeV
1	0.0	20.0 ± 2.9
2	0.107	13.5 ± 3.2
3	0.303	7.5 ± 2.0
4	0.324	9.2 ± 2.7
5	0.507	12.8 ± 2.9
6	0.686	6.3 ± 1.7
7	1.541	35.4 ± 8.0
8	1.728	21.0 ± 4.2
9	1.915	19.8 ± 3.2
10	9.219	8.6 ± 2.7
11	10.433	13.0 ± 2.6
12	12.439	8.9 ± 1.9

Tabel 2: Neutrino's gemeten door de Mont-Blanc detector, voornamelijk via de reactie $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

event	tijd (s)	zichtbare energie in MeV
1	0.0	6.2 ± 0.9
2	3.86	5.8 ± 0.9
3	4.22	7.8 ± 1.2
4	5.91	7.0 ± 1.1
5	7.01	6.8 ± 1.0

Hierbij zien we in de eerste tabel een grote spreiding in de energie. Dit kan velen oorzaken hebben, zoals interacties of het feit dat we voor de supernova aannemen dat de burst instantaan ontstaat. Achtergrondstraling is ook nog een mogelijke oorzaak. Dit zijn aspecten waar we niet in willen duiken. Veel data is in de eerste plaats niet meer te achterhalen en we willen enkel kijken naar het globale verhaal. Daarom hebben we voor ons verhaal ervoor gekozen om alle events mee te nemen, die door Kamiokande II als burst bevonden zijn. Hiermee weten we voor de massa-ondergrens dat $E_{\bar{\nu}_e} \approx E_{e^+} + 1.3 \text{ MeV}$, dus kunnen we bij de gevonden zichtbare energieën 1.3 MeV optellen om de neutrino-energie te bepalen. Er van uitgaande dat het voorfront van het licht inderdaad met de

lichtsnelheid in het vacuüm ging en dat de neutrino's eerder aankwamen kunnen we in de eerste plaats de snelheid berekenen:

$$v_1 = \frac{dc}{d - c\Delta t_1} \quad (26)$$

Hier is v_1 de snelheid van de neutrino's, d de afstand van hier tot aan de supernova en Δt_1 de tijd die de neutrino's eerder waargenomen zijn. Voor de metingen in de Kamiokande II en IMB detectoren betekent dat:

$$\frac{v_1 - c}{c} = 2.07 \times 10^{-9} \quad (27)$$

Nu kunnen we een gemiddelde neutrino-energie uitrekenen, te bepalen uit tabel 1. Deze gemiddelde energie is 12.3 ± 0.7 MeV voor de deeltjes die arriveren. Nu kunnen we de formule voor de relativistische energie erbij halen en deze omschrijven naar de massa:

$$m = \frac{E}{c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (28)$$

Voor dit geval levert dit een maximale imaginaire massa op van $(7.90 \pm 0.48) \times 10^2$ ieV/ c^2 . We gaan dit nu extrapoleren naar de meting in de Mont-Blanc detector, waarbij de waargenomen energieën waren als gegeven in tabel 2. Dat geeft een gemiddelde neutrino-energie in de Mont-Blanc detector van 7.9 ± 0.4 MeV. Gebruik makende van de gevonden waarde voor de tachyonische massa en de waargenomen neutrino-energieën in de Mont-Blanc detector geeft dit voor de snelheid

$$\frac{v_2 - c}{c} = 5.0_{-1.0}^{+1.4} \times 10^{-9} \quad (29)$$

Zulke deeltjes zouden tussen de 6 uur en 9.5 uur, met een gemiddelde van 7.5 uur, eerder aan moeten komen dan de fotonen van de supernova. Dit is inderdaad wat er waargenomen is.

