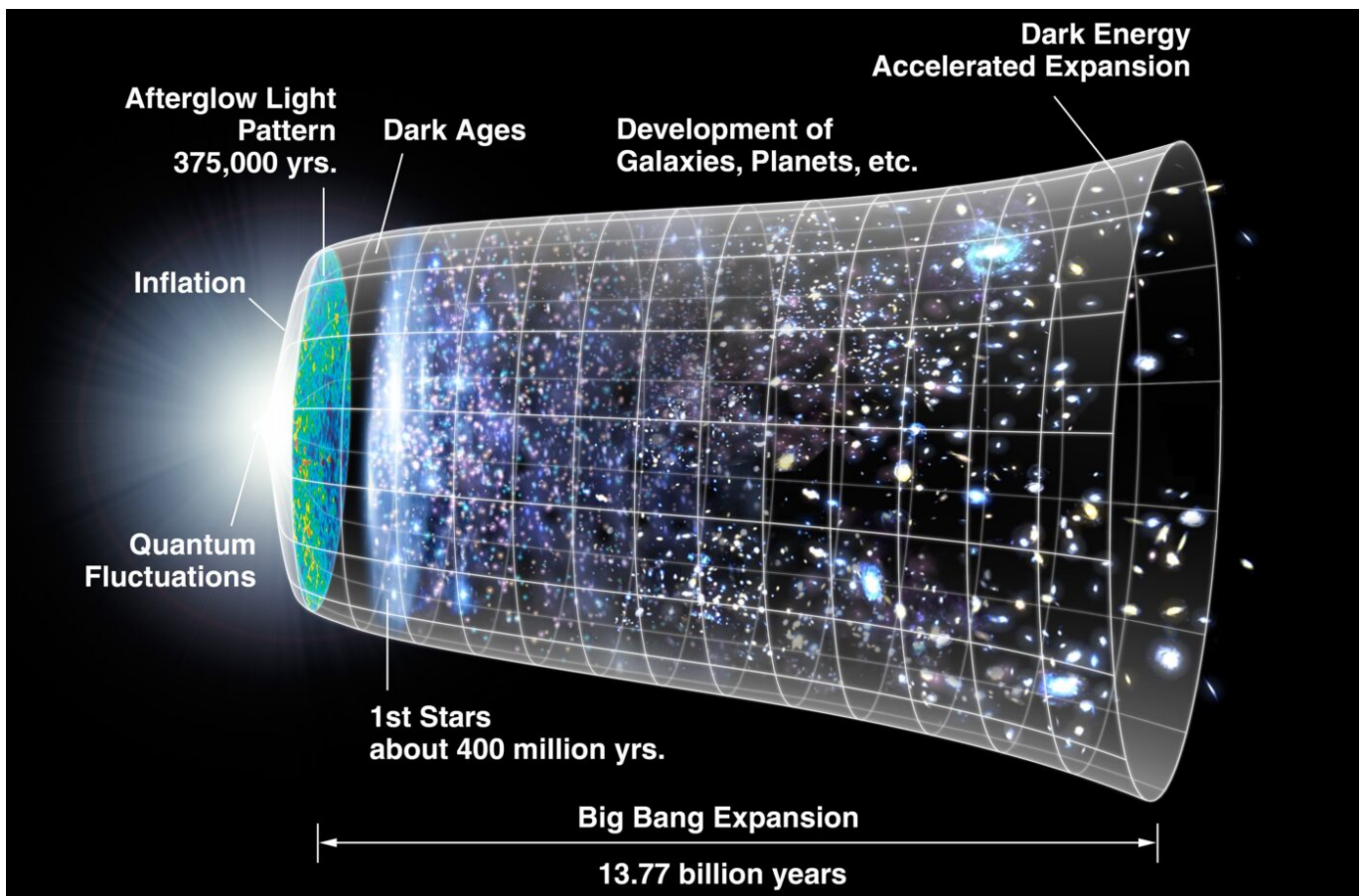


Een seconde na de oerknal

Ongeveer een eeuw geleden formuleerde Aleksandr Friedmann een reeks vergelijkingen die tot op de dag van vandaag een aanzienlijke impact hebben op ons begrip van het heelal. Deze vergelijkingen beschrijven een universum dat 13,8 miljard jaar geleden ontstond, uit een heet en dicht plasma waaruit alle waargenomen licht en materie voortkwam. Een opmerkelijke eigenschap die deze theorie onderscheidt van andere modellen van het heelal is het *uitdijen van de ruimte*.

