

Die ontstaan van die heelal en kernsintese

J.P.F. Sellschop

Wits-WNNR-Navorsingsentrum vir Kernwetenskappe, Universiteit van die Witwatersrand, Jan Smutslaan, Johannesburg 2001

UITTREKSEL

Teorieë i.v.m. die ontstaan van die heelal en kernsintese word in hierdie artikel bespreek. Die kosmologiese konsep van 'n "Oerknal" is gegrond op waarnemings dat die heelal uitdy. Die ewolusie van die heelal word beskryf vanaf 'n baie klein tydjie na die "Oerknal" d.m.v. die begrippe van elementêre deeltjie-fisika. Verskeie "Eras", waartydens bepaalde kernfisiese prosesse oorheers, word geïdentifiseer. In 'n latere stadium vind die merkwaardige kernsintese van koolstof plaas, wat op sy beurt lei tot die ewolusie van ander elemente. Om fisiese teorieë in hierdie verband te bevestig is dit belangrik om neutrinometings uit te voer en die resultate van sulke metings deur die WITS-WNNR-Schonland-Navorsingsentrum, word aangebied en bespreek.

ABSTRACT

The origin of the universe and nuclear synthesis

The origin of the universe and nuclear synthesis are discussed in this paper. The concept of the "Big Bang" is introduced in cosmology from observational evidence that the universe is expanding. The language of elementary particle physics is used to describe the evolution of the universe starting at a very small fraction of a second after the "Big Bang". Various "Eras" are identified during which certain nuclear processes predominate. At a later stage the remarkable nuclear synthesis of carbon takes place, leading to the evolution of other elements. Neutrino measurements are important to validate physical theories in this field and some results of such measurements by the WITS-CSIR Schonland Research Centre are presented.

Voordat ek hierdie onderwerp behandel, moet ek eers verduidelik wat met "ontstaan" bedoel word. Dit is nie my doel om tyd $t = 0$ te interpreteer nie, omdat dit buite my vermoë of insig lê. Ek beoog wel om die kennis waaroor ek beskik, aan te wend om die ontstaan van die heelal te probeer verklaar vanaf 'n tyd $t = (0 + \Delta t)$, waar Δt klein is, inderdaad baie klein.

Waarneming toon dat ons heelal tans uitdy. In 1920 het die Amerikaanse sterrekundige, Edwin Hubble, ontdek dat sterrestelsels van mekaar af wegbeweeg teen 'n spoed wat eweredig is aan hulle afstande vanaf die aarde. Die grond vir hierdie belangrike feit is die waarneming van die rooi-verskuiwing en die interpretasie daarvan i.t.v. Dopplerverskuiwing, 'n bekende verskynsel wat in 1842 al verduidelik is – Fisikastudente geniet nog steeds die storie van die eksperiment met trompette op 'n trein naby Utrecht... Dit lei egter onvermydelik tot 'n projeksie terug in die tyd na 'n heelal in 'n gekondenseerde toestand en 'n "Oerknal"-ontploffing wat 'n heelal tot gevolg het wat uitdy.

Die geloofwaardigheid van hierdie konsep is ondersteun deur Penzias en Wilson (van Bell Telephone Laboratories in Holmdel, New Jersey, USA) se waarneming in 1965, van 'n see van mikrogolfstraling wat die heelal vul. Die straling is geïnterpreteer as die reste van die hitte van die oorspronklike Oerknal, wat nou afgekoel het tot 2,7 K, die temperatuur wat geassosieer word met die 7,35 cm-golflengte van die mikrogolfstraling. Hulle het ook gevind dat die straling onafhanklik is van dag, seisoen of oriëntasie... Hierdie allesdeurstromende straling is 'n fossiele oorblyfsel van die Oerknal. Die straling stem ooreen met 'n fotongas

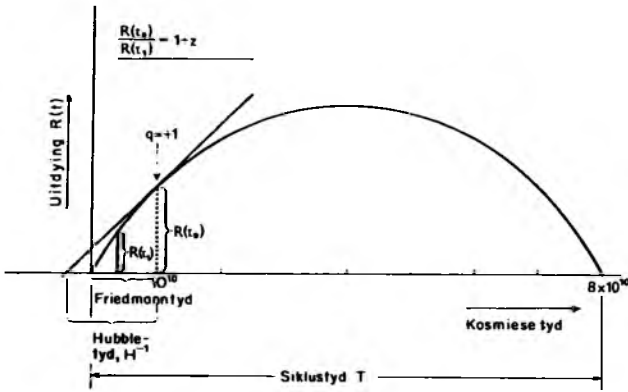
wat die heelal vul en 'n digtheid van ongeveer 300 fotone per kubieke sentimeter het. Aangespoor deur hierdie waarnemings en insig kan 'n mens probeer om na die ontstaansomblikke van die heelal te ekstrapoleer, om die uiterste toestande wat toe geheers het, te definieer en om vrae oor die huidige asimmetrie van materie en anti-materie te oorweeg.

Die Hubblewet verbind die afstande (r) van groepe sterrestelsels en hulle snelhede van terugwyking (v) deur die Hubblekonstante, H_0 . Dit is geldig vir afstande so groot dat plaaslike effekte verontagsaam kan word, maar nie so groot dat relativistiese effekte (vertraging of spoedvermindering) weglaatbaar is nie:

$$v = H_0 r$$

Die resiprook van die Hubblekonstante het die dimensie van tyd en word Hubbletyd genoem. As die uitdyingsnelheid gedurende die ewolusie van die heelal konstant was, dan sal die Hubbletyd die ouderdom van die heelal wees. Waarneming lewer 'n Hubbletyd van $1,8 \times 10^{10}$ jaar. Die uitdying van die heelal word egter vertraag deur selfgravitasie. Die Hubblekonstante was dus in die verlede groter en die Hubbletyd korter as wat dit volgens 'n konstante uitdyingsnelheid moet wees. Dit lei tot 'n waarde van ongeveer 10^{10} jaar vir die tyd toe die Heelal begin het om uit te dy.