Dit laat zien dat, heel ruw gezegd, het qua ordegrrootte mogelijk is dat de neutrino's afkomstig van supernova 1987A tachyonisch zijn. Dit omdat er verwacht wordt van tachyonische deeltjes dat deze sneller zijn bij een lagere energie. Nu is het qua foutenmarge allemaal redelijk onnauwkeurig, maar met dit resultaat is het niet uit te sluiten dat de neutrino's die in de Mont-Blanc detector waargenomen zijn, van dezelfde supernova waren en enkel eerder aangekomen zijn gezien het feit dat ze lager energetisch waren. Om dit helemaal sluitend te maken moeten we eerst bekijken, wat eigenlijk de redenen waren waarom de meting bij de Mont-Blanc detector verworpen is.

4.1.1 Mont-Blanc metingen

We zijn er zonder tegenspraak van uitgegaan dat de Mont-Blanc meting een valide meting was. Echter, wat zijn de redenen dat deze data nooit eerder meegenomen zijn. De volgende argumenten worden in Ref. [6] opgeworpen.

1. Er zijn geen significante neutrino-events waargenomen in de andere grote detectoren ten tijde van de waarneming door de Mont-Blanc-detector. Dit terwijl de Kamiokande en de IMB detector allebei een orde 50 groter zijn en dus ook 50 keer zoveel zouden moeten waarnemen.

2. Het aantal neutrino-events in de detector is veel te groot voor wat je zou verwachten van een supernova. Gezien de dichtheid van events in de Kamiokande detector wordt verwacht, op basis van de grootte van de Mont-Blanc detector, dat je slechts één event zou hebben dat zich boven de energie van normale neutrino-events van andere bronnen zou tillen.
3. De energie is te laag voor een supernova, je zou ook meer hoger energetische neutrino-energieën verwachten.
4. Er is geen fysische verklaring voor twee neutrino-bursts of voor zo'n vroege time of arrival.

4.1.2 Kamiokande en Mont-Blanc detectoren

Om deze redenen goed te kunnen bekijken moet er gekeken worden om wat voor detectoren het hier gaat. Ten eerste bekijken we daarvoor de Mont-Blanc detector. De Mont-Blanc detector is een neutrinotelescoop op enkele kilometers diepte in een grot aan een weg die Italië en Frankrijk met elkaar verbindt. De detector bevat 72 counters, elk met een inhoud van $1.5m^3$. Deze zijn verdeeld over drie lagen, waardoor de detector uiteindelijk een horizontaal oppervlak heeft van $42m^2$ en een hoogte van $4.5m$. De counters zijn gevuld met $C_{10}H_{22}$, om voor zoveel mogelijk vrije protonen te zorgen. Omdat de detector zo diep onder de rotsen ligt, wat veel kosmische achtergrondstraling wegfilt, is de detector uitermate geschikt voor het meten van neutrino's met lagere energieën. De drempelwaarde voor een meting ligt daardoor voor de buitenste detectoren op 6 a 7 MeV, vanwege het stalen geraamte hieromheen, en voor de binnenste detectoren op 5 MeV.

De vergelijkbare Kamiokande II detector bevindt zich in Japan, in de diepe Kamioka mijn onder een Japanse berg. De detector is een groot cilindrisch waterbad met daarin 2140 kubieke meter water. Aan de rand liggen 948 photomultiplier tubes, deze beslaan 20 procent van het totale oppervlakte. Hieromheen zijn allerlei spoelen bevestigd waardoor een stroom loopt, om het aardmagnetisch veld te neutraliseren. Door de vloeistof in de detector is de grenswaarde voor detectie 7.5 MeV.

Dit in het achterhoofd houdend kunnen we kijken naar het eerste argument in §4.1.1, de bewering dat in de Kamiokande detector te weinig events waargenomen zijn. Dit is gebaseerd op een eerste grove schatting. De wetenschappers van de Mont-Blanc detector hebben vervolgens dit doorgerekend, rekening houdend met de lagere energie-drempel die de Mont-Blanc detector heeft. Ze vonden dat het aantal events in de Kamiokande detector ten tijde van de meting in de Mont-Blanc detector 10 ± 8 zou moeten zijn. Nu heeft Kamiokande twee events gemeten en klopt dit dus. Verder was van de andere detectoren de drempel-energie veel te groot om deze laag energetische neutrino's waar te nemen. Deze redenatie gaat ook op voor het tweede argument: de Mont-blanc detector is nou juist bij uitstek geschikt voor lage energieën.

