

# ONDERZOEKSOPDRACHT FYSICA

Door Ciaran Van Hoerlande

## Inhoudsopgave

I.	Inleiding .....	3
II.	Hubble en het uitdijend heelal .....	4
	A. Inleiding .....	4
	B. Beperkte taxonomie van hemellichamen .....	4
	C. De geobserveerde roodverschuiving.....	5
	D. De Wet van Hubble .....	6
	E. Partieel besluit.....	8
III.	De snelheid van rood.....	9
	A. Inleiding .....	9
	B. Het Dopplereffect.....	9
	C. Praktische proef .....	10
	D. Besluit.....	11
IV.	Lichtgolven .....	12
	A. Inleiding .....	12
	B. Het probleem van de mechanische golf.....	12
	C. Blauw- en roodverschuiving.....	13
	D. Besluit.....	14
V.	Het waterstofatoom toont de weg .....	15
	A. Eenvoudige radioastronomie .....	15
	B. De waarneming .....	16
	C. Ons melkwegstelsel.....	18

D.	Besluit.....	18
VI.	Besluit.....	19
VII.	Dank- en nawoord.....	20
A.	Edwin Powell Hubble.....	21
B.	Christian Andreas Doppler .....	22

## I. Inleiding

Van jongs af aan ben ik geobsedeerd door het heelal. Het was (en is nog steeds) één van de meest onwaarschijnlijke fenomenen in het leven. Vergeleken met de ruimte is de mens bijna niets.

Toen ik in het begin van het jaar te horen kreeg dat we voor een van de wetenschapsvakken een onderzoeksopdracht moesten maken, koos ik meteen voor fysica. Het zou me de kans geven om me te verdiepen in één van de vele mysteries die de ruimte voor ons in petto houdt. Sinds lang is er een vraag dat me bezighoudt: hoe weten ze met zekerheid dat het heelal aan het uitdijen is? Ik koos dit als mijn onderzoeksvraag.

Ik vermoedde dat het iets had te maken met het Dopplereffect en elektromagnetische golven, maar de details van de oplossing kende ik niet. Ik wou er een antwoord op vinden.



*Figuur 1: Sterrenstelsel in het zichtbaar spectrum.*

## II. Hubble en het uitdijend heelal

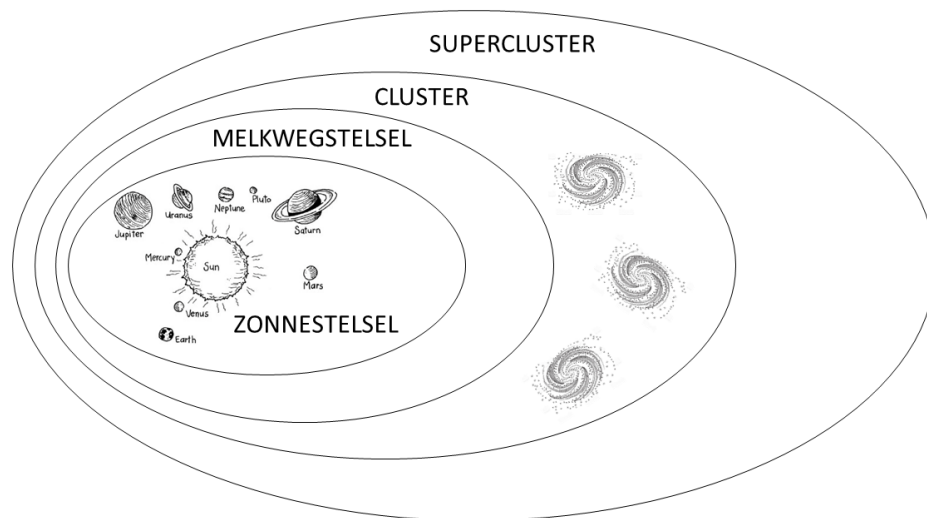
### A. Inleiding

Het concept van de Big Bang dat verteld dat het heelal uit een oerknal ontstaan is, vindt zijn oorsprong in de astronomie. In de jaren twintig observeerden sterrenkijkers een roodverschuiving in het licht van het sterrenstelsel. Edwin Hubble was de eerste die een verklaring voor de verschillende observaties gaf en in een wet goot. Zijn verklaring zou het toen algemeen aanvaard beeld van een statisch heelal omverwerpen. Maar eerste moeten we een paar dingen definiëren.

### B. Beperkte taxonomie van hemellichamen

Het heelal is opgedeeld door de mens in verschillende delen om een duidelijker overzicht te krijgen van de ruimte. Hieronder enkele begrippen die binnen dit werk gebruikt worden.

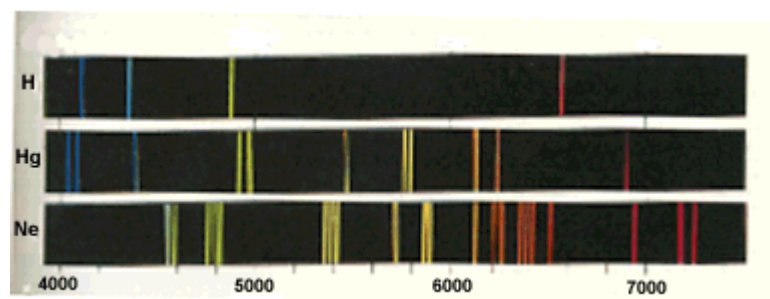
- **Zonnestelsel:** De aarde maakt deel uit van ons zonnestelsel. Een zonnestelsel is de algemene verzamelnaam van een zon (dus ook een ster) waarrond de planeten met hun manen draaien.
- **Melkwegstelsel** of sterrenstelsel: Ons zonnestelsel, samen met andere stelsels, draait rond de kern van ons melkwegstelsel of sterrenstelsel, de Melkweg.
- **(Super)Clusters:** Verschillende melkwegstelsels worden samengenomen in clusters, en deze clusters worden dan weer verzameld in superclusters. Inmiddels zijn er zo'n 27.000 superclusters vastgesteld.



