

NOVALAB

GEEF STERRENKUNDE DE RUIMTE!

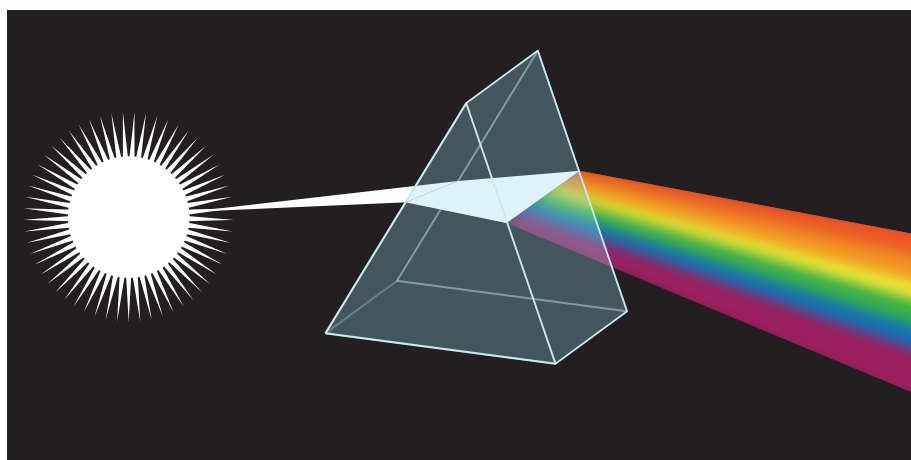
Deze NOVALab-oefening gaat over spectroscopisch onderzoek van sterlicht. Het is een vervolg op de lesbrief Onderzoek de Zon.

De oefening is bedoeld voor de bovenbouw HAVO/VWO.

SPECTROSCOPISCH ONDERZOEK VAN STERLICHT

INTRODUCTIE

Zonlicht is een mengsel van veel kleuren licht. Elke kleur licht heeft zijn eigen hoeveelheid energie en een bijbehorende golflengte. Op het eerste gezicht is dit niet te zien, maar wanneer we zonlicht door een prisma laten vallen, wordt dit duidelijk. In figuur 1 is een voorbeeld van een prisma te zien. Het zonlicht valt op het prisma. Het prisma breekt het licht, dat als een regenboog aan kleuren het prisma verlaat. Deze 'uit elkaar gevallen', of opgesplitste bundel licht, die dus bestaat uit verscheidene kleuren, wordt een spectrum genoemd.



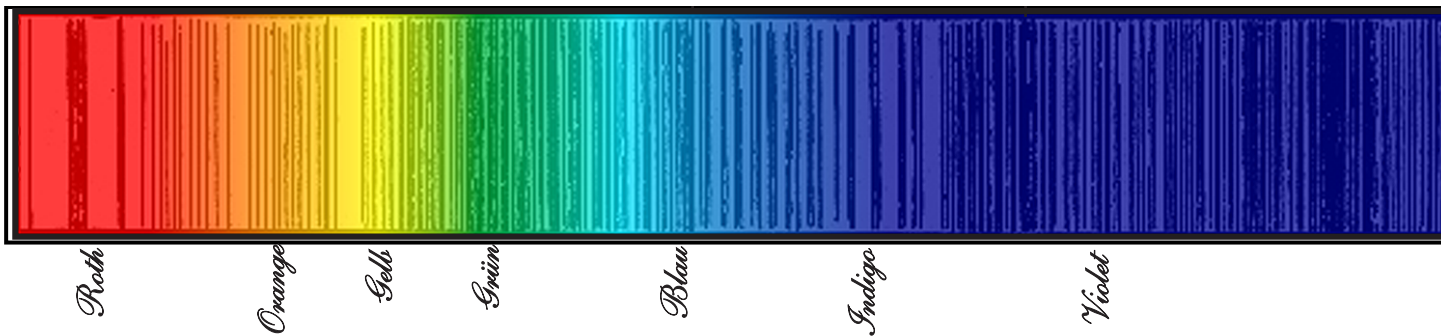
figuur 1: Zonlicht wordt door een prisma gesplitst in verschillende kleuren

WETENKAART

Aan het eind van deze NOVALab weet je:

