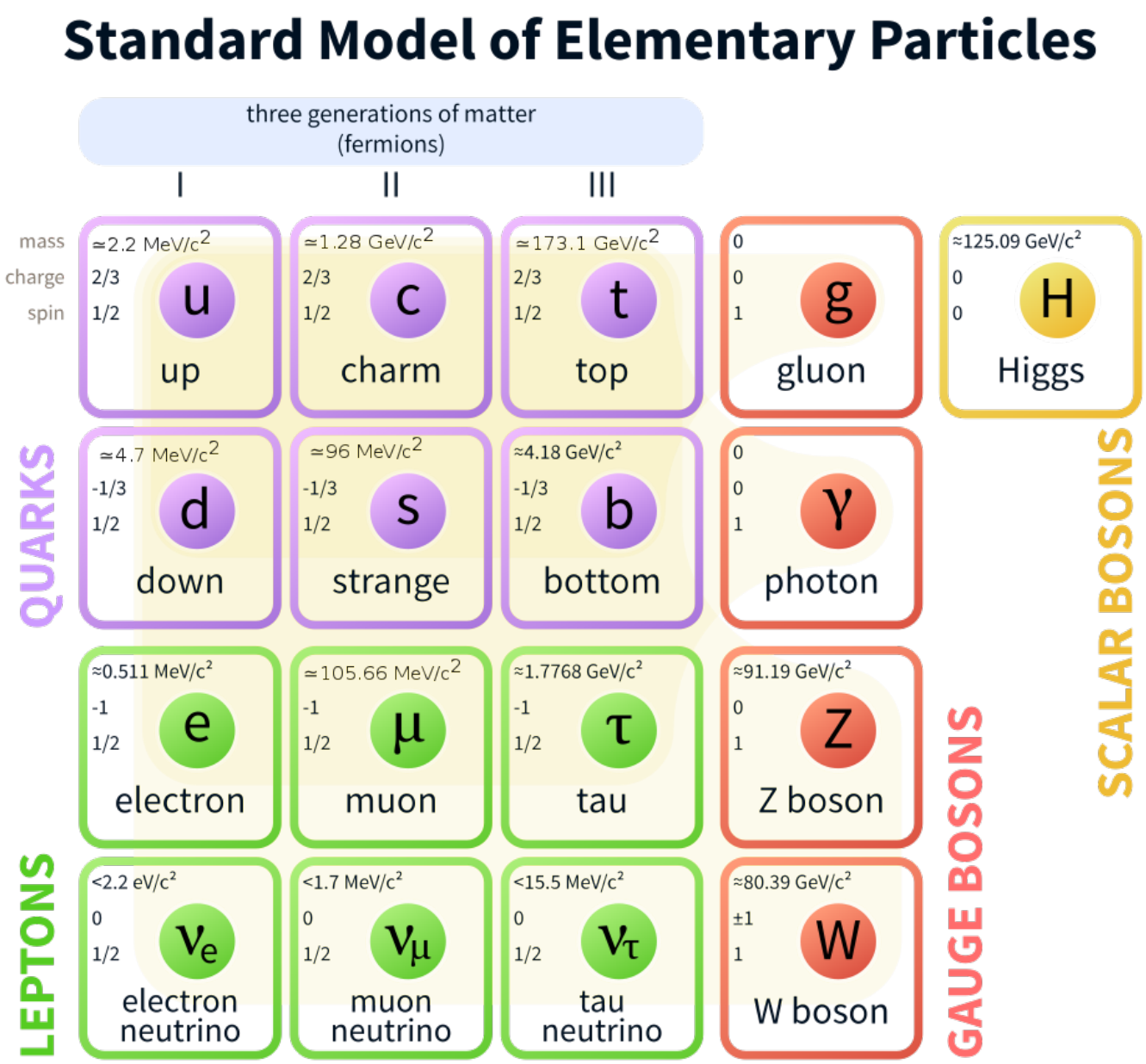
Het neutrino onder de loep: KM3NeT (1)

Een van de meest ongrijpbare deeltjes in het standaardmodel is het neutrino. Deze fundamentele bouwsteen is niet alleen bijna massaloos, maar ook nog eens elektrisch neutraal en ongevoelig voor de sterke kernkracht. Om die redenen is het detecteren ervan een bijzonder grote uitdaging, zelfs al worden overal in het universum enorm veel neutrino's geproduceerd en razen er op dit moment vele miljarden door je lichaam.