De derde en vierde argumenten zijn met tachyonisch gedrag te verklaren. Bij een supernova is er een redelijke spreiding van energieën te verwachten en is er dus, in verband met de hogere snelheid, een front van lager energetische tachyonen te verwachten. De bursts zelf zijn minder makkelijk te verklaren, dit kan ofwel te maken hebben met de detectie, ofwel met een mechanisme in de

supernova dat ons nog onbekend is. Een tachyonisch model kan wel een vroege time of arrival verklaren.

4.1.3 Gevolgen voor Cern

In Cern is, zoals te lezen in hoofdstuk 2, een resultaat gevonden van:

$$v_{neutrino} = 1.0000237c \quad (30)$$

Echter, is dit wel een logisch resultaat, als je dit vergelijkt met de gevonden resultaten voor de supernova. We weten dat de energie van het Cern experiment hoger is, hetgeen tragere deeltjes zou suggereren. Echter, men kijkt daar naar een bundel van muon-neutrino's die oscilleert naar tau-neutrino's. Afkomstig van de supernova nam men echter elektron-neutrino's waar. Zou het kunnen dat de Cern neutrino's een grotere imaginaire massa hebben en dus een significant grotere snelheid hebben? Dit kunnen we ook qua ordegrrootte gaan bekijken door te kijken naar de neutrino-oscillaties. Van de neutrino's zijn de verschillen bekend in de massa-kwadraten. Deze zijn:

$$m_2^2 - m_1^2 = \Delta m_{21}^2 = 0.000076 \text{ eV}^2/c^4 \quad (31)$$

$$m_3^2 - m_2^2 = \Delta m_{32}^2 = 0.0024 \text{ eV}^2/c^4 \quad (32)$$

Deze verschillen zijn beide te klein vergeleken met de gevonden kwadratische massa van $-(790 \text{ eV}/c^2)^2$ om een wezenlijke verandering te bewerkstelligen in de gevonden massa in §4.1. Hierdoor is het verschil tussen de massa's van de verschillende neutrino's verwaarloosbaar. Verder is de energie bij Cern per neutrino veel hoger. Hierdoor is de verwachting dat de deeltjes enkel trager zullen gaan dan de supernova neutrino's, aangezien hoger energetische tachyonen trager gaan. Maar zelfs als we dit energie-aspect niet meenemen, zien we dat de snelheid gevonden bij Cern veel te hoog is. De supernova neutrino's zouden jaren eerder aan moeten komen.

5 Conclusie

In deze scriptie is gekeken of er binnen de speciale relativiteitstheorie een mogelijkheid bestaat tot deeltjes die sneller dan het licht gaan en of het bestaan van zulke deeltjes strookt met de metingen in Cern en andere observaties. Daarnaast is gekeken of de eigenschappen van zulke tachyonische deeltjes niet tot fundamentele problemen met causaliteit zullen leiden.

Hierbij moet ik uit de analyse van de resultaten uit Cern ten eerste opmerken dat ze tot nu toe niet standhouden en dat het ook twijfelachtig is of deze resultaten wel kloppen. Andere experimenten meten namelijk uiteindelijk heel andere waarden voor de snelheid, waarden die wel stroken met een beeld van niet-tachyonische deeltjes.

Wel is het goed op te merken dat een tachyonisch deeltje binnen het raamwerk van de speciale relativiteitstheorie past. Hierdoor wordt wel als randvoorwaarde opgelegd dat het deeltje niet een reële massa kan hebben, maar een imaginaire massa moet hebben. Het hebben van een imaginaire massa leidt niet tot een tegenspraak en ook het feit dat deeltjes sneller gaan dan het licht leidt niet tot causaliteitsproblemen. Daardoor kunnen tachyonen bestaan en kunnen ze ook beperkte interactie hebben met de fysieke wereld om ons heen.