*Figuur 2: Beperkte taxonomie van hemellichamen.*

### C. De geobserveerde roodverschuiving

Door de hoge temperaturen in een ster vindt er kernfusie plaats waardoor massa wordt omgezet in energie, in de vorm van zichtbaar licht. Een deel van dit licht verlaat de ster niet en wordt opgenomen door de elementen in de ster. Een element neemt alleen maar een foton met een bepaalde golflengte op. Elk element heeft dus zijn eigen absorptie golflengte.



*Figuur 3: Spectra van verschillende elementen.*

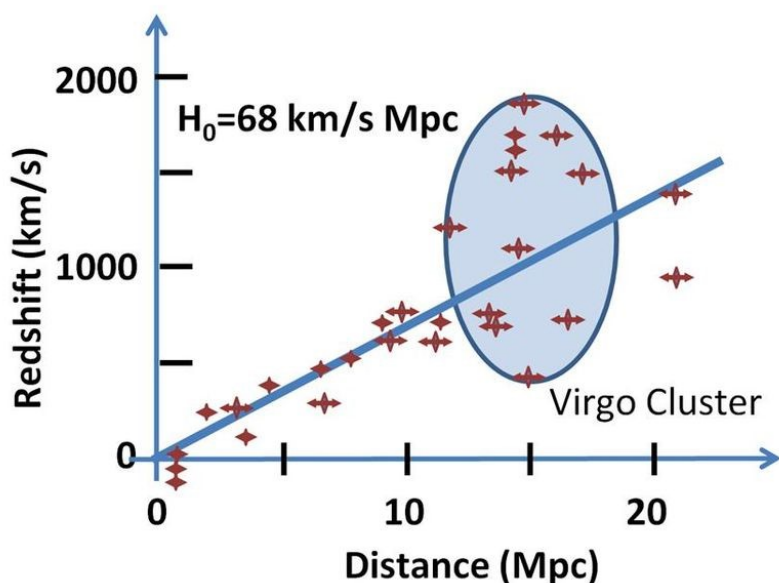
Astronomen zagen dat verschillende melkwegstelsels een roodverschuiving vertoonden. De vergelijking van de uitgezonden spectraallijnen van de elementen op de aarde met de uitgezonden spectrale lijnen van de overeenkomstige elementen in de sterrenstelsels vertoonden immers een verschuiving naar het rood (zie Figuur 4). Er werd geen enkele verschuiving naar het blauw waargenomen.



*Figuur 4: Verschuiving van het spectrum van het licht van een ster naar het rood.*

#### D. De Wet van Hubble

In 1929 probeerde Edwin Hubble<sup>1</sup> zijn observaties van de roodverschuiving van sterrenstelsels en die van anderen zoals V.M. Slipher te verklaren. Hubble berekende de snelheid en de afstand van een melkwegstelsel uit en vond een verband tussen de twee. Hij stelde vast dat de snelheid van verwijdering van een melkwegstelsel groter is naarmate deze verder weg staat. Preciezer, Hubble toonde aan dat de verwijderingssnelheid van de melkwegstelsels recht evenredig is met de afstand van het sterrenstelsel tot aan onze aarde, ongeacht de richting waarin het melkwegstelsel zich tegenover ons bevindt (zie Figuur 5).



*Figuur 5: Afstand en snelheid van sterrenstelsel en de Wet van Hubble.*

<sup>1</sup> Zie bijlage A voor de biografie van Edwin Hubble.

Hubble bracht deze relatie dan samen in de Wet van Hubble:

$$H_o = \frac{v}{d}$$

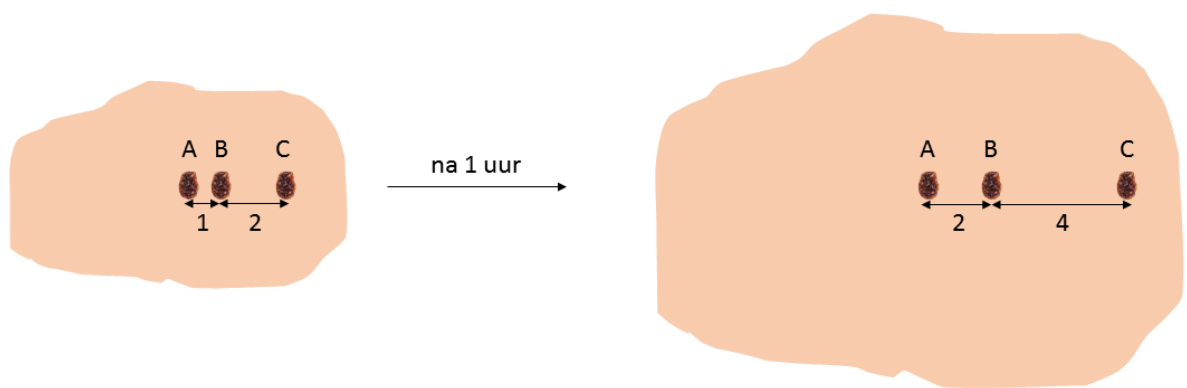
Met  $H_o$  de constante van Hubble  
 $v$  de verwijderingssnelheid  
 $d$  de afstand van de sterrenstelsel tot de aarde

Hoewel astronomen alleen de verwijderingssnelheid van een sterrenstelsel tegenover de aarde kunnen observeren en berekenen en de Wet van Hubble in eerste instantie alleen geldt met de aarde als centraal punt, was er geen enkele wetenschapper die nog geloofde dat onze planeet het centrum van onze zonnestelsel, laat staan van het heelal was. En toch klopte Hubble's wet.

Als alle sterrenstelsels zich van ons verwijderen, dan, als we teruggaan in de tijd, moeten die allemaal vanuit één punt ontstaan zijn. Alle materie waaruit de sterren bestaan moet in het begin der tijden in dat ene punt samengebald zijn. Alles moet met een enorme knal uitgestuurd zijn. De theorie van de Big Bang is dus het rechtstreekse gevolg van de vaststelling van Hubble. Het heelal is nooit statisch geweest. Het is steeds in beweging.