Afbeelding 1. Het standaardmodel.Het standaardmodel van de deeltjesfysica, met links onderaan de drie generaties neutrino's; één voor ieder geladen lepton. Bron: Fermilab.

Niet alleen zijn neutrino's lastig op te sporen en te karakteriseren, ze bevatten ook veel informatie over allerlei wetenschappelijke vraagstukken. Het detectieprobleem werd dan ook algauw een uitdaging voor fysici: uitzonderlijk ambitieuze wetenschappelijke projecten zoals die in de Homestake Mine in de VS (1967), of Kamiokande in Japan (1986), werden een succesvolle realiteit.

Dr. Ronald Bruijn van de Universiteit van Amsterdam is aangesloten bij de groep rond onder

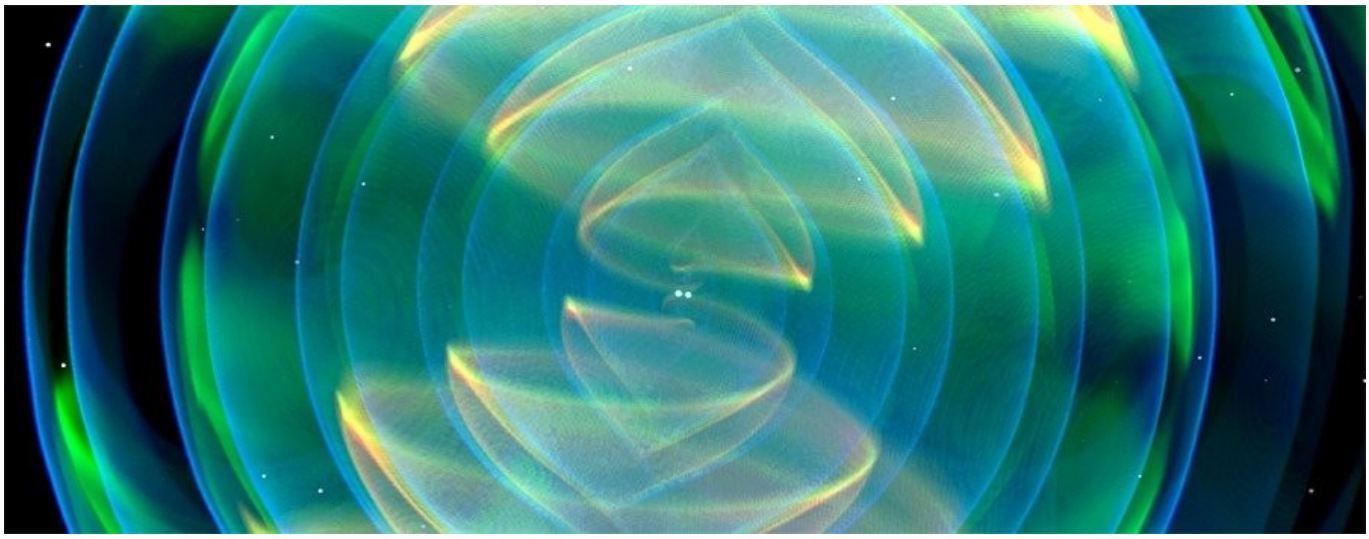
meer het hedendaagse detectornetwerk KM3NeT – de kubieke-kilometer-neutrinotelescoop. In het tweede deel van dit artikel, dat binnenkort verschijnt, treedt Quantum Universe met hem in gesprek over de werking en de toekomst van dit bijzondere instrument op de bodem van de Middellandse Zee. Om goed te begrijpen waar dat interview over gaat, zullen we om te beginnen in dit eerste deel achterhalen welke vragen Ronald bij KM3NeT precies tracht te beantwoorden.

Afbeelding 2. Ronald Bruijn.Dr. Ronald Bruijn, onderzoeker bij de neutrinodetector KM3NeT. Bron: Universiteit van Amsterdam (IoP).

Twee grote klassen van vragen zijn te onderscheiden. In de eerste plaats is er een grote interesse naar hoogenergetische neutrino's die de bron zouden kunnen zijn van astronomische ontdekkingen. In de tweede plaats zijn wetenschappers geïnteresseerd in de theoretische consequenties van zogenaamde *neutrino-oscillaties*. Laten we beginnen met de bespreking van het eerste type vraag, afkomstig uit de mysterieuze dieptes van de kosmos.