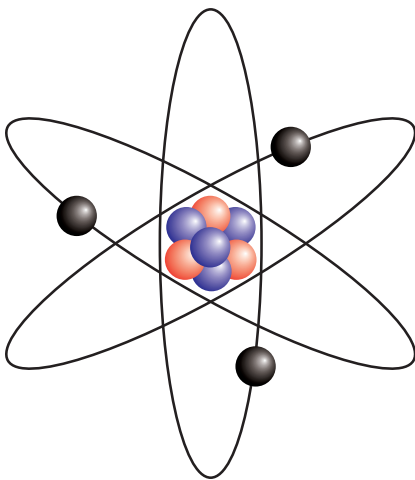
- Hoe de golflengte de kleur van licht bepaalt
- Hoe absorptielijnen ontstaan
- Hoe je golflengtes van absorptielijnen van waterstof kunt uitrekenen
- Hoe je informatie over de chemische samenstelling van een ster kunt afleiden.

In het begin van de 19e eeuw onderzocht de Duitse lenzenmaker Joseph von Fraunhofer het spectrum van de zon. Fraunhofer had een prisma voor zijn telescoop gemonteerd en kon zo het spectrum van de zon heel nauwkeurig zien. Figuur 2 laat het spectrum zien dat hij tekende van het zonlicht. Fraunhofer ontdekte in het zonnespectrum zwarte lijntjes. In 1815 had hij 574 verschillende lijnen in het spectrum waargenomen. Men begreep aan het begin van de 19e eeuw nog niet wat de oorsprong van deze lijnen was.



figuur 2: Een door Fraunhofer (1787-1826) getekend spectrum van zonlicht

Ly Fraunhofer's Abh. Denkschr. 1814_15



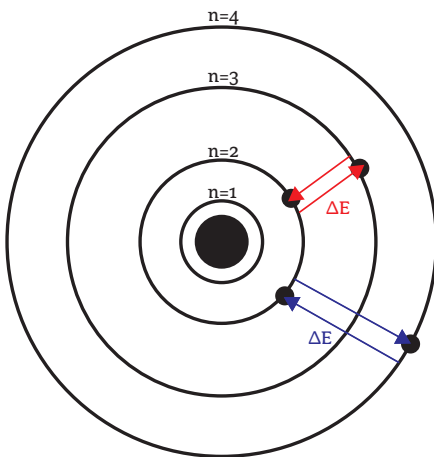
Figuur 3: Elektronen (zwart) bewegen in banen rond een kern die bestaat uit protonen (rood) en neutronen (blauw)

Nu weten we dat de lijnen die Fraunhofer waarnam, worden veroorzaakt door de aanwezigheid van atomen in het koele gas in het buitenste deel van de atmosfeer van de zon. Deze atomen absorberen kleuren licht van de zon. Op de plaats van het geabsorbeerde licht ontstaan in het spectrum donkere lijntjes. Van deze lijntjes kunnen we de golflengte bepalen. Doordat verschillende atomen verschillende kleuren absorberen, kunnen we vaststellen welke atomen bij welk lijntje horen. Dit geeft ons inzicht in de chemische samenstelling van de zon.

Als je meer wilt weten over de manier waarop Fraunhofer absorptielijnen heeft ontdekt, kijk dan eens naar het NOVALab 'Onderzoek de zon'.

Om te begrijpen hoe de absorptielijnen ontstaan, beginnen we met het atoommodel van Ernst Rutherford (1871-1937). Rutherford stelde dit atoommodel in 1911 op. Hij had bedacht dat in een atoom de negatief geladen elektronen in cirkelvormige banen rond de positief geladen kern bewegen, vergelijkbaar met de manier waarop planeten om de zon heen draaien (figuur 3).

1. Welke kracht zorgt ervoor dat planeten om de zon draaien? Is dit dezelfde kracht die elektronen om de atoomkern laat draaien?



figuur 4: Vier binnenste banen waarin elektronen rond een atoomkern bewegen.

De rode lijntjes geven een overgang tussen baan $n=2$ en $n=3$ aan, de blauwe lijntjes tussen baan $n=2$ en $n=4$

Geïnspireerd door Rutherford kwam Niels Bohr (1885-1962) later met een uitgewerkt atoommodel. Hierin draaien elektronen in verschillende, vastgestelde banen rond de kern van een atoom. Deze banen zijn 'vastgesteld' omdat ze alleen op vaste afstanden van de atoomkern mogelijk zijn. Sommige banen bevinden zich dicht bij de atoomkern dan andere. Dit leidt ertoe dat verschillende banen ook verschillende energieën hebben. Omdat de banen vastliggen, zijn ook de energiever verschillen tussen de banen te bepalen (figuur 4).

