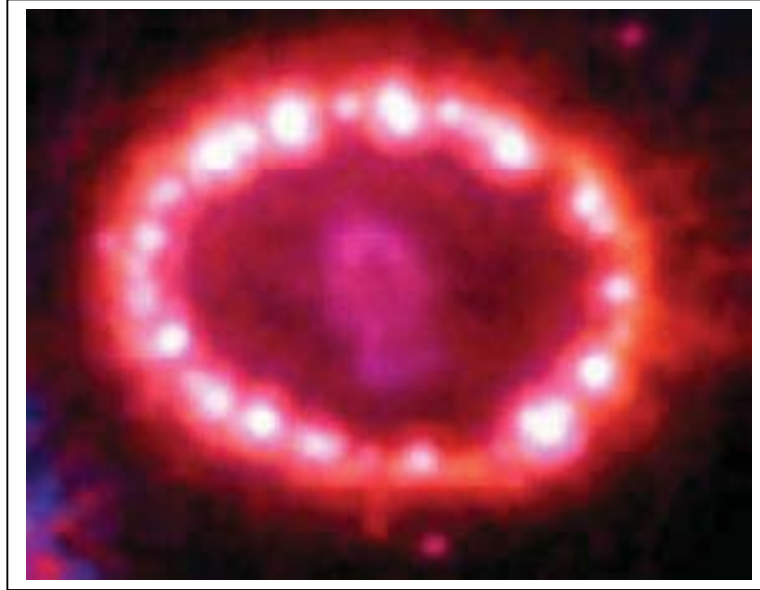


Astrofysica in PMN



Shockwaves of Supernova 1987A emitted in 1987 are catching up in 2003 with a ring of gas. The energy is lighting up "pearls" on the ring. The biggest pearl (at 4'o clock) is not part of the ring but is a star that happens to be between the ring and the telescope.

d.j.hoekzema
e. van den berg
g.j. schooten

Woudschoten 2004
versie 13-01-2005

project

Moderne Natuurkunde

op het **VWO**

www.phys.uu.nl/~wwwpmm

Voorwoord

In deze gids hebben we een aantal bronnen bij elkaar gebracht voor Sterrenkunde in het VWO. We beginnen met wat stukjes lesmateriaal van het Project Moderne Natuurkunde. De complete tekst van PMN lesmateriaal voor sterrenkunde en andere onderwerpen vindt u op het web: www.phys.uu.nl/~wwwpmn. U kunt dan klikken op hoofdstukken en delen van hoofdstukken. De sterrenkunde staat in hoofdstuk 5. In de webversie zijn een paar animaties opgenomen, de illustraties zijn in kleur, en er zijn hot links naar websites met recente ontdekkingen. Uiteraard kunt u ook gewoon de PMN boekjes bij ons opvragen.

De opgenomen PMN tekst bevat twee experimenten die in de klas gedaan kunnen worden. De schatting van het vermogen van de zon met een gloeilamp levert verrassend goede resultaten. De demonstratie van plasma's vereist enige voorzichtigheid vanwege de hoogspanning.

Er is een verrijkingstekst over *stervende sterren en gedegenererde materie*. Die tekst bleek moeilijk en veel voor leerlingen en maakt geen deel meer uit van het PMN leerlingmateriaal. De tekst is wel interessant voor docenten en laat relaties zien tussen quantum fysica, deeltjesfysica, en sterevolutie.

Er is een lijst van conceptuele vragen die geschikt zijn voor discussie in kleine groepjes. De vragen zijn gebaseerd op het PMN materiaal. De werkvorm *discussie van conceptuele vragen in kleine groepjes* is uiterst nuttig en leerzaam voor leerlingen en docenten. Ons vak heeft zo veel conceptuele mijnenvelden! Hoe kun je anders achter leerlingmisconcepties komen?

We hebben een viertal PMN sterrenkunde opgaven opgenomen uit de 2002 en 2004 PMN Eindexamens en School Examens, compleet met correctievoorschriften.

Het rollenspel over planetenbewegingen past niet in het eindexamenmateriaal, maar past goed in de onderbouw, in ANW of toch in een eerste sterrenkundeles.

Tenslotte vindt u in dit boekje een artikel uit de *School Science Review* over bronnen voor astronomie onderwijs van Richard Beare, een lijst van informatieadressen, boeken, CDs, en websites, en een boekbespreking van het astronomieleerboek *Universe*. Er is zo veel materiaal over sterrenkunde onderwijs, dat we niet pretenderen een volledig overzicht te geven.