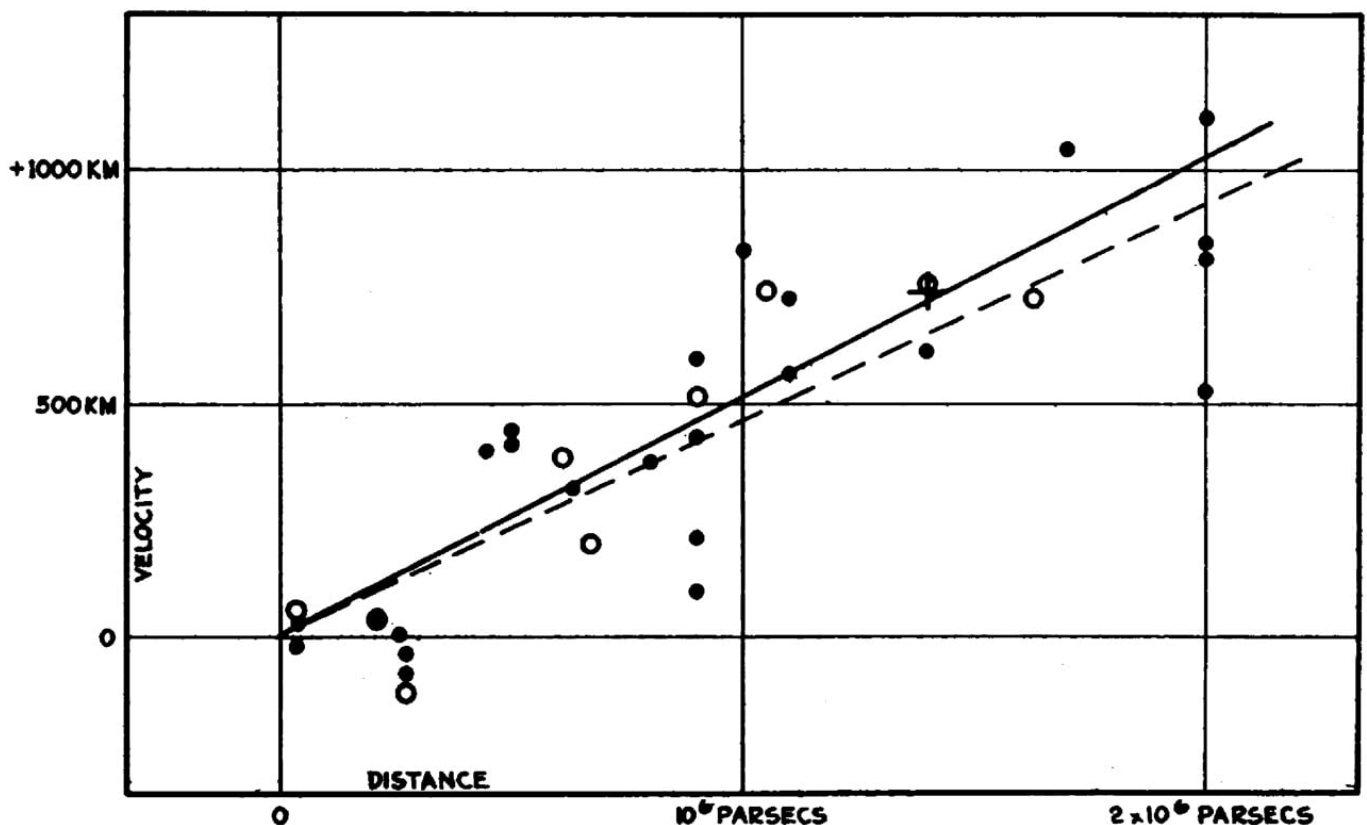


Afbeelding 1. De kosmische tijdlijn. Afbeelding: NASA/WMAP Science Team.

Als de theorie achter Friedmanns vergelijkingen juist zou zijn, zou dat het toenmalige begrip van het universum fundamenteel veranderen. In tegenstelling tot wat veel mensen destijds geloofden, was het heelal niet eeuwig en statisch.