DE FORMULE VAN RYDBERG

Natuurkundige Janne Rydberg (1854-1919) vond een formule waarmee het energieverval tussen twee banen kan worden bepaald. Hij rekende het energieverval direct om naar de bijbehorende golflengte:

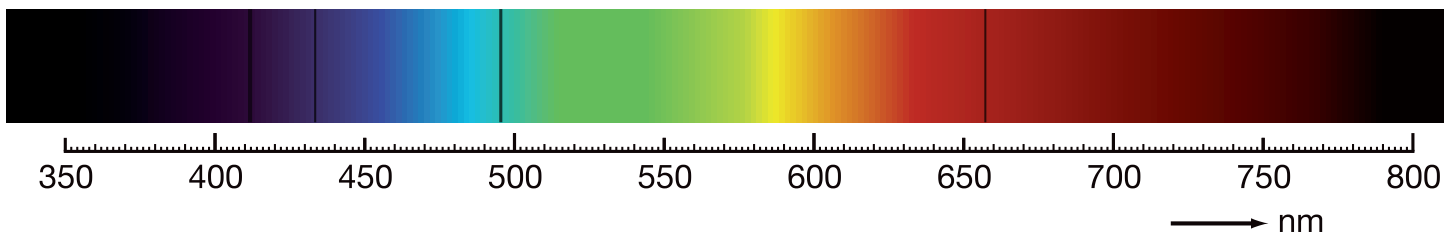
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

In de formule van Rydberg staat het symbool λ (spreek uit lamda) voor golflengte. R is de Rydbergconstante. Deze is gelijk aan $1.09677 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ voor het element waterstof. n_1 en n_2 zijn de nummers van de banen waartussen we het energieverval gaan uitrekenen.

Voor deze formule geldt altijd dat $n_1 < n_2$.

2. Bereken met behulp van je rekenmachine de golflengte in meters van de energievervalen in waterstof voor $n_1 = 2$ en $n_2 = 3$
3. Geef het antwoord ook in nanometers, nm. Rond af op helen. Weet dat $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

Een elektron kan van baan wisselen. Als hij naar een hogere baan gaat, kost dit energie. Verhuist het elektron naar een lagere baan, dan komt er energie vrij. De hoeveelheid energie die nodig is of vrijkomt kun je precies uitrekenen met de formule van Rydberg. Als zonlicht door een wolk van waterstofgas schijnt, zal het licht van bepaalde energieën worden geabsorbeerd door het waterstofgas. Dit gebeurt precies op de plaatsen waar de energie gelijk is aan het energieverval tussen 2 banen. Door dit licht te absorberen verhuizen er dus in feite elektronen binnen de waterstofatomen naar een hogere baan. Figuur 5 laat het spectrum zien dat je krijgt wanneer zonlicht door een wolk koel waterstofgas heen schijnt.