Onze aarde is niet het enig centraal punt, maar alles is het punt van waaruit het heelal ontstaan is. Een goede vergelijking om dit te verklaren en tevens de Wet van Hubble beter te begrijpen is het rijzen van het deeg van een rozijnenbrood. Als je het deeg, na het mengen, laat staan om te rijzen (in ons geval verdubbelt het deeg in omvang in 1 uur), dan zal je observeren dat het deeg tussen elke rozijn uitzet. Je kan ook vaststellen dat de rozijnen zich van elkaar verwijderen – geen enkele rozijn nadert een andere - maar wel aan verschillende snelheden (tegenover B verwijderd A zich met 1 cm/u en C met 2 cm/u). Zoals Figuur 6 toont is de verwijderingssnelheid evenredig met de afstand tussen de rozijnen. Ook kan je waarnemen dat enkel het deeg tussen de verschillende rozijnen uitbreidt en niet de rozijnen zelf. Die laatste blijven even dik.





*Figuur 6: De vergelijking van de expansie van het heelal met het rijzen van rozijnendeeg*

Het deeg van het rozijnenbrood is het heelal en de rozijnen de melkwegstelsels. De ruimte tussen de rozijnen die gevuld zijn met deeg is de ruimte tussen de sterrenstelsels. Deze ruimte vergroot terwijl dat de stelsels, zoals de rozijnen, even groot blijven. De expansie van het heelal betekent dus niet dat de planeten en sterren in het melkwegstelsel zich van elkaar verwijderen, alleen de ruimte ertussen wordt groter. De aantrekking door de zwaartekracht houdt de ruimtelichamen in de stelsels bij elkaar.

#### E. Partieel besluit

Edwin Hubble legde de relatie tussen de waargenomen roodverschuiving in het spectrum van een sterrenstelsel, en dus de verwijderingssnelheid, en de afstand van het stelsel tot de aarde vast. De resulterende wet die zijn naam draagt, leidde rechtstreeks tot de Big Bang theorie en betekende een revolutie in het denken over het heelal. Maar wat is het verband tussen de roodverschuiving en de snelheid van een stelsel?

### III. De snelheid van rood

#### A. Inleiding

Hoe heeft Edwin Hubble een verband gelegd tussen de roodverschuiving en de snelheid van een sterrenstelsel en hierdoor de uitdijing van het heelal vastgelegd? Om dit te verklaren moeten we op bezoek bij de Oostenrijkse natuurkundige Christian Doppler.

#### B. Het Dopplereffect

In 1842 beschreef Christian Doppler zijn bekende principe: het Dopplereffect. Hij voorspelde dat de lengte van een golf uitgezonden van een bron veranderde naarmate de afstand tussen de waarnemer en de bron groter of kleiner werd. Deze theorie werd uitgetest en experimenteel waargenomen in februari 1845 door de Nederlander Christophorus Buys Ballot. Doppler formuleerde met behulp van deze observaties de volgende formule:

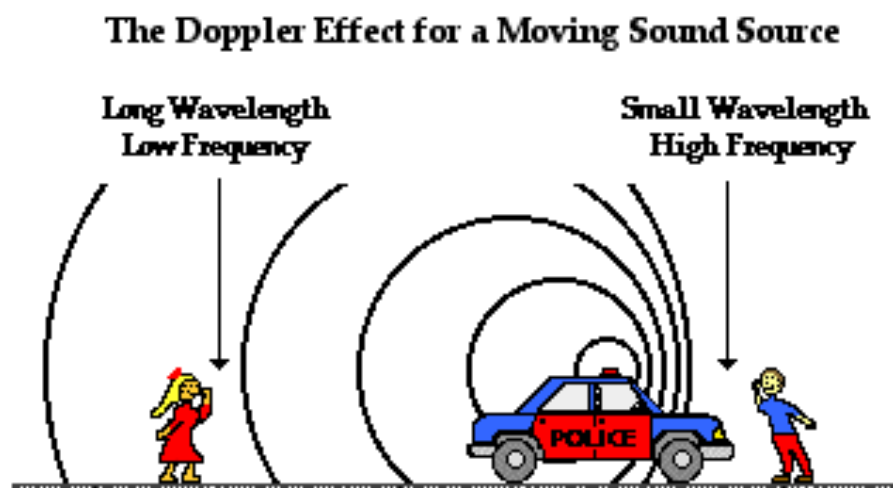
$$f_w = f_b \frac{v + v_w}{v - v_b}$$

Met $f_w$	de waargenomen frequentie
$f_b$	de echte frequentie van de golf die de bron uitzendt
$v$	de voortplantingssnelheid van de golf in het medium
$v_w$	de snelheid waarmee de waarnemer zich beweegt in de richting van de golfbron
$v_b$	de snelheid waarmee de golfbron beweegt in de richting van de waarnemer

Het Dopplereffect kan uitgelegd worden aan de hand van een schip dat vaart wanneer het veel waait en er dus veel golven zijn. Iedere seconde bereikt een golf de boeg van het schip. Nu gaat het schip varen tegen de golven in. Als er nu een golf bij de boeg aankomt, dan duurt het minder dan een seconde voordat de volgende er is. De tweede golf bereikt het schip dan nog eerder dan de vorige golf. De golflengte wordt dus kleiner in de mate waarmee de waarnemer zich naar de bron toe beweegt.

Hetzelfde geldt voor het tegenovergestelde: als het schip nu achteruit, weg van de golven, zou varen, dan duurt het langer dan een seconde voor de eerste golf de boeg van het schip bereikt. De tweede golf zou er dan nog langer over doen. De golflengte wordt dus groter naarmate de waarnemer zich verwijdt van de bron.

In het dagelijks leven kan je het Dopplereffect gemakkelijk waarnemen tijdens het langsrijden van een ziekenwagen of ander prioritair voertuig met sirene (Figuur 7). Wanneer de ambulance naar je toe rijdt lijkt de toonhoogte van de sirene hoger. Eenmaal dat de ziekenwagen is voorbijgereden, neem je een lagere toonhoogte waar. Enkel op het moment dat de ambulance recht tegenover de observeerder 'staat,' hoort die de originele toonhoogte. De toonhoogte van de sirene verandert dus niet. Het verschil wordt veroorzaakt door de beweging van de ambulance.