Daar bestaan meer gesofistikeerde modelle van die heelal wat met hierdie "ouderdom" ooreenstem en as die heelal wél geslote is en 'n redelike vertragingparameter het, dan is die tyd vir 'n siklus om tot geslotenheid – oftewel Oerknal – terug te keer 8×10^{10} jaar. Die uitdyingsfaktor word beskryf deur



FIGUUR 1: Siklus van die geslote heelal vir 'n verdragingsparameter, $q = +1$ (sien verw. 1).

die funksie $R(t)$, soos in fig. 1 getoon. Deur as uitgangspunt die huidige waargenome gemiddelde digtheid van ongeveer $3 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3$ te neem, en deur bekende fisikabeginsels toe te pas, kan die digtheid naby die begin van tyd, $t = 0$, bereken word . . . en onafhanklik van die besonderhede van die berekeningsmetode kom ons gou tot die gevolgtrekking dat die heelal superdig was, meer as 10^{20} g/cm^3 , wat 'n temperatuur van meer as 10^{15} K impliseer.

DIE VROEË CHRONOLOGIE VAN DIE HEELAL

Op 'n tydstep $t = \epsilon$ is ons superdigte heelal, interessant genoeg, maar tog ironies, eenvoudiger van struktuur as wat dit ooit weer sal wees. Dit bestaan uit 'n primordiale "sop" waarin geen struktuur, sy dit atomiese of kernstruktuur, kon bestaan het nie. Die elementêre deeltjies is almal teenwoordig, daar is (waarskynlik) 'n gelyke hoeveelheid materie en antimaterie; miskien is daar 'n geringe oormaat materie wat lei tot die skynbare oorheersing van materie in die heelal wat ons vandag waarneem. Teen hierdie uiterste temperature het die heelal uit totaal ontbinde kerne bestaan; dit was die ryk van elementêre deeltjie-fisika, m.a.w. 'n warm plasma van vrye deeltjies. Baie van die deeltjies was egter elektries gelaai (bv. protone en elektrone) en aangesien bewegende gelaai deeltjies remstraling uitstraal, was die vroegste heelal ryk aan fotone.

Die oorwegende deeltjies was dus elektrone, positrone, neutrino's, antineutrino's en fotone. Die primordiale sop is gekarakteriseer deurdat dit in volmaakte termiese ewewig was met botsings tussen deeltjies en straling. Die sop was so dig dat die gemiddelde vrye padlengte van selfs neutrino's hulle beperk het tot die dimensies van die sop. Die digtheid was ongeveer $3,8 \times 10^9 \text{ g/cm}^3$. Om hierdie toestand te beskryf, asook die toestand wat vinnig hieruit ontwikkel het, kan ons gerieflikshalwe die taal van elementêre deeltjie-fisika, soos kortliks opgesom in fig. 2, gebruik. Dit is duidelik dat al die elementêre deeltjies geklassifiseer is as barione, leptone of bosone. Die groep barione en bosone is bekend as hadrone. Ons begin met die ewolusie van die heelal in die Hadronera. In hoofsaak is alle elementêre deel-

Rusmassa MeV	FERMIONE				BOSONE	
	BARIONE		LEPTONE			
	ANTIBARIONE	BARIONE	ANTI-LEPTONE	LEPTONE		
1672	HADRONE HIPERONE $\bar{\Omega} \quad \Omega$					
1321.3 1314.7	$\bar{\Xi} \quad \Xi \quad \bar{\Sigma} \quad \Sigma$					
1197.34 1192.48 1189.42	$\bar{\Sigma} \quad \Sigma$					
1115.59	$\bar{\Lambda} \quad \Lambda$					
939.55 938.25	NUKLEONE $\bar{p} \quad \bar{n} \quad n \quad p$					
548.8 497.71 493.71	HADRONE				MESONE $(W^+) \quad (W^-)$ $\bar{K}^+ \quad K^+ \quad K^- \quad K^-$ $\pi^+ \quad \pi^0 \quad \pi^-$	
105.66			$\mu^+ \quad \mu^-$			
0.511 0			$e^+ \quad e^-$		foton γ graviton?	
Lading	-1 0 +1	-1 0 +1	+1 0 -1	-1 0 +1		
Spin	1/2				0 1 2	
Barion getal	-1	+1	0 0	0 0		
Lepton getal	0	0	-1 +1	0 0		

FIGUUR 2: Klassifikasie van elementêre deeltjies volgens hulle massa (leptone, mesone en barione), spin (bosone en fermione), elektriese lading, bariongetal en leptongetal. Mesone en barione is deeltjies met sterk wisselwerking (hadrone). Barione word onderverdeel in stabiele nukleone en onstabiele hiperone. Geen resonanse word voorgestel nie. Die intermedieêre boson (W^+ en W^-) en die graviton is hipotetiese deeltjies (sien verw. 1).

tjies moontlik, maar in geheel domineer die hadrone. Daar is 'n gelyke resiprositeit

$$\text{Barion} + \text{antibarion} = \text{gammafotone.}$$

Aangesien daar 'n materie- en nie 'n antimaterieheelal is nie, is dit nodig om te aanvaar dat die aantal barione ten minste 'n fraksie 10^{-9} groter was as die aantal antibarione. Alhoewel dit 'n klein fraksie is, was hierdie geringe asimmetrie van wesenlike belang vir die toekoms van die heelal.