figuur 5

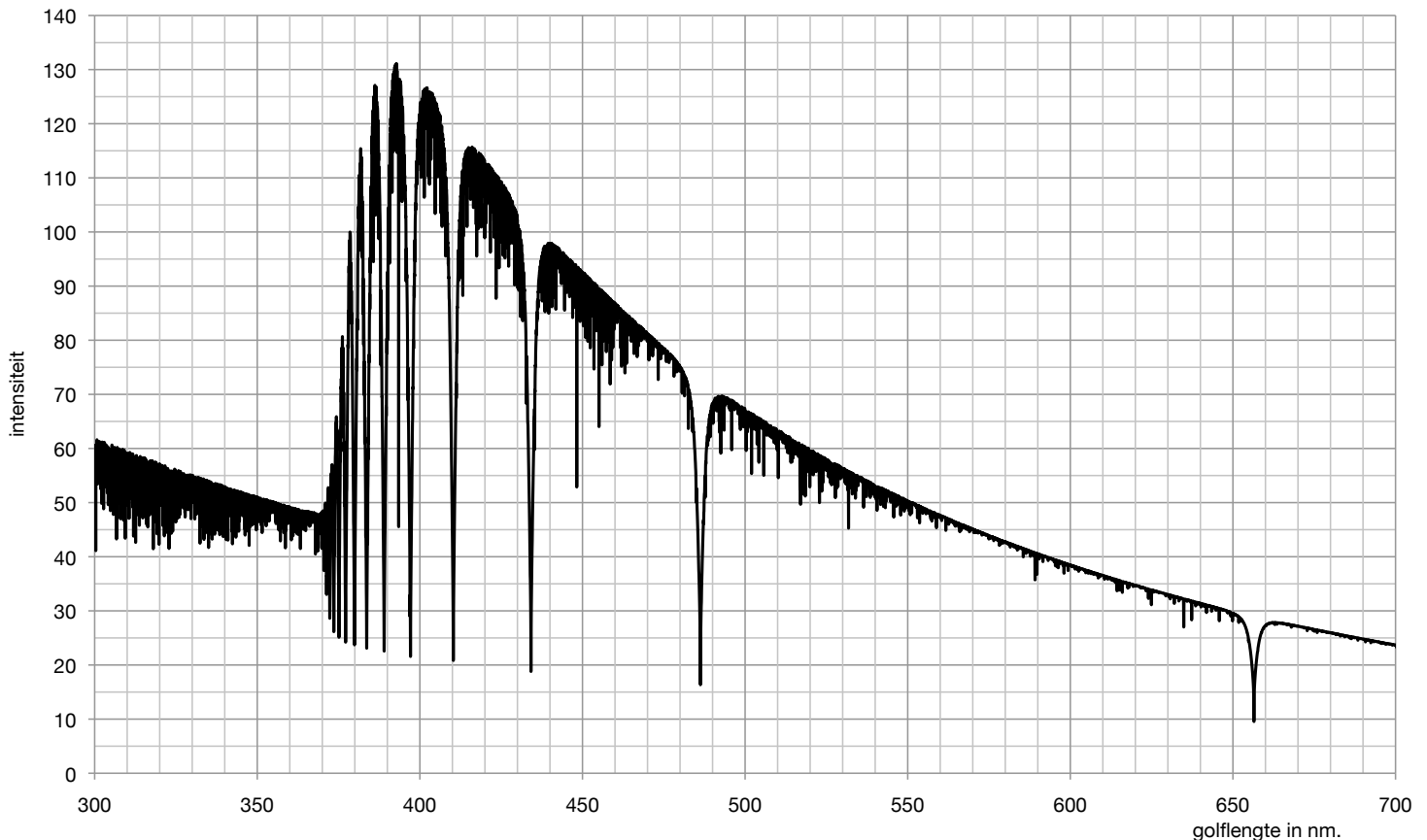
4. Bereken met behulp van de formule van Rydberg ook de golflengte die hoort bij overgangen tussen $n_1 = 2$ en $n_2 = 4$; $n_1 = 2$ en $n_2 = 5$; $n_1 = 2$ en $n_2 = 6$. Geef je antwoord in nanometers, rond af op helen.. Vergelijk de uitkomsten met figuur 5. Wat valt je op?

De reeks lijnen die we nu hebben berekend met $n_1 = 2$, heet de Balmer-reeks. Hij is vernoemd naar Johann Jacob Balmer (1825-1898). Balmer had een eigen formule gemaakt, speciaal voor deze overgangen.. Deze formule behandelen we hier niet. De reeks van $n_1 = 1$, de Lymanreeks, is vernoemd naar Theodore Lyman. Hij ontdekte deze reeks aan het begin van de twintigste eeuw.

- Tot welke reeks hoort de lijn waarvoor geldt $n_1 = 1$ en $n_2 = 2$?
Bereken de golflengte van deze lijn.
Geef je antwoord in nanometers rond af op helen.
- In de tijd van Balmer en Rydberg was deze lijn nog niet waargenomen. Kun je een reden geven waarom men deze lijn nog niet kon waarnemen?

DE OVERSTAP VAN KLEURENBAND NAAR GRAFIEK

Astronomen onderzoeken het spectrum met behulp van grafieken. Met een slimme methode kunnen ze heel nauwkeurig de plaats van de absorptielijnen bepalen. We gaan dit nu voor de ster Sirius zelf onderzoeken.



figuur 6: Het spectrum van de ster Sirius. De intensiteit van het licht van Sirius is gegeven in een willekeurige eenheid

Figuur 6 laat het spectrum zien van Sirius. Sirius is na de zon de helderste ster aan de hemel. Sirius staat op 8,7 lichtjaar van de aarde.

7. Bereken de afstand tot Sirius in miljarden kilometers. Gebruik voor de lichtsnelheid 300.000 km/s. Rond af op helen.

In plaats van een kleurenplaatje met zwarte lijnen erin is het spectrum van Sirius weergegeven als grafiek. Op de x-as staat de golflengte in nm. en op de y-as de intensiteit. De diepe dalen zijn de absorptielijnen in het spectrum.