*Figuur 7: Het Dopplereffect bij de sirene van een prioritair voertuig.*

Het Dopplereffect is afhankelijk van de relatieve, en dus niet de absolute, snelheid van de bron ten opzichte van de waarnemer waarmee de bron of de waarnemer zich voortbeweegt. De formule voor het Dopplereffect lijkt op het eerste zicht hier geen rekening mee te houden. Dit is echter wel het geval en dus belangrijk om dit te weten.

### C. Praktische proef

Ik zelf ben dit nagegaan met een kleine praktische proef. Ik heb een toon met een vaste toonhoogte via YouTube op mijn iPhone gedownload. Vervolgens heb ik mijn iPhone via Bluetooth met mijn muziek box verbonden en deze vastgebonden aan een skateboard. In eerste instantie heb ik gevraagd aan mijn broer om het skateboard met een zo constant mogelijke snelheid langs me te duwen. In het tweede geval was het skateboard in rust en ben ik er met een quasi constante snelheid voorbijgelopen.

Tijdens beide gebeurtenissen heb ik opgemerkt dat als ik (de waarnemer) me verwijder van het skateboard (de bron) of als de bron zich van mij verwijderd, ik een lager toonhoogte (en dus een

lagere frequentie) hoor. Ik nam ook het tegenovergestelde waar: als ik naar het skateboard toe bewoog of de bron bewoog naar mij toe, nam ik een hogere toonhoogte waar.

#### D. Besluit

Door het Dopplereffect weten wetenschappers dat de frequentie van golven veranderen volgens de relatieve snelheid tussen waarnemer en bron. Zou hierdoor de roodverschuiving in het spectrum van sterrenstelsels verklaard kunnen worden?

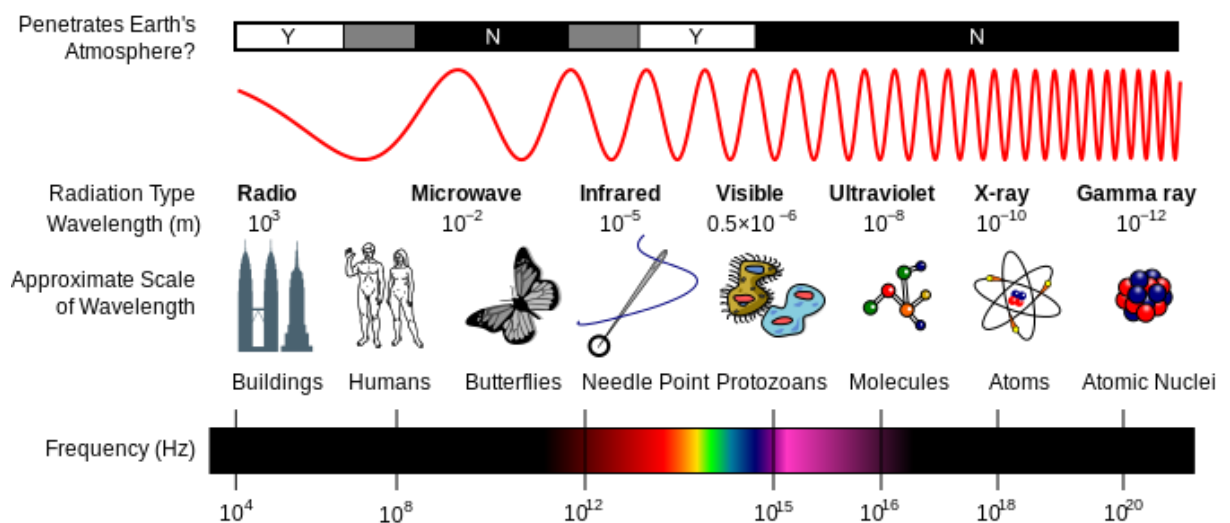
## IV. Lichtgolven

### A. Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we het Dopplereffect bij golven door middel van het geluid uitgelegd. Mechanische golven zoals geluid hebben een middenstof nodig om zich voort te kunnen planten. Er is echter geen middenstof in het heelal. Enkel een 'leegte' met een oneindig kleine dichtheid die quasi nul is en dus een vacuüm benadert. Maar hoe hebben Hubble en andere astronomen dan kunnen besluiten dat andere sterrenstelsels van ons weg bewegen?

### B. Het probleem van de mechanische golf

Het probleem met mechanische golven is dat zij een middenstof nodig hebben om zich voort te kunnen planten. Zo hebben geluidsgolven lucht of glas nodig. Elektromagnetische (EM) golven daarentegen, hebben geen middenstof nodig om zich voort te kunnen planten. Ze kunnen zich dus voortplanten in zowel middenstoffen als in een vacuüm.



Figuur 8: Het EM-spectrum.

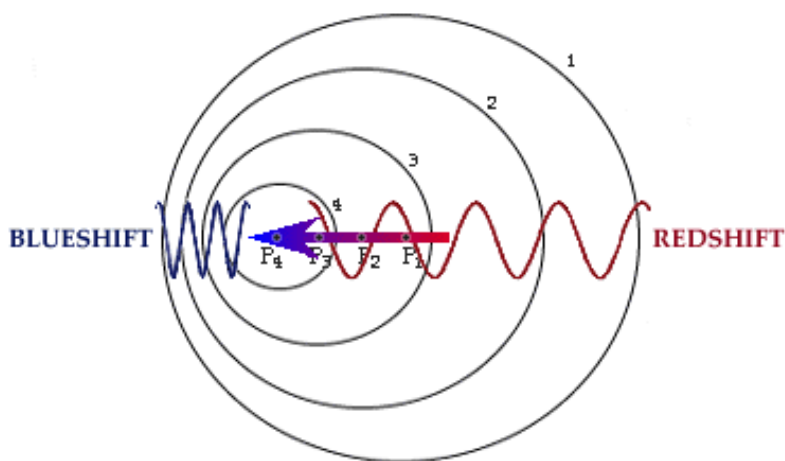
Het elektromagnetisch spectrum is de verzameling van alle mogelijke frequenties van elektromagnetische golven in een vacuüm (Figuur 8). Aan het ene uiteinde ligt de radiostraling met een lage frequentie en een grote golflengte en aan het tegenovergestelde uiteinde ligt de gammastraling met een hoge frequentie en een kleine golflengte. Ergens tussenin ligt het zichtbaar licht, golven die met het blote oog kunnen waargenomen worden. De snelheid voor

alle soorten straling in het elektromagnetisch spectrum is constant. Deze snelheid is gelijk aan  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ , de lichtsnelheid.