Er bestaat een aantal extreme evenementen in het universum waarbij enorm veel energie vrijkomt in de vorm van razendsnelle neutrino's. Denk daarbij aan supernova's, botsende neutronsterren of gammaflitsen. De fundamentele processen zijn vaak zo ingrijpend, dat de betreffende deeltjes een energie in de zogenaamde TeV- of zelfs PeV-regio hebben, vele grootteordes meer dan de rustenergie van een proton. Het waarnemen van dergelijke hoogenergetische neutrino's kan ons veel leren over de locatie en de aard van hun bron. In het bijzonder kan zo'n waarneming bijdragen aan "multi-messenger"-astronomie, waarbij

sterrenkundigen trachten een kosmische gebeurtenis te catalogiseren en analyseren in termen van niet enkel elektromagnetische straling (zoals zichtbaar licht), maar ook zwaartekrachtgolven en neutrino's. Hopelijk is hiervan sprake bij de volgende waarneming van een binaire neutronenster.



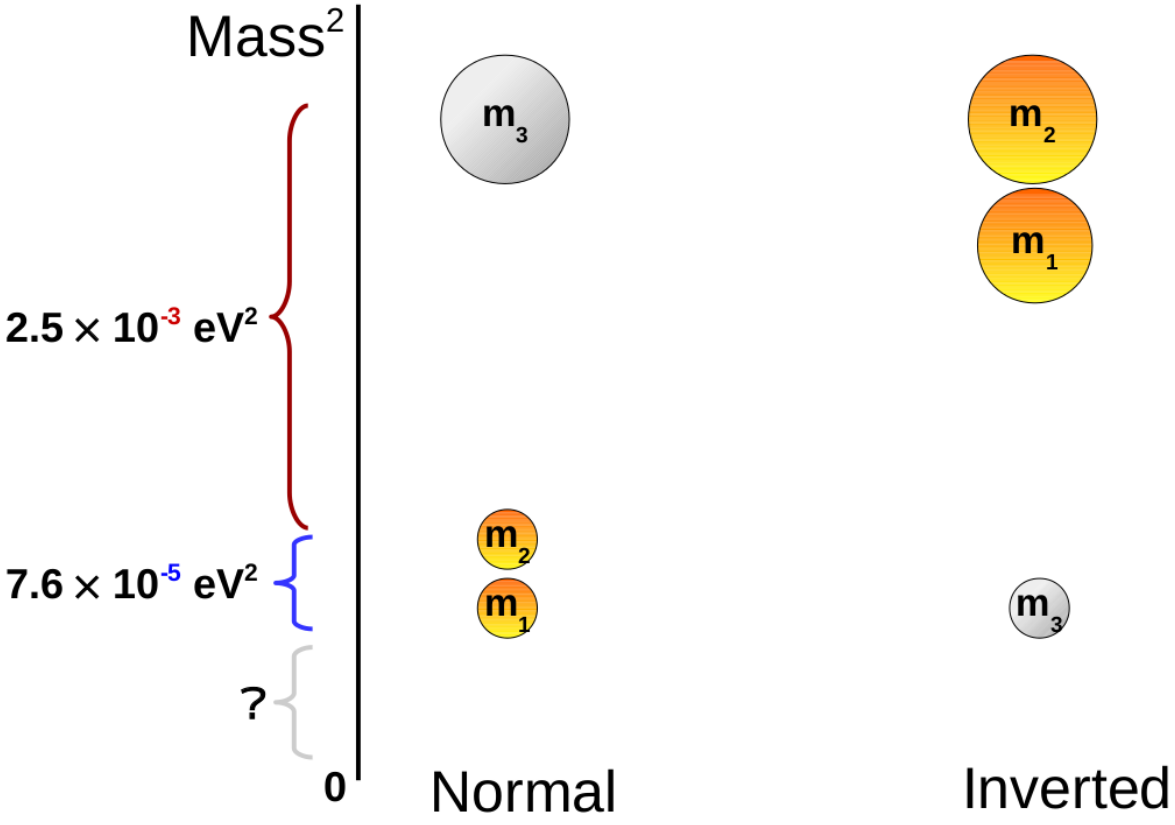
Afbeelding 3. Een binaire neutronenster.Artiestenimpressie van een binaire neutronster die op het punt staat te versmelten. Er is hoop dat de vele hoogenergetische neutrino's die hierbij vrijkomen, in de toekomst gedetecteerd zullen kunnen worden. Bron: Max Planck Institute for Gravitational Physics.