8. Niet alle lijnen zijn even 'diep'. Wat zou het kunnen betekenen dat de ene lijn dieper is dan de andere?
9. Kun je een paar Balmerlijnen (lijnen waarvoor $n_1 = 2$) terugvinden in het spectrum van Sirius? Zo ja, welke?

Door te kijken naar lijnen in het spectrum van Sirius kunnen we dus vaststellen of er waterstof en andere elementen in de atmosfeer van Sirius aanwezig zijn. Door te kijken naar de sterkte (diepte) van de lijnen, kunnen we vaststellen hoeveel er van een element aanwezig is.

10. Zijn alle lijnen in het spectrum van Sirius van waterstof afkomstig? Licht je antwoord toe.

In het spectrum van de zon zijn intussen veel meer lijnen ontdekt dan de 574 die Fraunhofer zag. De lijnen komen van allerlei verschillende atomen. Er is zelfs een atoomsoort ontdekt door het spectrum van de zon te onderzoeken. Dit element is dan ook vernoemd naar de zon.

11. Welk bekende atoomsoort is naar de zon vernoemd? (hint: wat is het Griekse woord voor zon?)

Je ziet in figuur 6 dat de Balmerlijnen van waterstof steeds dichter bij elkaar komen. Dit komt doordat het verschil in energieniveaus steeds kleiner wordt, naarmate n_2 groter wordt.

12. Bereken met behulp van de formule van Rydberg de golflengte voor $n_1 = 2$ en $n_2 = 40$. Bereken ook de golflengte voor $n_1 = 2$ en $n_2 = 41$. Bereken het verschil tussen deze twee lijnen in nanometers. Geef je antwoord op twee decimalen nauwkeurig.

Als je nu goed naar de vorm van het spectrum kijkt, zie je dat de grafiek rond 370 nm een grote sprong omhoog maakt in het spectrum. Dit noemen astronomen de Balmersprong.



Energierijk licht van de ster heeft genoeg energie om waterstof in de koele buitenste gaslaag van de atmosfeer te ioniseren: het elektron gaat niet naar een nog hogere baan maar vliegt weg van de kern. Elk lichtdeeltje van de ster met een nog grotere energie, en een kortere golflengte, heeft ook voldoende energie om een waterstofdeeltje te ioniseren. Er worden daarvoor heel veel energierijke lichtdeeltjes geabsorbeerd. De intensiteit van de grafiek bij een golflengte korter dan 370 nm is om die reden lager.

DE BALMERSPRONG ONDERZOEKEN MBV DE GRAFISCHE REKENMACHINE.

Door de formule van Rydberg anders op te schrijven kunnen we met behulp van de grafische rekenmachine onderzoeken bij welke golflengte de Balmersprong plaatsvindt. Voor de Balmerreeks is $n_1 = 2$. Voor n_2 kiezen we de variabele x .