In het zichtbaar gedeelte van elektromagnetisch spectrum dat wij licht noemen, komt elke frequentie overeen met een bepaalde kleur. Dus, wanneer de verschillende frequenties van een lichtgolf veranderen door het Dopplereffect, dan verandert de waargenomen kleur. De verandering van kleur hangt af van of het sterrenstelsel van ons weg of naar ons toe beweegt.

### C. Blauw- en roodverschuiving

Zoals Figuur 8 toont zijn lichtgolven EM-golven, en net zoals elke vorm van golven worden ook zij beïnvloed door het Dopplereffect. Zoals in het vorig hoofdstuk aangetoond werd neem je door het Dopplereffect een verschil in toonhoogte waar wanneer bron en waarnemer tegenover elkaar bewegen. Een hogere frequentie in het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum komt overeen met een blauwere kleur (Figuur 9). In dit geval verschuift het spectrum in de richting van de hogere frequenties en spreken we van een blauwverschuiving. Als het tegengestelde plaatsvindt waarbij de bron zich verwijdt van de waarnemer of omgekeerd, dan komt de lagere frequentie overeen met een roodere kleur. We spreken in dit geval van een roodverschuiving.



Figuur 9: Dopplereffect bij lichtgolven.

Door het bestuderen van de spectraallijnen<sup>2</sup> van de verschillende elementen in de kosmos en ze daarna te vergelijken met de spectrale lijnen van dezelfde elementen op aarde, kan men achterhalen of de elementen zich van ons verwijderen of naar ons toe bewegen.

#### D. Besluit

Zoals hierboven vermeld hebben elektromagnetische golven geen middenstof nodig en kunnen ze zich zo zonder probleem voortplanten in de ruimte. Elke ster in een melkwegstelsel zendt een breed gamma aan EM-golven uit. Bij het bestuderen en vergelijken van de verschillende spectra werd een verschuiving naar lagere frequenties van het spectrum, naar het rood, waargenomen. Dit betekent dat de sterrenstelsels van ons weg bewegen. Geen melkwegstelsel vertoont echter een blauwverschuiving, wat erop duidt dat het heelal zich langzaam maar zeker aan het uitbreiden is.

---

<sup>2</sup> Een spectraallijn is de amplitude bij een bepaalde frequentie van een golf.

## V. Het waterstofatoom toont de weg

Omdat melkwegstelsels verschillende spectraallijnen uitzenden is het nogal moeilijk om dit concreet uit te leggen in het kader van mijn onderzoeksoopdracht. Ik ben op zoek gegaan naar een andere manier die makkelijker uit te leggen valt en toch past binnen de onderzoeksoopdracht. Hierbij kwam ik terecht bij radioastronomie.

### A. Eenvoudige radioastronomie

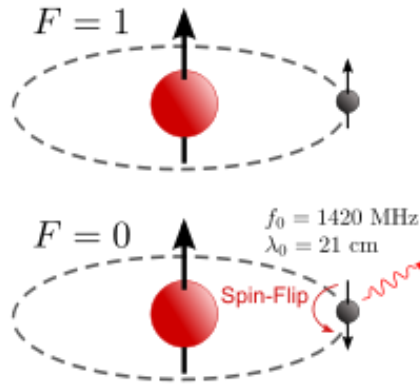
Met behulp van radioastronomie kunnen wetenschappers de relatieve snelheden van materie meten. Ze gebruiken hiervoor geen telescopen om het zichtbaar licht te bestuderen maar maken gebruik van radiogolven. Deze golven zijn ook onderhevig aan het Dopplereffect en vertonen ook de 'roodverschuiving' bij de analyse van de spectra van de verschillende melkwegstelsels.

Naast sterren en planeten bevat het heelal enorme hoeveelheden moleculaire gaswolken. Die gaswolken bestaan bijna uitsluitend, ongeveer 99,98%, uit waterstofatomen ( $H$ )<sup>3</sup>. Het atomaire waterstof is het eenvoudigste element dat er bestaat en bevat één elektron in een orbitaal rond één proton. In de ruimte worden deze waterstofatomen blootgesteld aan verschillende soorten stralingen van energie. Fotonen, pakketjes energie, botsen met de waterstofelektronen, die de energie van het foton opnemen. Deze extra energie zorgt er in de meeste gevallen voor dat het elektron van spin verandert. Na zeer lange tijd, miljoenen jaren, geeft het elektron deze energie weer af en zendt daarbij een foton uit. De uitgezonden energie in de vorm van een foton aan de snelheid van het licht komt overeen met een EM-golf aan een welbepaalde frequentie. Deze frequentie is gelijk aan 1420,406 MHz.

---

<sup>3</sup> Het betreft hier wel degelijk atomen en niet moleculen  $H_2$ .





*Figuur 10: Spinwissel van het waterstofelektron en uitstoot van energie.*

Door de massale hoeveelheid aan waterstofatomen in de gaswolken komt de samenvoeging van de energie-uitstootjes van de individuele atomen overeen met een continu radiosignaal. Omdat het hier om een signaal met één frequentie gaat, is iedere verschuiving door het Dopplereffect gemakkelijk waar te nemen.

## B. De waarneming

De waarneming van de energie-emissie van waterstofwolken gebeurt met een radio-interferometer. Dit instrument bestaat uit minstens twee radiotelescopen. De radiotelescopen te Broechem hebben een kijkhoek (elevatie) instelbaar tussen  $20^\circ$  en  $116^\circ$ . Deze staan op een zekere afstand van elkaar opgesteld. Door de constructie van de radiotelescopen worden alleen signalen in de band rond 1420,406 MHz ontvangen<sup>4</sup>.