Een bewijs voor het uitdijen

Om de uitdijing te bewijzen moesten astronomen diep de ruimte in turen. Het eerste bewijs kwam enkele jaren na Friedmanns theorie, toen Edwin Hubble ontdekte dat het licht van verre sterrenstelsels een andere frequentie had dan dat van sterrenstelsels dichterbij – een gevolg van de kosmische *dopplerverschuiving*. Dit fenomeen is vergelijkbaar met de lagere frequentie (toonhoogte) van de sirene van een weggrijdende ambulance in vergelijking met een stilstaande ambulance. Hubble zag dat de elektromagnetische golven die hij met een lagere frequentie hadden dan wat je zou meten van een stilstaande stralingsbron. Dit viel niet te verklaren met de Newtoniaanse zwaartekracht, omdat de sterrenstelsels te ver van elkaar waren om interactie te hebben. Het was de zwaartekrachttheorie van Einstein die dit wél kon verklaren, niet door de interactie tussen sterren maar omdat *de ruimte zelf* tussen de sterren aan het uitdijen was!



Afbeelding 2. De oorspronkelijke [plot van Hubble](#). De stippen stellen verschillende hemellichamen voor; de x-coördinaat is hun afstand tot ons en de y-coördinaat geeft aan hoe snel ze zich van ons verwijderen. Hoe groter de afstand tussen ons en de sterrenstelsels, hoe sneller ze van ons af bewegen. Merk op dat de stippen nogal verspreid zijn; het is op het eerste gezicht beslist niet voor 100% zeker dat de schuine lijn een echte trend weergeeft!

Hoewel Hubble bekend is geworden door zijn ontdekking, was het onvoldoende om de concurrerende theorieën te overwinnen die hun eigen verklaringen hadden. De doorslaggevende doorbraak kwam pas decennia later, in 1964, toen de Amerikaanse onderzoekers Arno Allen Penzias en Robert Woodrow Wilson werden geconfronteerd met een raadsel: een onverklaarbaar buitenaards signaal dat hun enorme radioantenne bleef ontvangen. De antenne ontving voortdurend een overvloed van microgolven vanuit alle hemelrichtingen. Het was alsof ze een signaal ontvingen vanuit de duisternis van de ruimte zelf.

Om hun toevallige ontdekking te begrijpen, spoelen we de tijd terug naar 380.000 jaar na de oerknal. Dit is een heel bijzonder moment in de kosmische geschiedenis. Omdat natuurkundigen graag dingen labelen, geven we het een speciale aanduiding: t^* .

Eerste licht

Voorafgaand aan t^* bevond het universum zich in een hete, dichte toestand; een soort *plasma* dat we de ‘oersoep’ noemen. Deze oersoep had een hoge thermische energie (temperatuur), wat leidde tot de vorming van diverse deeltjes, waaronder elektronen, quarks en fotonen (lichtdeeltjes). Ze bevonden zich in een staat van “thermisch evenwicht”, wat betekent dat ze voortdurend met elkaar botsten. De voortdurende botsingen tussen fotonen en andere deeltjes resulteerden in het effectief “gevangenhouden” van de fotonen die anders vrij door de ruimte zouden reizen.

Onder de processen die in deze periode plaatsvonden is de enige die voor ons relevant is de verstrooiing van elektronen door fotonen: $(e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma)$. In deze symbolische weergave wordt het foton aangeduid met het Griekse symbool (γ) en het elektron met (e^-) .

Dit proces, waarbij fotonen voortdurend verstrooid werden door elektronen, was de voornaamste reden waarom fotonen vóór t^* gevangenzaten. Maar hoe zijn ze uiteindelijk ontsnapt? Het voortdurende uitdijen koelde het heelal af totdat de temperatuur een kritisch punt bereikte waar het koud genoeg was voor protonen en elektronen om met elkaar te binden en het eerste element van het periodieke systeem te produceren: waterstof. Dit was een bijzondere gebeurtenis rond t^* waarna ‘loslopende’ elektronen nauwelijks meer te vinden waren in de oersoep. De fotonen werden niet meer tegengehouden; een moment dat

natuurkundigen beschrijven als de “ontkoppeling” van de fotonen van het rest van het universum. Het heelal was nu transparant in plaats van ondoorzichtig.