Daar was natuurlik ook potrone en neutrone in die "sop" en hulle relatiewe voorkoms is 'n aspek wat verdere ondersoek verdien. Dit word vasgelê deur ewewigsreaksies soos

$$p + e \rightleftharpoons n + \text{elektron-neutrino}$$

$$n + e^+ \rightleftharpoons p + \text{anti-(elektron-neutrino)}$$

Daar was egter slegs 'n geringe aantal protone en neutrone, ongeveer 1 in 10^9 van die aantal fotone of elektrone/positrone of neutrino's/antineutrino's.

Na die eerste mikrosekonde het die temperatuur van die uitdyende heelal tot ongeveer 10^{13} K gedaal en word die drumpelwaarde, of selfs laer, van die rusenergie van die barione bereik. Fotone kan nie langer barion-antibarion pare produseer nie, maar barion-antibarionvernietiging kan nog plaasvind, sodat antibarione spoedig verminder en dan verdwyn uit die warm, uitdyende heelal. Die oorblywende barione het of verval of gekaskadeer na hul laagste energietoestand, m.a.w. nukleone (protone en neutrone).

Na ongeveer 10^{-4} sek. het die temperatuur gedaal tot omtrent 10^{12} K en die energie van die deeltjies en fotone het afgeneem tot ongeveer 100 MeV, wat te laag is vir die produksie van pi-mesone. Dit is nou die einde van die HADRONERA wat geduur het vanaf 10^{-44} tot 10^{-4} sek. Die temperatuur het gedaal van 10^{32} tot 10^{12} K, terwyl daar 'n vinnige uitdying was wat 'n digtheidsverandering van 10^{94} tot 10^{14} g/cm³ tot gevolg gehad het.

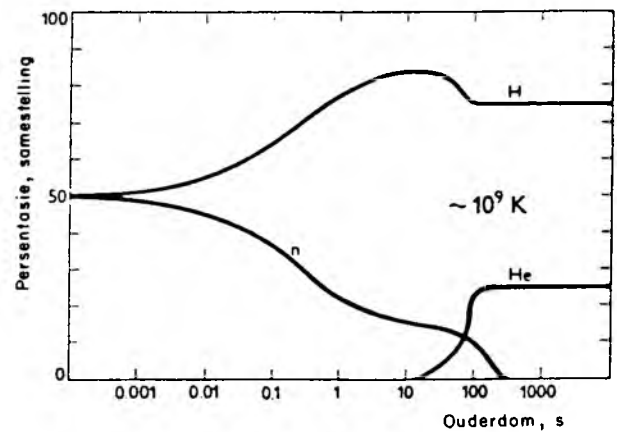
Die LEPTONERA het nou begin: met die verloop van tyd tot 0,1s daal die energie van die fotone en deeltjies van 100 tot 1 MeV en die temperatuur daal tot ongeveer 3×10^{10} K. Leptone, d.w.s. elektrone, positrone, neutrino's, antineutrino's en fotone word nou meer volop. Hulle is hoofsaaklik nog in termiese ewewig en het 'n digtheid ongeveer 3×10^7 groter as die digtheid van water.

Die karakteristieke uitdyingstyd is ongeveer 0,2s. Die neutrino's het nou langer gemiddelde vrye padlengtes en dit het tot gevolg dat hulle minder en minder te doen het met ander materie, totdat hulle later heeltemal ontkoppel en 'n eie bestaan voer. Hierdie oorgeblewe neutrino's behoort die heelal te vul net soos die oorgeblewe mikrogolfstraling.

Die neutron-proton-ewewig word nou egter versteur (neutrone verval met 'n halfveertyd van 12 min.) en ons nader 'n populasie van ongeveer 38% neutrone en 62% protone.

'n Oorgangstydperk tussen die LEPTONERA en die STRALINGSERA breek nou aan. Die tyd wat tot dusver verloop het, is ongeveer 1,09 sek. en die temperatuur het tot 8×10^9 K gedaal. Die gemiddelde vrye padlengte van neutrino's en antineutrino's neem nog verder toe en hulle ontkoppel nog meer: neutrino's bly 'n baie belangrike energiesinkput van die heelal. Die digtheid het afgeneem tot 380 000 keer dié van water en die karakteristieke uitdyingstyd is nou ongeveer 2 sek. Die temperatuur is nou ook so laag dat die reaksiedeursnit vir die skepping van elektron-positron-pare minder is as die deursnit vir elektron-positron-vernietiging. Soos getoon in fig. 3, ontwikkel die neutron-proton-wanbalans verder na ongeveer 24% neutrone en 76% protone.

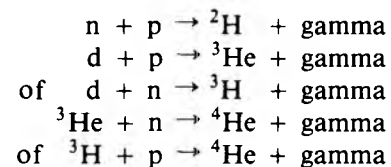
Vervolgens word die STRALINGSERA ten volle betree: die temperatuur het gedaal tot benede 10^{10} K en die energie dienooreenkomstig tot minder as 1 MeV. Alle elektron-positron-pare het hulle self vernietig en alle materieskeppende prosesse is beëindig. Fotone en neutrino's is nou 9 grootte-orde meer volop as deeltjies, gevolglik die "stralingsera". Teen die einde van die stralingsera is daar ongeveer ewe-



FIGUUR 3: Die toename van die proton- en afname van die neutronkomponent met tyd asook die begin van He-sintese.

veel fotone en neutrino's. Die neutron-proton-wanbalans het ontwikkel tot ongeveer 17% neutrone en 83% protone.