Nog fundamenteler en misschien mysterieuzer dan het vinden van deze astrofysische neutrino's, is het onderzoeken van de eigenschappen van het neutrino zelf. Sinds de experimentele ontdekking van het tau-neutrino in het jaar 2000, zijn wetenschappers ervan overtuigd dat er niet alleen drie soorten (of "generaties") geladen leptonen zijn – deeltjes die sprekend lijken op het elektron maar een andere massa hebben – maar dat daarbij ook drie neutrale deeltjes horen: het elektron-neutrino (ν_e), het muon-neutrino (ν_m) en het tau-neutrino (ν_t).

Nog sensationeler dan het erkennen van die drie generaties, was de ontdekking dat de identiteit van een bepaalde generatie neutrino kan veranderen. Als gevolg van een fenomeen dat neutrino-oscillatie genoemd wordt, voor de eerste maal overtuigend waargenomen slechts één jaar na de directe waarneming van het tau-neutrino, weten we dat een neutrino niet trouw blijft aan zijn karakter. Concreet betekent dit dat een elektron-neutrino "zomaar" kan veranderen in bijvoorbeeld een muonneutrino! Dit kan alleen maar verklaard worden in theorieën die *verder gaan* dan het standaardmodel, theorieën waarin bovendien het neutrino

een minuscule massa moet hebben in plaats van volstrekt massaloos te zijn. Waarnemingen die onze gevestigde kennis op de proef stellen, trekken natuurlijk altijd meteen de aandacht van fundamentele fysici.

Ten eerste is het belangrijk om te benadrukken dat er niet ondubbelzinnig een massa kan worden toegeschreven aan een enkel type neutrino. De zwaartekracht “ziet” het neutrino immers op een andere manier dan de zwakke kernkracht deze ervaart. In technische termen: de “smaakeigentoestanden” van neutrale leptonen (ν_e, ν_m, ν_t) zijn niet identiek aan de “massa-eigentoestanden” (ν_1, ν_2, ν_3). Ten tweede weet men ook niet wat de groottevolgorde is van de massa’s toegeschreven aan ν_1, ν_2 en ν_3, hoewel men opmerkelijk genoeg wél kan kon achterhalen wat het verschil is in gekwadrateerde massa tussen de eerste en de tweede, en tussen de eerste en de derde soort. (Zie afbeelding 4.)