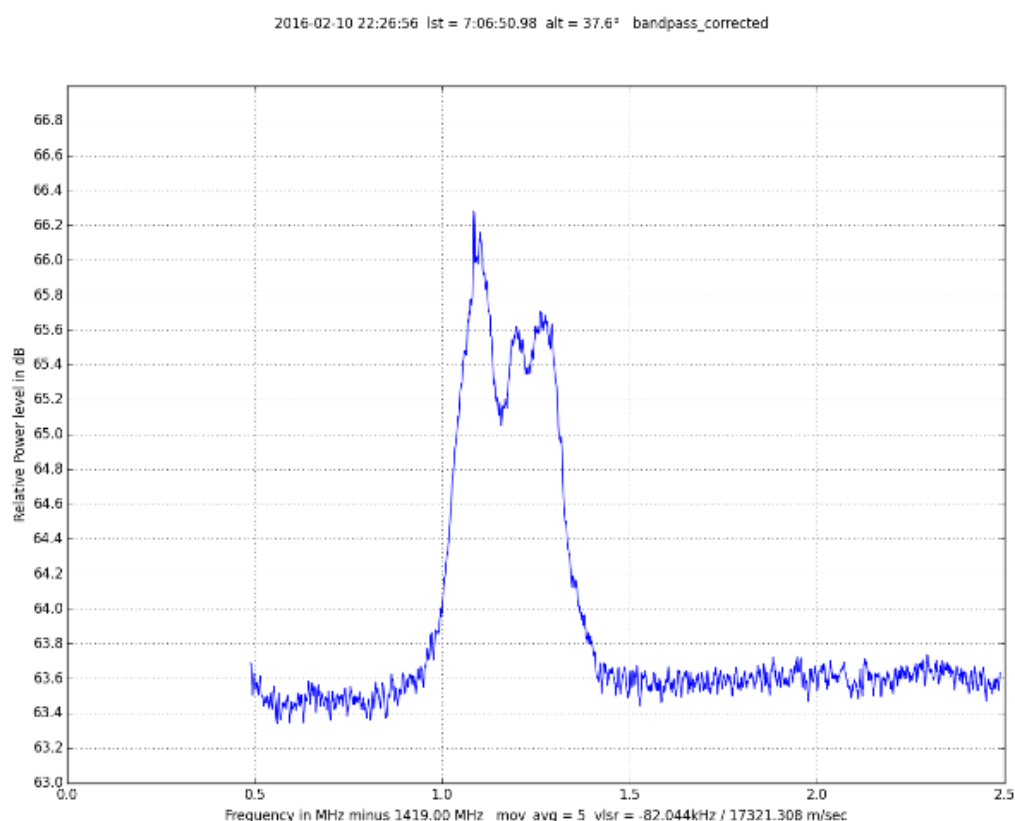


De signalen die worden opgevangen door beide telescopen moeten op een correcte manier gecombineerd worden. De signalen worden door de radio-interferometer doorgestuurd naar een computer die de signalen 'ijkt' in een spectrum. Door de afwijkingen van de ideale frequentie te bestuderen kunnen de bewegingen van de wolken bepaald worden.

<sup>4</sup> Een andere band is eveneens mogelijk, maar de bespreking ervan valt buiten dit werk.

Zoals Figuur 11 toont is het spectrum van het ontvangen signaal geen simpele lijn zoals volgens de theorie te verwachten valt. Immers het ideaal signaal zou een rechte lijn op de frequentie 1420,406 MHz moeten zijn.

Echter, binnen een wolk bewegen de waterstofatomen zich met verschillende snelheden waardoor er 'ruis' op het signaal komt. Bijkomende ruis wordt veroorzaakt door allerlei andere hemelementen die zich bewegen in de kijkhoek van 3° van de telescopen. Ook andere storingen zorgen voor vervorming van het signaal. Toch zijn er duidelijk 3 pieken te zien.



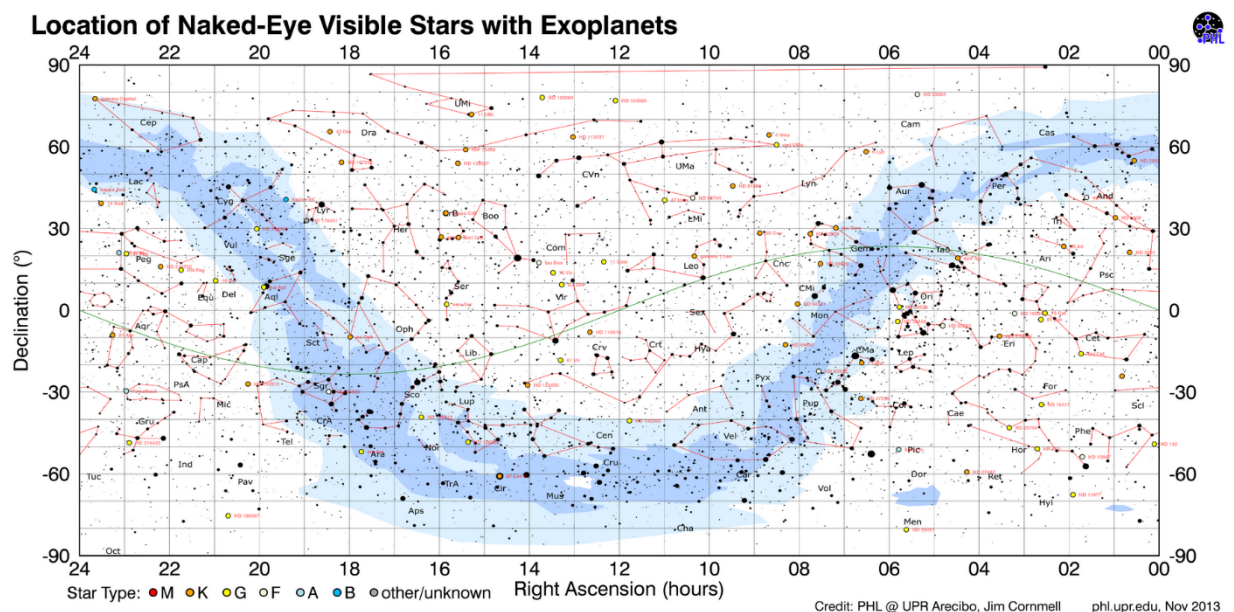
*Figuur 11: Ontvangen spectrum van een interstellaire waterstofwolk.*

Elk van deze pieken vertegenwoordigt een grote massa aan atomaire waterstof. Omdat de frequenties lager dan die van stationair waterstof is, kunnen we besluiten dat deze massa's zich van de aarde weg bewegen. Dit spectrum is afkomstig van een observatie in het vlak van onze Melkweg en zijn daardoor waarschijnlijk afkomstig van de armen van de Melkweg.