Deze vrijgekomen “relikwie-fotonen” werden geleidelijk zwakker na miljarden jaren van expansie, waarbij ze verschoven naar het microgolfdomein van frequenties. Ze vormen de *kosmische achtergrondstraling* (CMB), die werd gemeten door Penzias en Wilson. Het was een van de belangrijkste ontdekkingen van de twintigste eeuw en resulteerde in de kosmologische theorie die we tot de dag van vandaag gebruiken. Toch blijft er een bitterzoete nasmaak: als het heelal gedurende de eerste 380.000 jaar ondoorzichtig was, betekent dit dan dat alles vóór t^* voor eeuwig en altijd onbekend zal zijn? Dit is bijna het geval: er is een periode zo vroeg de kosmologische geschiedenis dat we die nooit zullen zien. Maar we kunnen nog vóór t^* kijken, zolang we onze betekenis van “zien” breed houden.

Neutrino's en hun geschiedenis

We kennen nog een ander deeltje, het geniepigste van alle deeltjes: het neutrino. Het heeft zijn reputatie te danken aan zijn zeldzame interactie met... nou ja, alles. Vanuit het perspectief van de vier natuurkrachten: het neutrino voelt geen elektromagnetisme omdat het elektrisch neutraal is, het voelt nauwelijks de zwaartekracht omdat het zeer licht is, en omdat het niet de juiste “lading” heeft voelt het ook niet de sterke kernkracht die de protonen in onze elementen doet kleven. De enige kracht die overblijft om neutrino's te detecteren, is de zwakke kernkracht, een kracht die voornamelijk bekend staat om de rol die erdoor gespeeld wordt in radioactief bètaverval.

Dit is zowel slecht als goed nieuws. Het slechte nieuws is dat neutrino's moeilijk te detecteren zijn. Ze kunnen door een hele planeet gaan zonder enige interactie. Het goede nieuws is dat neutrino's door het hele universum kunnen reizen zonder ooit beïnvloed te worden door iets dat fotonen wel zou stoppen. We kunnen bijvoorbeeld de hoeveelheid radioactief materiaal diep in de aarde of zon afschatten door de neutrino's te bestuderen - iets wat moeilijk of zelfs onmogelijk te doen is met fotonen.

We denken dat het heelal ook “relikwie-neutrino's” heeft voortgebracht. In de vroege stadia bevond het heelal zich in een toestand van thermisch evenwicht, dus waarom zouden die neutrino's niet net als fotonen vast kunnen zitten voor een bepaalde periode?

Het proces is nu: $(\nu + e^- / \gamma \rightarrow \nu + e^- / \gamma)$, waarbij (ν) staat voor het neutrino. Aangezien neutrino's zwakker koppelen aan andere deeltjes dan fotonen, ontsnappen ze veel eerder uit het kosmische plasma: al na één seconde na de oerknal!

Deze neutrino's vormen wat natuurkundigen de kosmische neutrino-achtergrond noemen. (CNB, in contrast met de fotonenachtergrond, de CMB.) Op dit moment kunnen natuurkundigen alleen maar dromen van alles wat we kunnen leren van een CNB-meting. Laten we eens kijken hoe we deze ambitie kunnen realiseren.

De jacht op de CNB

Het daadwerkelijk meten van de CNB is een uitdaging. Hoewel 'gewone' neutrino's al zijn gedetecteerd via onder andere nucleaire centrales en de zon, zijn relikwie-neutrino's veel moeilijker te detecteren omdat na miljarden jaren van uitdijning relikwie-neutrino's weinig energie hebben om interacties te hebben met andere deeltjes.



Afbeelding 3. Op zoek naar de CNB. Een afbeelding van professor Christopher Tully die werkt aan een "bewijs van concept" voor PTOLEMY. Afbeelding: Elle Starkman/PPPL office of

communications.