'n Interessante situasie ontstaan nou, ons eerste kern behoort te kan vorm en oorleef by hierdie temperatuur en soos verwag kan word, is dit die sterk saamgebonde ⁴He, maar dit bestaan nog nie, omdat dit eers gevorm moet word deur opeenvolgende kernreaksies:



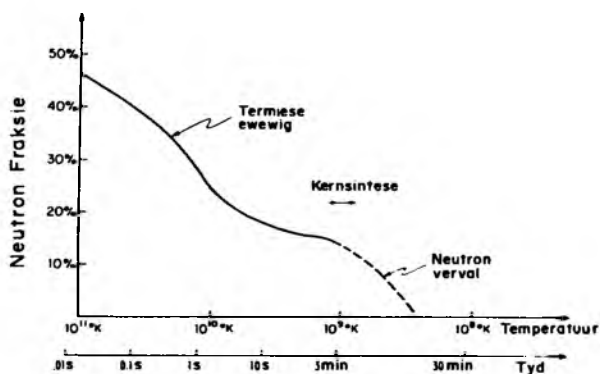
en die deutron wat 'n wesentlike deel van hierdie reeks reaksies is, is egter verreweg te onstabiel om te oorleef.

Die fase wat bekend staan as die "Vuurbalera" kom tot 'n einde. Die natuur bied ons egter nie die geleentheid om die toestand, wat geheers het gedurende daardie merkwaardige maar kort tydjie, te bestudeer nie. Die toestande kan egter nageboots word deur die studie van hoë-energie-swaar-ioonreaksies met groot versnellers, soos byvoorbeeld by die GSF in Darmstadt, Wes-Duitsland.

Nou kom die STRALINGSERA tot 'n einde: die temperatuur het gedaal tot laer as 10^9 K, wat nogtans 70 keer warmer is as die middelpunt van die son. Nagenoeg 3 min. 2 sek. het tot dusver verloop en ons neutron-populasie is nou ongeveer 14% neutrone en 86% protone.

So gou as wat deutronstabiliteit moontlik word, na ongeveer 3 min. 46 sek. en 'n temperatuur van $0,9 \times 10^9$ K, begin kernsintese en ³H, ³He en gevolglik ook ⁴He ontstaan. So gou as wat die toestande geskik is vir ⁴He-produksie, word die oorblywende neutrone vinnig geabsorbeer. Die neutronafname word skematies in fig. 4 aangetoon.

'n Nuwe era begin nou, naamlik die STER-ERA. Omtrent 34 min. 40 sek. het verloop, die temperatuur is nou nagenoeg 3×10^8 K en die digtheid 10% dié



FIGUUR 4: Ontleding van die afname van die neutronkomponent met tyd en temperatuur.

van water. Sintese is beëindig, aangesien daar nie meer neutrone is nie en nou is daar:

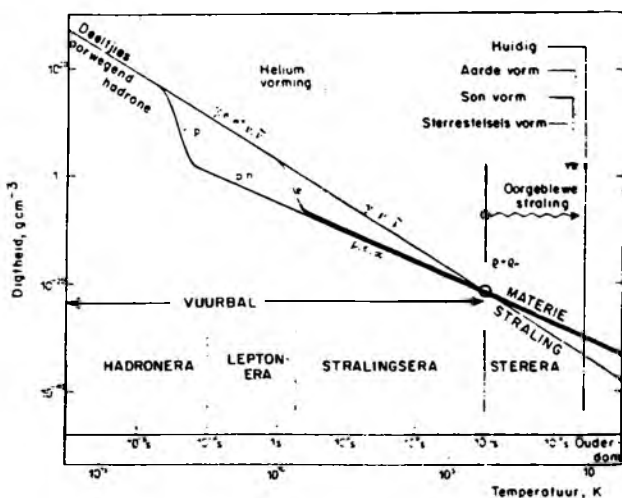
- 22% ⁴He
- 78% p

en

- 31% neutrino's en antineutrino's
- 69% fotone.

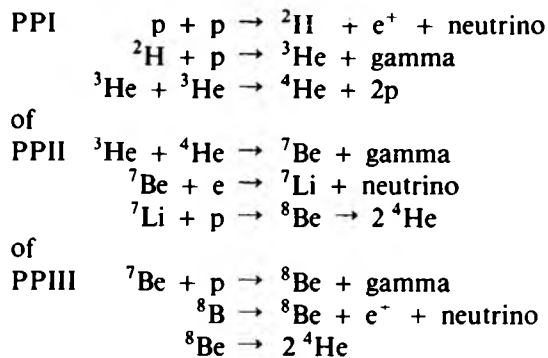
Dit is nog te warm vir die bestaan van atome; nog 700 000 jaar moet verloop voordat atome stabiel kan bestaan.

Die ster-era word gekenmerk deur die oppermag van materie wat deur gravitasie kan lei tot aggragasie en die vorming van sterre, sterrestelsels en planetêre stelsels – en in werklikheid het al hierdie dinge dan ook gebeur. Ons het nog meer as 10³ oorgeblewe fotone per cm³ en 10⁻⁶ nukleone per cm³, 'n verhouding van 10⁹. 'n Beknopte voorstelling van die verloop van sake tot in hierdie stadium word in fig. 5 getoon.