13. Toon aan dat $\lambda = \frac{100}{1.09677 * (\frac{1}{4} - \frac{1}{x^2})}$
met λ in nanometers.

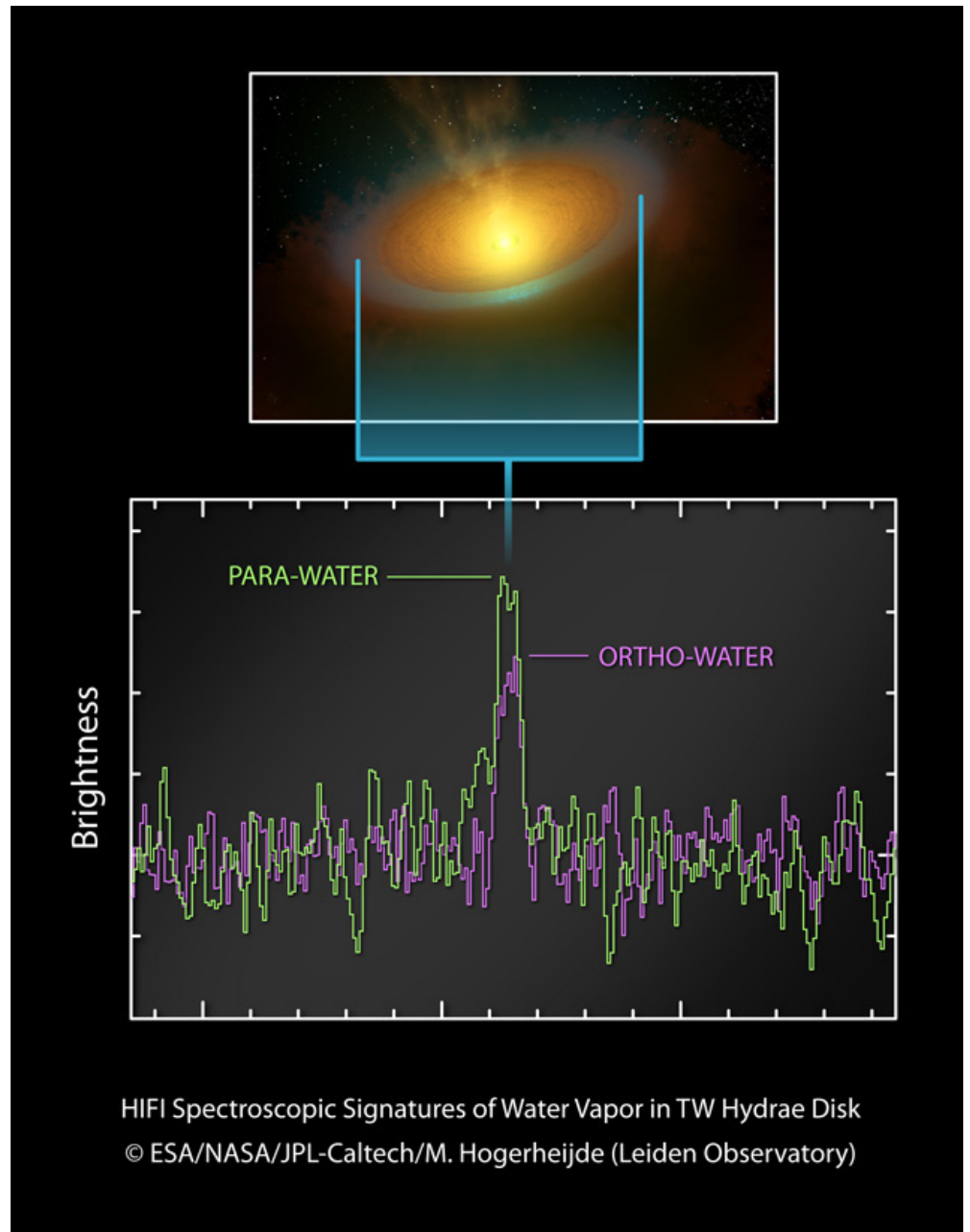
14. Voer deze formule in in je grafische rekenmachine en neem voor de grenzen $x_{\min} = 3$, $x_{\max} = 50$ en $y_{\min} = 300$ en $y_{\max} = 700$

Teken een schets van de grafiek en licht toe hoe je de Balmersprong kunt vinden met behulp van de asymptoot.

TOT SLOT

Bij heel veel ontdekkingen in de sterrenkunde speelt het onderzoeken van spectra een belangrijke rol. In oktober 2011 werd met de Nederlandse molecuuljager HIFI (een van de drie instrumenten aan boord van de ruimtetelescoop Herschel) voor het eerst koude waterdamp gevonden in een planeetvormende schijf rond een jonge ster. Deze ontdekking duidt erop dat deze schijf, die bezig is zich tot een planetenstelsel te ontwikkelen, grote hoeveelheden water bevat en dat planeten met oceanen, zoals de aarde, wel eens op veel meer plaatsen in het heelal zouden kunnen voorkomen.

Deze ontdekking is gedaan door spectraallijnen van water te onderzoeken. Met deze oefening heb je zelf kunnen ervaren op welke manier dit soort onderzoek wordt verricht.



figuur 7: Deze HIFI-grafiek laat zien hoe de koude waterdamp is gedetecteerd. Watermoleculen komen in twee 'spin'-vormen, ortho en para, waarin de spin van de twee waterstofkernen verschillende oriëntaties heeft. Door de verhouding tussen ortho en para te vergelijken, kunnen astronomen de temperatuur achterhalen waarbij het water is gevormd. Een lagere verhouding van ortho ten opzichte van para betekent een lagere temperatuur. De lage verhouding van ortho en para in het diagram wijst op koude waterdamp. Dit is het eerste bewijs dat water in grote hoeveelheden voorkomt in de koude buitendelen van vroege zonnestelsels, waar kometen hun oorsprong vinden (NASA/JPL-Caltech)