Deze figuur toont duidelijk aan dat we met de energiegolf uitgezonden door waterstofatomen de relatieve bewegingen kunnen meten.

### C. Ons melkwegstelsel

Met behulp van radioastronomie wordt onze Melkweg met in het centrum het zwarte gat Sagittarius A in kaart gebracht. Dit gebeurt door de beweging van de sterrenstelsels te observeren. Door te zien welke stelsels zich van ons zonnestelsel verwijderen en welke er naar ons toe bewegen kan men deze stelsels groeperen in armen. Figuur 12 geeft een idee van de complexiteit van onze Melkweg.



*Figuur 12: De Melkweg volgens de radio-astronomie.*

### D. Besluit

De praktische toepassing van het meten van de radiostraling van interstellaire waterstofwolken toont aan dat het Dopplereffect effectief kan gebruikt worden om de relatieve beweging van hemellichamen aan te tonen. De snelheid kan bepaald worden door het meten van de verandering in frequentie tegenover de stationaire, gekende frequentie.

## VI. Besluit

Het onderzoek naar de uitdijing van het heelal begon bij de vaststelling van Hubble. Samen met andere astronomen nam hij een verandering in de spectra van verschillende melkwegstelsels waar. Hij observeerde bij elk van de sterrenstelsels een roodverschuiving. Hij formuleerde vervolgens zijn bekende wet van Hubble, die stelt dat hoe verder een melkwegstelsel afgelegen is, hoe groter de verwijderingssnelheid van dat sterrenstelsel is.

Een paar jaar voor Edwin Hubble leefde Christian Doppler, de Oostenrijkse natuurkundige aan wie men het Dopplereffect te danken heeft. Met het Dopplereffect beweerde hij dat de waargenomen frequentie van een eentonige bron zou veranderen in functie van de relatieve snelheid van de waarnemer tegenover de bron. Zijn hypothese werd in 1845 experimenteel getest en bevestigd door de Nederlandse wetenschapper Christophorus Buys Ballot.

In de jaren twintig breidde Edwin Hubble de toepassing van het Dopplereffect uit naar de kosmos en de beweging van hemellichamen. In tegenstelling tot mechanische golven zoals het geluid hebben elektromagnetische golven geen middenstof nodig om zich te kunnen voortplanten. Aangezien het heelal een quasi-vacuüm is, kunnen enkel elektromagnetische golven met gemak door de ruimte reizen. Licht, in feite een samenstelling van golven, is ook onderhevig aan het Dopplereffect. Een hogere waargenomen frequentie stemt overeen met een blauwverschuiving en een lagere met een roodverschuiving.

Binnen dit werk was de bespreking van de door astronomen vastgestelde roodverschuiving in het zichtbaar spectrum te moeilijk om praktisch aan te tonen. Daarom werd met behulp van de verschuiving van de frequentie van het radiosignaal uitgezonden door interstellair waterstof de mogelijkheid tot snelheidsmeting besproken. Bij het observeren van de radiogolven van sterrenstelsels met behulp van een radio-interferometer wordt een gelijkaardige roodverschuiving waargenomen. Tevens biedt radioastronomie de optie om de Melkweg in kaart te brengen.

## VII. Dank- en nawoord

Ik ben zeer tevreden over het eindresultaat van mijn onderzoeksoopdracht. Ik weet nu hoe men vast heeft gesteld dat het heelal stilaan aan het uitbreiden is. Ook al heb ik geen grootschalige praktische proef omdat ik een onderwerp heb gekozen dat zeer theoretisch is, ik vond het uiterst tof om eraan te werken. Natuurlijk kon ik dit niet allemaal zonder de hulp van sommige mensen, dus daarom ga ik ze even vermelden.

Eerst zou ik graag de volkssterrenwacht Urania in Hoof bedanken voor hun uitstekende uitleg over radioastronomie en de uitbreiding van het de ruimte. Ook al begreep ik niet alles vanaf het eerste woordje uitleg, ik ben hen zeer dankbaar voor de informatie die ze me hebben doorgespeeld. Na hen te gesproken hebben voor twee uur, stuurde ze me ook nog een heleboel materiaal door via mail die me konden verder helpen met mijn onderzoek.

Vervolgens zou ik graag mijn leerkracht fysica, Bert Geens, even vermelden voor zijn hulp. Niet alleen heeft hij me erg geholpen door de lessen kwantummechanica aan onze klas te geven, ook heeft hij af en toe tijd uit zijn drukke schema genomen om de onderwerpen die aan bod kwamen in mijn onderzoek met me te overlopen. Bovendien heeft hij me genoeg tijd gegund om aan mijn verslag te werken.

Als derde wil ik graag mijn klasgenoten bedanken. Zij hebben me prima gesteund en geholpen waar ik het nodig had. Ook hebben ze me eraan doen herinneren dat ik zeker nog een praktische proef in mijn onderzoek moest verwerken zodat ik daar geen punten aan verloor. Ze hebben zelfs enkele voorstellen van proefjes gedaan.

Om het af te sluiten zou ik graag mijn familie, specifiek mijn papa, bedanken voor de steun. Mijn vader was mijn taxichauffeur, tolk en verbeteraar. Hij heeft tijd voor me vrijgemaakt om te overleggen en me verder te onderwijzen over mijn onderwerp. Zonder hem had ik mijn onderzoeksoopdracht zeker nooit tot een goed einde gebracht.

Ter conclusie heb ik ervan genoten om wat bij te leren over het heelal. Het mocht dan wel heel theoretisch zijn, ik vond het fijn om te ontdekken hoe men net weet dat het heelal uitdijt. Ik hoop in de toekomst zeker nog meer te weten te komen over ons universum.