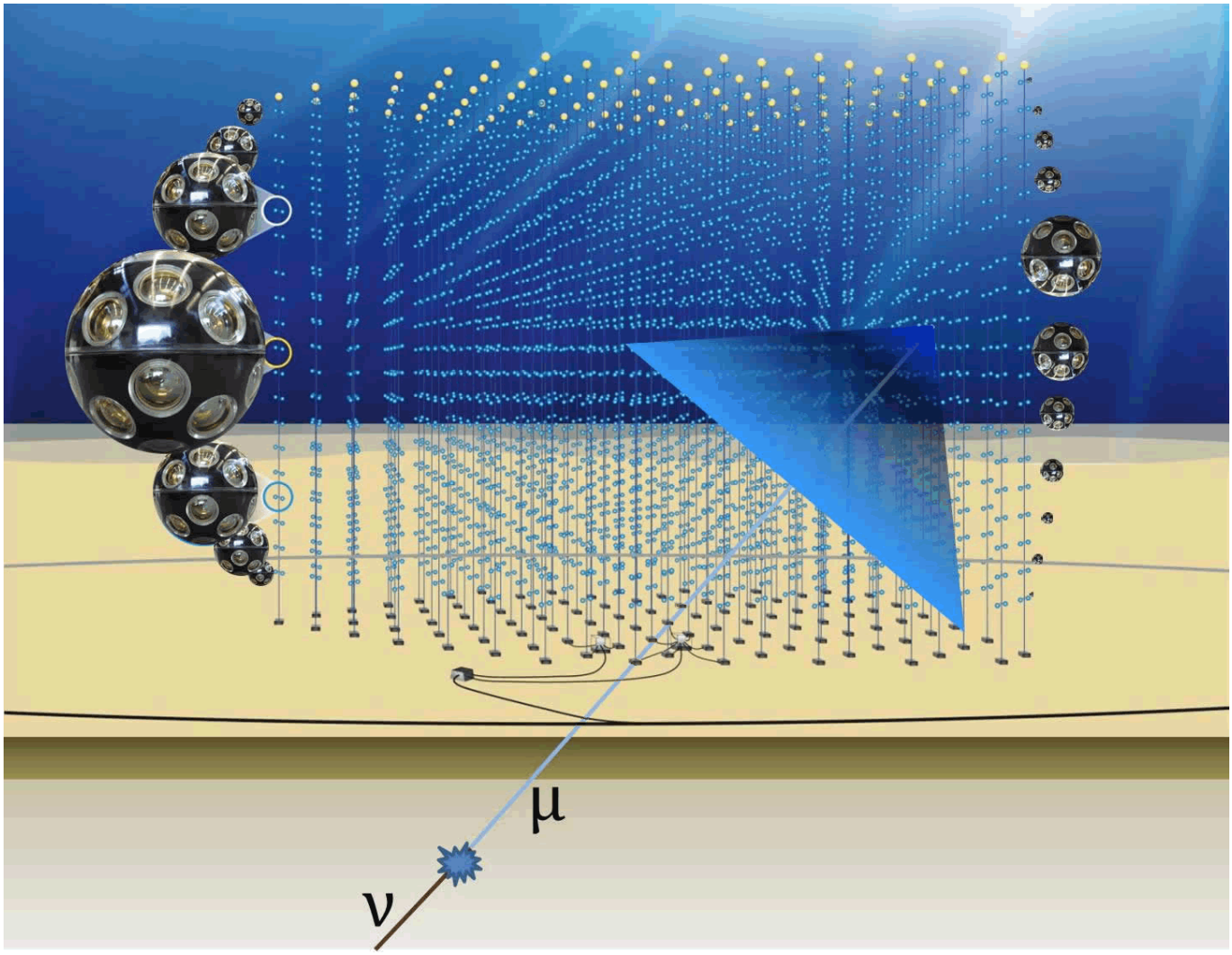


Afbeelding 4. Welke massa-volgorde?Hoewel het verschil in gekwadrateerde massa tussen ν_1 en ν_2, en tussen

ν_1 en ν_3 bekend is, weet men niet of de volgorde “normaal” (linkerkant) of “omgekeerd” is (rechterkant).

Bron: Hyper-Kamiokande.

Dit obscure probleem staat bekend als het *hiërarchieprobleem*. Niet alleen is dit raadsel typerend voor de absurditeiten van het subatomaire, maar het is om minstens drie redenen van groot belang in de natuurkunde. Ten eerste voorspellen verschillende unificatietheorieën verschillende hiërarchieën, zodat een ondubbelzinnige waarneming een deel van die theorieën kan uitsluiten. Verder heeft men ontdekt dat het uitsluiten van een “normale” of “omgekeerde” massavolgorde ons een beter begrip kan bijbrengen over het ontstaan van zware metalen bij supernova’s. Ten derde heeft een antwoord op het hiërarchieprobleem gevolgen voor het bepalen of het neutrino zijn eigen antideeltje is; op zijn beurt kan hierdoor het diepe mysterie worden aangekaart waarom er veel meer materie is in het zichtbaar universum dan antimaterie.



Afbeelding 5. KM3NeT.Artistieke weergave van een van de opstellingen van KM3NeT: een heel netwerk aan detectoren op de bodem van de Middellandse Zee. In deel twee van dit artikel legt Ronald Bruijn uit wat de aanpak van het experiment is. Bron: KM3NeT.

Naast de detectie van hoogenergetische neutrino's, is de tweede vraag die KM3NeT tracht op te lossen dus dit hiërarchieprobleem, aan de hand van neutrino's in een veel lagere energieregio. Hoe deze waarnemingen gebeuren, op welke manier dit de twee centrale vragen kan aanpakken, en welke andere opmerkelijke conclusies kunnen volgen uit de verwachte data van KM3NeT, licht Ronald Bruijn in het tweede deel van dit artikel uitvoerig toe. Daar zal duidelijk worden wat voor een monumentale uitdaging het aanpakken van diepe vragen over dit "klein neutraaltje", wat het woord neutrino immers betekent, écht is.