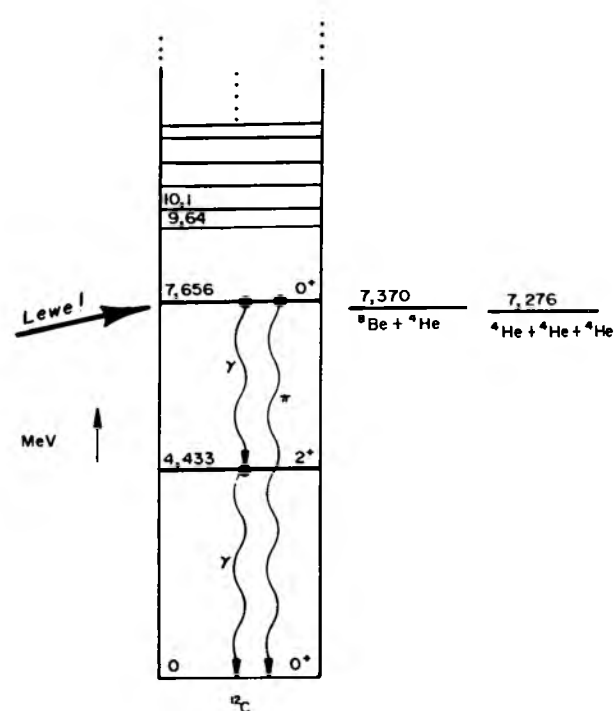
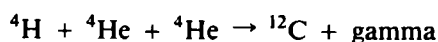


FIGUUR 5: Ewolusie van deeltjie- en fotonkomponente van die heelal (sien verwysing 1).

Met die aggragasie van waterstof, wat oorheersend teenwoordig is, en die invloed van die temperatuur wat nog hoog is, begin STEREWOLUSIE, aanvanklik deur WATERSTOFVERBRANDING. Drie komponente van die PROTON-PROTON-siklus word geïdentifiseer:



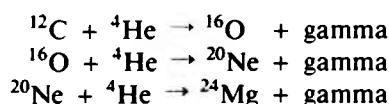
Waterstofverbranding gebruik nie protone op nie, maar stel hulle weer aan die siklus vry. Die produkte van belang is ⁴He en neutrino's. Ons het in werklikheid in 'n ⁴He-siklus beland, maar kan daaruit ontsnap deur HELIUMVERBRANDING:



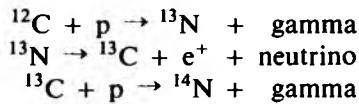
FIGUUR 6: Diagram van die energievakke van die koolstof-12 kern, wat die resonans vir die ⁴He + ⁴He + ⁴He-reaksie aantoon.

'n Baie belangrike aspek van dié reaksie word in fig. 6 getoon (4)- daar is 'n resonans binne 'n paar honderd keV van die som van die rus-massas van die drie ⁴He deeltjies, sodat die waarskynlikheid van die driedeeltjie-reaksie aansienlik verhoog en koolstof-produksie hoofsaaklik daardeur bepaal word . . . 'n baie gunstige eienskap van kernstruktuur insoverre dit die mensdom en die ontwikkeling van lewe betref!

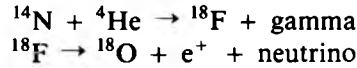
Heliumverbranding speel ook verder 'n baie belangrike rol in die ewolusie van die elemente in die groter aggragasie ster materiaal:



As daar eers koolstof is, tree ook die C-N-O-siklus na vore:

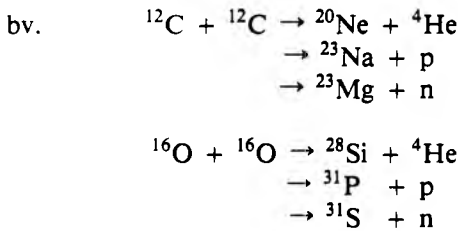


ensovoorts, en ook die produksie van ^{15}N , ^{16}O , ^{17}O . . . kan geredelik aangetoon word. Om terug te keer na heliumverbranding:



ensovoorts. Ook die produksie van... ^{22}Ne , ^{21}Ne , ^{25}Mg ... kan geredelik aangetoon word deur bekende reaksies wat ook in die laboratorium deur 'n aantal navorsers goed bestudeer is.

Die ryke verskeidenheid kernreaksie-fisika wat op die spel is, word weerspieël deur die "Alfaproses", d.i. KOOLSTOF- EN SUURSTOFVERBRANDING:

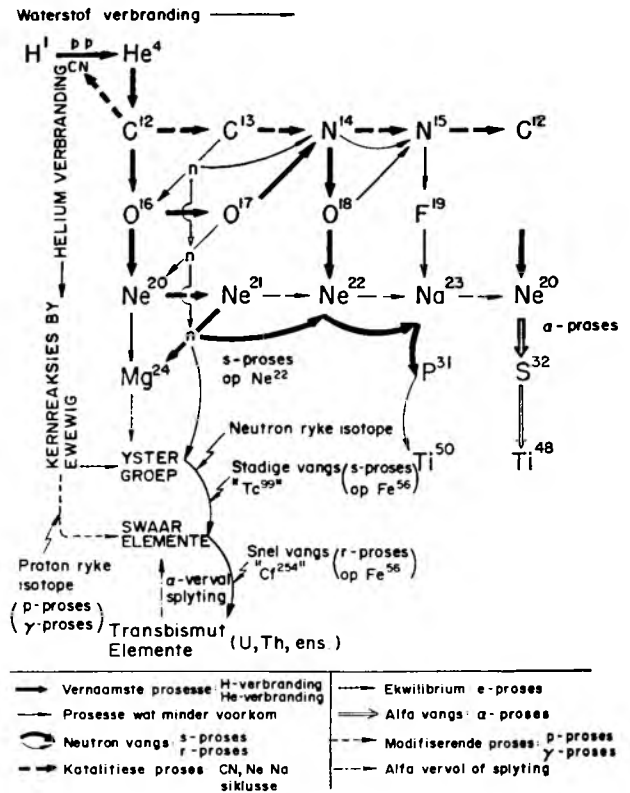


Dit is moeilik om die volle omvang van sterewolusie in kriptiese vorm weer te gee, maar fig. 7 (te danke aan Burbidge, Burbidge, Fowler en Hoyle, verwysing 3) word dikwels gebruik om die ewolusie van die elemente weer te gee. Op hierdie wyse is dit moontlik om die algemene voorkoms-kromme (fig. 8, geneem uit verwysing 3) te reproduseer.

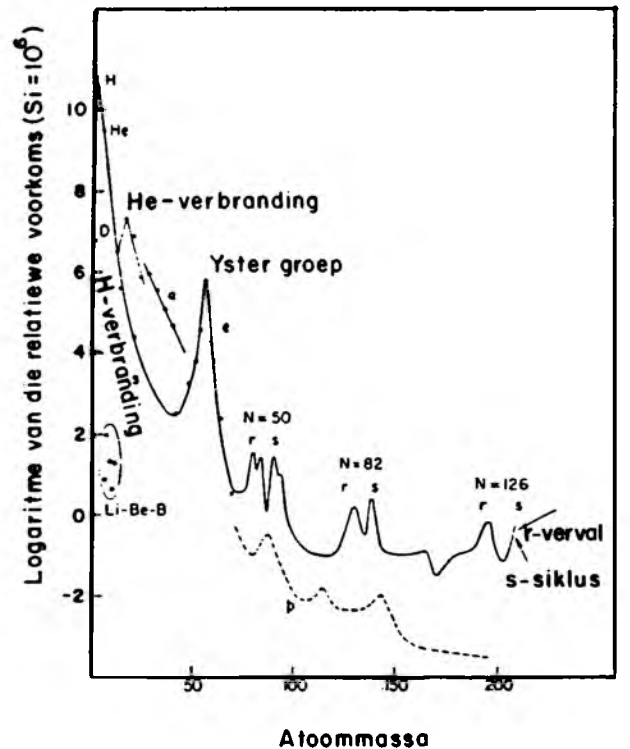
INLIGTING IN DIE NEUTRINO-"SEIN"

Ten spyte daarvan dat slegs 'n beperkte keuse van kernreaksies hierbo aangebied is, is dit duidelik dat neutrino's dikwels uitgestraal word. Ten opsigte van die inleidende PROTON-PROTON-siklus is daar sowel neutrinokontinua as diskrete lyne wat op 'n unieke wyse diagnosties is van die (kern)gebeure wat (byvoorbeeld) in die son plaasvind. Vermoedelik sal die son se neutrinospektrum lyk soos dié in fig. 9. Dit is duidelik dat as dit moontlik is om so 'n spektrum te meet, dit 'n direkte aanduiding van die geldigheid van ons begrip van die kernfisika in die son sal wees.

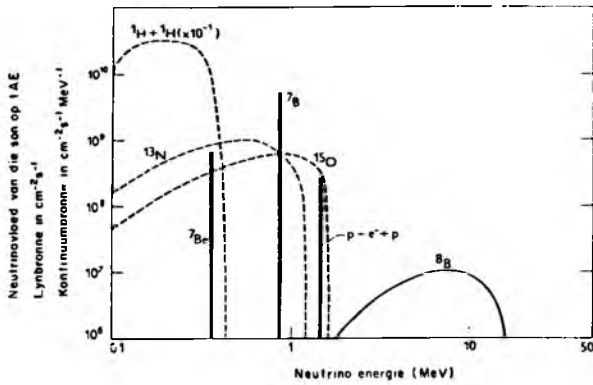
Hierdie onderwerp is van voortdurende belang vir 'n aantal navorsingsgroepe in die wêreld, ook vir die WITS-WNNR-Schonland-Navorsingsentrum vir Kernwetenskappe. Vir baie jare reeds het ons die waarneming van neutrino's wat die aarde se oppervlakte bereik, ondersoek. Die probleem is egter dat die aarde bedek is met 'n kombes, naamlik die atmosfeer, en die primêre kosmiese straling wat hoofsaaklik uit protone bestaan, gee aanleiding tot 'n verskeidenheid kernreaksies, waarvan sommige in



FIGUUR 7: Skematiese diagram van die kernprosesse waardeur elementsintese in die sterre plaasvind (sien verw. 3).