Ook buiten de metingen in Cern zijn er mogelijke aanwijzingen voor tachyonische neutrino's, het beste voorbeeld hiervan zijn de supernova's in het heelal. Deze hebben namelijk karakteristiek een neutrino-burst die voor het licht arriveert. Kijkend naar het bekendste geval, blijken er zelfs meerdere metingen gedaan te zijn, waarin nog een klein energieverloop te zien is. Het is aannemelijk te maken dat deze waarnemingen bij een en dezelfde supernova horen en een verschillende aankomsttijd hebben vanwege hun verschil in energie. Echter, als we dit dan vergelijken met wat er in Cern waargenomen is, dan zit hier een discrepantie tussen. De snelheid gemeten bij het Cern experiment is simpelweg veel te hoog. Het feitelijke verschil in aankomsttijd over de korte afstand door de alpen zou eigenlijk niet meetbaar moeten zijn op basis van de supernova-waarnemingen. En inderdaad, uiteindelijk werd er op 8 Juni uitsluitend gegeven door het Opera-experiment zelf, de meetwaarden klopten inderdaad niet.

Uiteindelijk kunnen we concluderen dat er mogelijkheden zijn voor tachyonische deeltjes in de natuurkunde, enkel is het nog maar de vraag of ze bestaan. Totdat er sluitend bewijs is dat neutrino's of andere deeltjes consequent sneller gaan dan het licht, ligt het hele speelveld nog open.

Referenties

- [1] **OPERA** Collaboration, T. Adam *et. al.*, *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam*, **arXiv:1109.4897**.
- [2] Wikipedia, *Neutrino* — *wikipedia, the free encyclopedia*, 2012. [Online; accessed 6-June-2012].
- [3] **MINOS** Collaboration, P. Adamson *et. al.*, *Measurement of neutrino velocity with the MINOS detectors and NuMI neutrino beam*, *Phys.Rev. D* **76** (2007) 072005, [**arXiv:0706.0437**].
- [4] **ICARUS** Collaboration, M. Antonello *et. al.*, *Measurement of the neutrino velocity with the ICARUS detector at the CNGS beam*, **arXiv:1203.3433**.
- [5] Wikipedia, *Tachyonic antitelephone* — *wikipedia, the free encyclopedia*, 2012. [Online; accessed 6-June-2012].
- [6] W. Arnett, J. N. Bahcall, R. Kirshner, and S. Woosley, *SUPERNOVA SN1987A*, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.* **27** (1989) 629–700.
- [7] Wikipedia, *Sn 1987a* — *wikipedia, the free encyclopedia*, 2012. [Online; accessed 6-June-2012].
- [8] O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande, and E. C. G. Sudarshan, “*Meta*” *Relativity*, *American Journal of Physics* **30** (Oct., 1962) 718–723.
- [9] S. de Jong, *Dictaat bij het college speciale relativiteitstheorie*, 2007.
- [10] W. Beenakker, *Dictaat bij het college kwantummechanica 3*, 2011-2012.
- [11] Aglietta et al, *The neutrino burst from SN 1987A detected in the Mont Blanc LSD experiment.*, in *Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud* (M. Kafatos and A. G. Michalitsianos, eds.), pp. 119–129, 1988.
- [12] A. Burrows, *NEUTRINOS FROM SUPERNOVA EXPLOSIONS*, *Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.* **40** (1990) 181–212.
- [13] K. Hirata, T. Kajita, M. Koshiba, M. Nakahata, Y. Oyama, *et. al.*, *Observation in the Kamiokande-II Detector of the Neutrino Burst from Supernova SN 1987a*, *Phys.Rev.* **D38** (1988) 448–458.