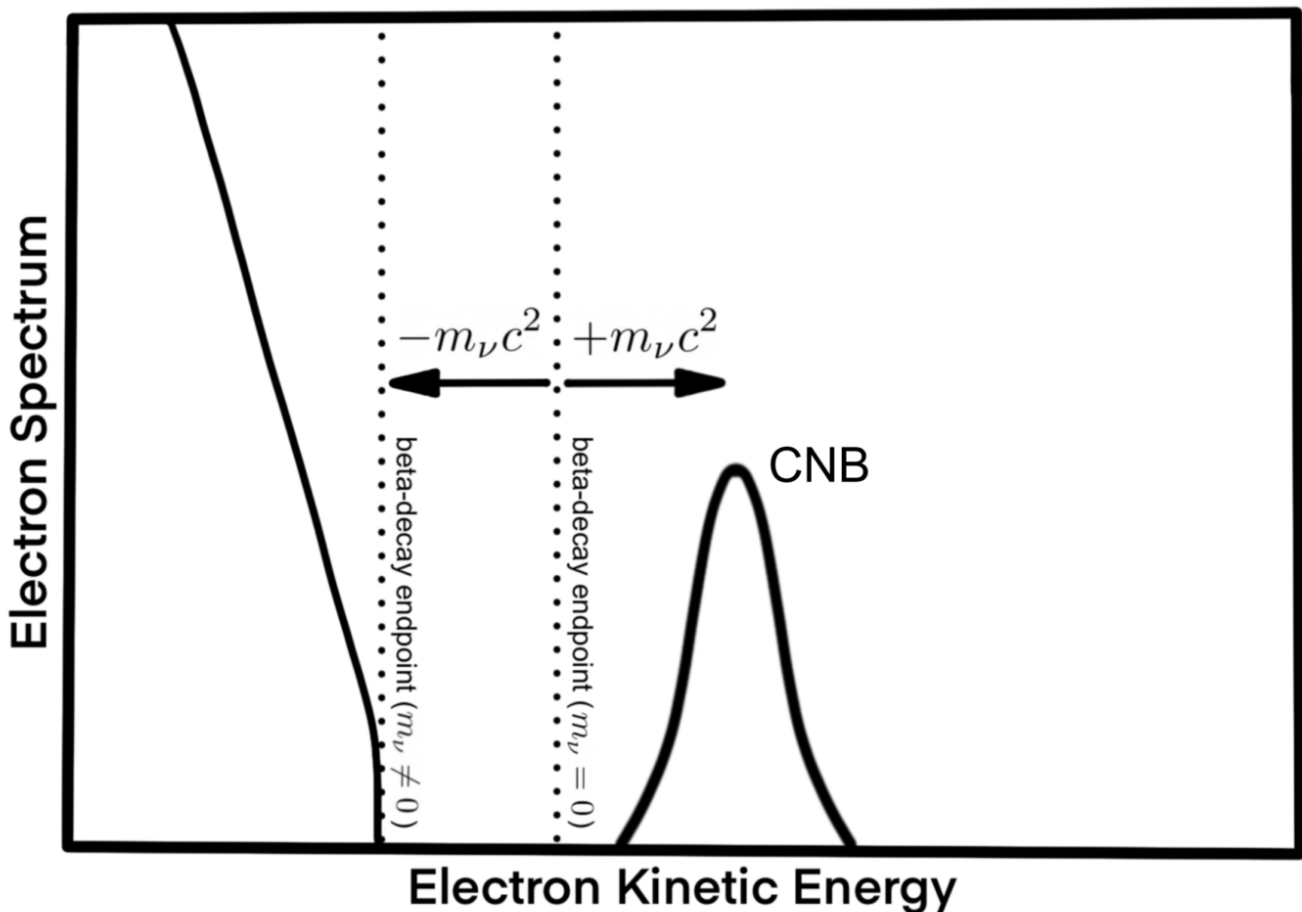
De detectie zou om twee redenen een historisch moment betekenen. Ten eerste zou ons vroegste beeld van het heelal verschuiven van 380.000 jaar na de oerknal naar slechts 1 seconde na de oerknal. Ten tweede zou het meten van een deeltje met zo een geringe energie een record vestigen in het precies bestuderen van de natuur.