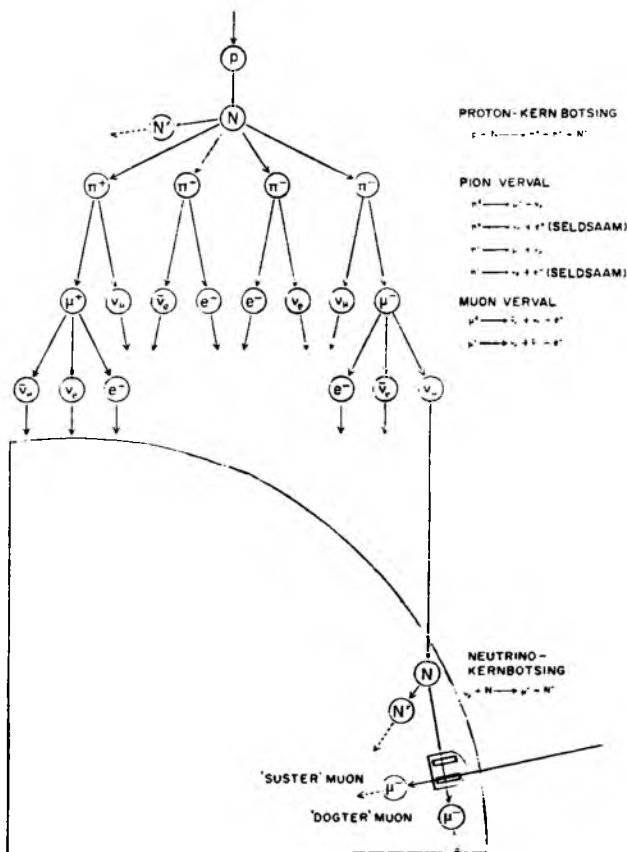
FIGUUR 8: Skematiese kurwe van atoomvoorkoms as 'n funksie van atoommassa. Hierdie algemene voorkomskurwe is hoofsaaklik afgelei van aard-, meteoriese- en sondata en in 'n paar gevalle, van ander astronomiese bronne.



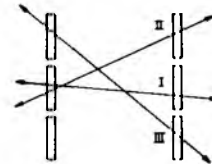
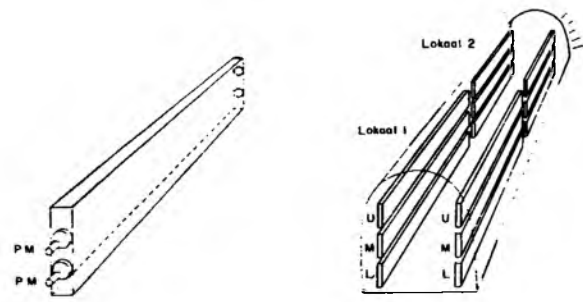
FIGUUR 9: Neutrinospektrum van die son.

fig. 10 getoon word. Uit hierdie reaksies is dit duidelik dat neutrino's geproduseer word. Gevolglik moet 'n neutrinodetektor die neutrino's vanaf die son in 'n oorweldigende see van neutrino's wat deur kosmiese straling in die atmosfeer geproduseer word, opspoor.

By Wits is, oorspronklik in samewerking met die Case-Western Reserve Universiteit te Cleveland, Ohio, en later ook in samewerking met die Universiteit van Californië te Irvine, beide in die VSA, die weg gevolg om diep ondergronds te gaan, deur gebruik te maak van die diep goudmyne in die RSA en meer spesifiek die ERPM-myn te Boksburg. Die



FIGUUR 10: Ontwikkeling van neutrino- en muonkomponente in die aarde se atmosfeer, ingelei deur primêre kosmiese straling asook die logika van die diep detektor in ERPM (Boksburg).

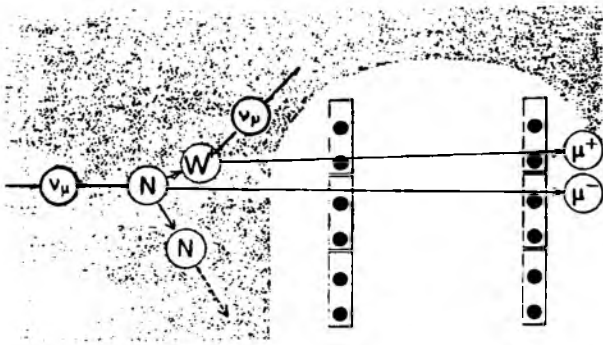


FIGUUR 11: (a) 'n Detektorelement, (b) deel van die detektoropstelling en (c) die hoeklogika van die detektoropstelling in ERPM.

logika van die eksperiment word aangetoon in fig. 10. Alhoewel die vertikale diepte onder die oppervlakte nog te klein is om primêre muone vanaf die atmosferiese bron te absorbeer, sal hierdie muonvloed vinnig afneem as waarneming in 'n horisontale rigting i.p.v. vertikaal geskied. As ons dus muone in die horisontale rigting waarneem, dan is hulle die "dogters" – die gevolg van neutrino-kernbotsings. Ons moet dus die hoekverdeling van muone meet: die eksperimentele opstelling wat gebruik word, word in figure 10 en 11 getoon.

Die enkeldetektorelemente bestaan uit sintillasiestekens wat elkeen gekoppel is aan 4 fotovermenigvuldigerbuise (fig. 11 {a}). Drie tenks is opmekaar gestapel en geplaas op twee rye spore (fig. 11 {b}). Soos uit fig. 11(c) blyk, kan 'n hoekverdeling dus gemeet word. Daarbenewens is die sintillatortenk deur 'n aantal sg. flietsbuise omring sodat die hoekverdeling nog akkurrer bepaal kon word. Soos verwag, het die resultate wat verkry is, getoon dat die hoekverdeling hoofsaaklik 'n konstante komponent vertoon waarop 'n steil, vertikale bydrae gesuperponeer is – eersgenoemde is te danke aan die neutrino-geproduseerde muone, laasgenoemde aan die muone van die atmosfeer. Hierdeur is vir die eerste keer die bestaan van neutrino's in die natuur aangetoon, terwyl die neutrinovloed ook bepaal is (5).