## Bijlage A: Biografieën

### A. Edwin Powell Hubble



Edwin Powell Hubble, geboren in Marshfield, MO op 20 november 1889 en gestorven in San Marino, CA op 28 september 1953, was een Amerikaans astronoom en kosmoloog. Als zoon van John Powell Hubble en Virginia James Lee, was Edwin in zijn jongere dagen beter gekend voor zijn atletische prestaties in plaats van zijn intellectueel vermogen. Hij speelde honkbal, football en basketbal zowel in high school als in college.

Hij studeerde wiskunde en astronomie aan de University of Chicago en behaalde zijn bachelorsdiploma in 1910. De daaropvolgende drie jaar ontving hij een Rhodesbeurs om rechten en Spaans te gaan studeren aan de The Queen's College in Oxford, Engeland. In 1913, studeerde hij af met een M.A. (Master of Arts) diploma. Edwins vader stierf in de winter van 1913, en dus toen Edwin zijn diploma in de zomer van 1913 had ontvangen, besloot hij terug te keren naar de Verenigde Staten van Amerika om voor zijn moeder, twee zussen en jongere broertje te zorgen. Omdat hij de motivatie om rechten verder te studeren niet had, koos hij ervoor om leerkracht Spaans, fysica en wiskunde te worden aan de New Albany High School in New Albany, Indiana. Bovendien coachte hij daar ook het jongens basketbalteam. Na een jaar onderwezen te hebben, ging Edwin astronomie verder studeren in het Yerkes Observatory van de Universiteit of Chicago, waar hij in 1917 dan zijn doctoraat (PhD) ontving. Toen de VS in 1917 oorlog aan Duitsland verklaarde, spoedde Edwin zich om zijn proefschrift *Photographic Investigations of Faint Nebulae* (Fotografisch onderzoek naar zwakke nevels) af te werken zodat hij zich kon aansluiten bij het leger. Hij werd toegewezen aan de 86<sup>ste</sup> divisie, waarin hij zich vervolgens naar boven zou werken naar de rang van luitenant-kolonel. De 86<sup>ste</sup> divisie *never saw combat, however*. Na de Eerste Wereldoorlog hervatte Edwin zijn astronomiestudies in Cambridge. Een jaar later, in 1919, werd hij overgehaald door George Ellery Hale om naar het Mount Wilson Observatory van het Carnegie Instituut in Pasadena in Californië te komen. Hier had Edwin toegang tot de krachtigste telescoop van de wereld, de 100-inch Hookertelecoop, waarmee hij het bestaan van wazige nevelvlekken heeft kunnen bewijzen. Kort voor zijn dood werd de bouw van de 200-inch Hale telescoop voltooid en werd hij de eerste astronoom om ermee te werken. Edwin Hubble bleef bij de Mount Wilson sterrenwacht werken tot aan zijn dood in 1953.

## B. Christian Andreas Doppler



Christian Andreas Doppler, geboren in Salzburg, Oostenrijk op 29 november 1803 en gestorven in Venetië, Italië op 17 maart 1853, was een Oostenrijkse wis- en natuurkundige. Christian werd geboren in de bekende Dopplersteenhouwersfamilie als derde kind en tweede zoon van Johann Evangelist Doppler en Theresia Seeleithner. Hij had een tengere en slanke lichaamsbouw waardoor hij ongeschikt was voor een beroepscarrière als steenhouwer en zijn vader besloot hem naar Simon Stampfer, een Oostenrijkse wiskundige, landmeter en uitvinder, te sturen. Deze ontdekte echter snel Christians gave voor wiskunde en fysica. Op aanraden van Stampfer ging Christian dan wis- en natuurkunde studeren aan het Polytechnisch Instituut in Wenen. In 1835 nam Christian een academische positie in het Czech Technical University aan. Hij was een strenge professor die niet echt geliefd was door zijn studenten. Zes jaar later, toen hij 38 jaar oud was, gaf Christian een lezing aan de "Königlich Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften" in Praag en publiceerde hierop volgend zijn wetenschappelijk werk *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels* (Over het gekleurde licht van dubbelsterren en enkele andere sterren van de hemel). In zijn publicatie begon Doppler met een herhaling van de reeds gekende theorie over de golflengte van licht en hoe dat de kleur van licht afhankelijk is van de frequentie. Vervolgens legde hij zijn nieuwe principe, het hedendaags geclassificeerde Dopplereffect, uit. Tijdens zijn leraarsjaren in het Czech Technical University publiceerde hij nog zo'n 50 artikels over wiskunde, natuurkunde en astronomie. Doppler's onderzoek werd onderbroken door de Hongaarse Revolutie in 1848, en ter gevolg van de revolutie vluchtte hij naar Wenen. Daar beïnvloedde hij, samen met Franz Unger, de ontwikkeling van Gregor Mendel, de grondlegger van de genetica. Doppler stierf op 49-jarige leeftijd aan een longziekte.

## Bijlage B: Bronnen

<https://www.urania.be/astronomie/sterrenkunde/heelal/uitdijing>

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Wet\\_van\\_Hubble](https://nl.wikipedia.org/wiki/Wet_van_Hubble)

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Dopplereffect>

<http://www.sterrenkunde.nl/anw/hubble.html>

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Edwin\\_Hubble](https://nl.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble)

<http://www.absolutefacts.nl/wetenschap/data/hubbleedwin1889.htm>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin\\_Hubble](https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble)

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Christian\\_Doppler](https://nl.wikipedia.org/wiki/Christian_Doppler)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Christian\\_Doppler](https://en.wikipedia.org/wiki/Christian_Doppler)

<https://www.biography.com/people/christian-doppler-9277346>

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Dopplereffect>

<http://www.sterrenkunde.nl/index/encyclopedie/doppler.html>

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterstof\\_\(element\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterstof_(element))

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Moleculaire\\_wolk](https://nl.wikipedia.org/wiki/Moleculaire_wolk)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_line](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_line)

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Melkweg\\_\(sterrenstelsel\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Melkweg_(sterrenstelsel))

[https://nl.wikipedia.org/wiki/Sagittarius\\_A\\*](https://nl.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*)

Bezoek aan de Volkssterrenwacht Urania

Documentaire Genius by Stephen Hawking S01E04 Where Did the Universe Come From?