De [PTOLEMY-samenwerking](#) wil met haar ontwerp voor een relikwie-neutrinodetector dichterbij dit historische moment komen. Het idee achter PTOLEMY in het kort: het relikwie-neutrino veroorzaakt heel af en toe een kernreactie via de zwakke kernkracht, waarbij een elektron vrijkomt dat we kunnen meten. Aan de hand van de gemeten deeltjes analyseren we vervolgens of er sprake is van een relikwie-neutrino reactie of achtergrondruis.

Om de kernreactie te laten plaatsvinden, is een atoom nodig waarmee het neutrino kan reageren. We maken gebruik van waterstof-3 (ook wel bekend als tritium), een variant van waterstof met twee extra neutronen. Wanneer een relikwie-neutrino waterstof-3 raakt, veroorzaakt het een “inverse bètaverval” waarbij er ook een elektron vrijkomt: $\{{}^3_1\text{H} + \nu \rightarrow \{{}^3_2\text{He} + e^- \}$. Deze reactie werd voorgesteld door Nobelprijswinnaar Steven Weinberg in 1962, zelfs voordat de fotonen-CMB werd ontdekt. Er is echter een complicatie: waterstof-3 is radioactief en ondergaat een natuurlijk bètaverval: $\{{}^3_1\text{H} \rightarrow \{{}^3_2\text{He} + e^- + \overline{\nu} \}$. Gelukkig stelt de wet van behoud van energie ons in staat onderscheid te maken tussen een elektron dat afkomstig is van natuurlijk bètaverval en een elektron dat afkomstig is van een relikwie-neutrino-interactie.

Dat werkt als volgt. Bij het meten van elektronenenergie zien we dat er een maximale energie is die een elektron kan bereiken, afhankelijk van de massa van het neutrino. In regulier bètaverval daalt de maximale energie van het elektron omdat een deel ervan wordt afgegeven aan de massa-energie van het neutrino: $(E_\nu = m_\nu c^2)$, waarbij (m_ν) de neutrinomassa is. In het geval van inverse bètaverval gebeurt het tegenovergestelde: het neutrino geeft zijn massa-energie aan het elektron in plaats van er energie van af te nemen. Tijdens het meten zien we beide vervalprocessen in onze detector. Bij regulier bètaverval zien we een breed spectrum van elektronenergieën omdat in sommige situaties het elektron veel kinetische energie heeft kunnen grijpen van de nucleaire reactie en het

neutrino weinig, of vice versa. Voor inverse bètaverval zien we een enkele piek omdat het elektron nu kinetische energie krijgt van de neutrino en de nucleaire energie niet hoeft te delen. Het eindpunt van het reguliere bètaverval ligt iets eerder dan de piek van het inverse bètaverval, met een energieverval van ongeveer $(2 m_{\nu} c^2)$. Dit biedt ons een methode om het relikwie-neutrino te detecteren. Omdat het relikwie-neutrino energie aan het elektron geeft in plaats van ervan afneemt, kunnen we een piek naast het al bekende reguliere bètaverval-spectrum meten, die alleen veroorzaakt kan worden door inverse bètaverval.



Afbeelding 4. Normaal en inverse betaverval. Een illustratie van het einde van het elektronenergiespectrum. We zien een grote energiedrempel links van het bètaverval en inverse bètaverval, maar we zien ook een piek (afkomstig van inverse bètaverval) veroorzaakt door het relikwie-neutrino. Afbeelding gemaakt door Fabian Zimmer.

Het PTOLEMY-experiment leidt elektronen afkomstig van waterstof-3 naar een elektromagnetisch filter. Dit filter verwijdert elektronen waarvan de energie zich links van de relikwie-piek bevindt en vertraagt elektronen met een energie rond de relikwie-piek. Nadat

de scheiding en vertraging hebben plaatsgevonden, worden de elektronen naar een zeer nauwkeurige calorimeter (energiemeter) geleid. Nu moeten we de detector enkele jaren aan laten staan om zo veel mogelijk relikwie neutrino's te meten. Na een grondige analyse van de gegevens zullen we beoordelen of we erin zijn geslaagd om onze CNB-piek te detecteren.

Het waarnemen van de piek - al zal het zeker nog de nodige jaren duren voor het zover is - markeert het einde van een verhaal. Een neutrino dat sinds het begin van het heelal heeft gereisd vindt zijn einde in een kernreactie op aarde, waarmee het als laatste daad van zijn bestaan getuigt aan de mensheid.