Die neutrino-gebeure is as 'n funksie van aankomsrigting aangedui om moontlike uitstaande warm kolle in die hemelsfeer op te spoor. Binne die grense van die statistiek van hierdie eerste poging tot "neutrinosterrekunde" kon egter geen besliste uitspraak gemaak word nie. Die vraag na neutrino's spesifiek vanaf die son is ondersoek met 'n afsonderlike detektor wat ontwerp is om elastiese verstrooiings van hierdie neutrino's deur elektrone op te spoor. Skattings het aangedui dat, indien die



FIGUUR 12: Getuienis vir die bestaan van die intermedieë vektorboson, W^+ , sal gelewer word as twee amper-parallelle muonbane deur die detektor waargeneem word.

metings suksesvol sou wees, dit na aan ons waarnemingsgrens sou wees. Soos dit was, het ons baie seine gekry, maar niks wat eenduidig aan sonneutrino's toegeskryf kon word nie. Die werk van Davis in die Homestake Gold Mine in die VSA het daarna getoon dat die sonneutrinovloed ten minste 'n faktor 3 minder is as wat voorspel is en sodoende is die wetenskaplike wêreld gekonfronteer met 'n probleem van wesenlike belang.

Die eksperimente in die ERPM-laboratorium het ander data van baie groot belang opgelewer. Dit word aangeneem dat alle kragte bemiddel word deur die uitruiling van een of ander soort "deeltjie": swak kernkrag wat betrekking het op die neutrino-geïnduseerde reaksie waarvoor ons detektor ontwerp is, sal deur die "W"-deeltjie bemiddel word. Die gevolg van die W-deeltjie se bemiddeling van die swak kernreaksie sal, soos in fig. 12 getoon, 'n spesifieke sein wees. Twee muon-gebeure sal gelyktydig in 'n bepaalde geometrie gesien word. Sulke gebeure is gesoek en uit die resultate kon 'n laer grens van 40 GeV vir W vasgestel word. Toe die reuse-versneller-kompleks by CERN 'n paar jaar later in staat was tot genoegsame energie, is aangetoon dat W 'n massa van 81 GeV het.

'n Ander interessante resultaat van die werk was om die data te gebruik om ondersoek in te stel na die verval van die proton. Indien die proton verval, sal dit die nie-behoud van barione impliseer. In tabel 1 word barion nie-behoudmodusse spesifiek vir tweeliggaam-vervalmodusse getoon. Die eerste, mees konserwatiewe ontleding van die data het as 'n laer grens 'n protonleefyd van 2×10^{28} tot 8×10^{29} jaar gelewer. 'n Strenger ontleding gee 'n laer grens van 2×10^{30} jaar. Die huidige teoretiese voorspelling (bekend as minimale SU(5)) plaas die laer grens by $4,5 \times 10^{29}$ jaar en daar is besef dat 'n meer gesofistikeerde benadering nodig is. 'n Paar jaar later het 'n verbeterde eksperiment in die VSA (deur middel van 'n Irvine-Michigan-Brookhaven-samewerking) 'n laer grens van 10^{32} jaar vir die vervalmodus $p \rightarrow e^+ +$ neutrale pion, gelewer. Gevolglik is die saak nog nie beslis nie en soos verwag kan word, is dit die studie-onderwerp in 'n aantal diep gate in die aarde.

TABEL 1
Veronderstelde tweeliggaam-vervalmodusse vir nukleonverval, d.w.s. barion nie-behoud

$p \rightarrow \pi^+ + \nu$	340 MeV	458 MeV
$\rightarrow K^+ + \nu$	105 MeV	339 MeV
$\rightarrow e^+ + \gamma$	469 MeV	469 MeV
$\rightarrow \mu^+ + \gamma$	369 MeV	464 MeV
$\rightarrow e^+$		π^0
<hr/>		
$n \rightarrow \pi^+ + e^-$	340 MeV	458 MeV
$\rightarrow \mu^+ + K^-$	239 MeV	100 MeV

Uitgaande van veronderstelde vervalmodusse: Twee-tenk 1A 45-90°,

$$\tau > 2 \times 10^{28} \text{ tot } 8 \times 10^{29} \text{ jaar}$$

Uitgaande van muon-vervalmodus: Een tenk V dubbel puls,

$$\tau > 2 \times 10^{30} \text{ jaar}$$

GEVOLGTREKKINGS

Die bestudering van die vroeë ewolusie van die heelal, stervorming asook van 'n heel beskeie ster (ons son), bied aan die fisikus 'n ryke en uitdagende navorsingsgebied; 'n gebied wat, alhoewel onwillig, al hoe meer sy geheime prysgee.

BEDANKING

Graag bedank ek dr. R.J.N. Brits en sy kollegas by die Pretoriasiklotron vir die vertaling van die manuskrip.

VERWYSINGS

- Kleczek, J. (1976). *The Universe* (Reidel Publishing Company, Holland).
- Weinberg, S. (1977). *The First Three Minutes* (André Deutsch, London).
- Burbridge, Burbridge, Fowler & Hoyle Rev. Mod. Phys 29 (1957) 547.
- Ajzenberg-Selove, F. Nucl.Phys. A433 (1985) 54-98.
- Reines F. et al. Phys.Rev.Lett 15 (1965) 429-433.
Reines F. et al. Phys.Rev.D4 (1971) 80-98.
Meyer B.S. et al. Phys.Rev. D1 (1970) 2229-2244.