Als u meer wilt weten van het Project Moderne Natuurkunde en hoe uw school daaraan mee kan doen, kijk dan naar de beschrijving die we los van dit boekje zullen uitdelen. Verder kunt u altijd contact opnemen met de PMN projectleiders:

Ed van den Berg, e.vandenberg@phys.uu.nl
 Tel: 's avonds 072 – 532 2818, overdag 030 - 253 7818 of 9818
 Dick Hoekzema, d.j.hoekzema@phys.uu.nl

Aanmelding voor deelname aan PMN in schooljaar 2005-2006 kan in principe tot eind juni 2005, maar we stellen een vroege aanmelding wel op prijs. U kunt te allentijde contact op nemen, vragen stellen, etc.

Ed van den Berg
 Dick Hoekzema
 Gert Schooten

Inhoud

Voorwoord.....	1
Inhoud.....	2
Eindtermen Sterrenkunde in PMN	3
De Zon in PMN (uit PMN hoofdstuk 5).....	4
Stervende sterren en gedegeneerde materie	9
Conceptuele en andere vragen bij PMN Astrofysica.....	15
Opgaven uit Centrale Eindexamens en uit School Examens.....	16
Supernova.....	16
Supernova correctiemodel.....	17
Sterspectra	18
Sterspectra Correctiemodel	19
De Andromedanevel.....	20
Andromedanevel correctiemodel	22
Antares.....	23
Antares correctiemodel.....	24
<i>Universe</i> , een leerboek en naslagwerk over astronomie.....	26
Role Playing in Physics and Astronomy	27
Resources to enliven the teaching of astronomy to upper secondary students.....	32
Bronnen op het gebied van sterrenkunde	38
Antwoorden Conceptuele en andere vragen bij PMN Astrofysica.....	40

Eindtermen Sterrenkunde in PMN

Astrofysica vormt het 5^{de} en laatste hoofdstuk van het PMN materiaal. De bedoeling is dat men er 10 lessen voor heeft, maar veel docenten zijn gedwongen het in 5 lessen te doen en dat kan. Uiteraard zou men bij een vak als astrofysica veel en veel meer willen doen, maar het zij zo.

In het PMN materiaal benadrukken we de interactie tussen theorie en waarneming en het gebruik van modellen. In een serie opgaven berekenen leerlingen of het vermogen van de zon zou kunnen komen van verbranding van waterstof of van gravitatie energie bij samentrekking. Ze ervaren dan eens stukje werkmethode van de astrofysica, een methode waarmee ze al wat ervaring hebben in eerdere hoofdstukken van het PMN materiaal.

Tabel 1 geeft de eindtermen van het PMN materiaal in vergelijking met de eindtermen van de vernieuwde tweede fase.

Tabel 1: Eindtermen Sterrenkunde in PMN

PMN Eindtermen	Eindtermen Moderne Natuurkunde, Vernieuwde Tweede Fase
<p>Domein F: Moderne Fysica</p> <p>Subdomein F3: Astrofysica</p> <p>De kandidaat kan:</p> <p>*74 de aanwezigheid van elementen in astronomische objecten aantonen aan de hand van emissie- of absorptielijnen en die lijnen verklaren uit energie veranderingen in een atoom</p> <p>*75 de temperatuur van sterren bepalen uit de stralingskromme.</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> vergelijking met standaard stralingskrommen; <input type="checkbox"/> gebruik van kleurfilters. <p>*76 snelheden van astronomische objecten bepalen, met behulp van het dopplereffect (aan de hand van gegeven frequenties van reeds geïdentificeerde spectraallijnen):</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> rotatie van de zon, beweging van het zonsoppervlak; <input type="checkbox"/> planeetbeweging; <input type="checkbox"/> snelheidsvariaties van sterren, ten gevolge van begeleiders; <input type="checkbox"/> snelheden van galactisch waterstof; <input type="checkbox"/> snelheden van sterstelsels. <p>*77 globaal diverse mogelijkheden en stadia van sterrenevolutie beschrijven zoals:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> witte dwergen <input type="checkbox"/> neutronsterren <input type="checkbox"/> zwarte gaten <input type="checkbox"/> rode reuzen, nova's, supernova's 	<p>Domein F: Moderne Fysica</p> <p>Subdomein F3: Astrofysica</p> <p>De kandidaat kan:</p> <p>*73 de temperatuur van sterren bepalen uit de stralingskromme met de verschuivingswet van Wien.</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> stralingsenergie, thermische straling. <p>*74</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> de belangrijkste reacties beschrijven die verantwoordelijk zijn voor de energieproductie in de zon. <input type="checkbox"/> productie van elementen; <input type="checkbox"/> neutrino.

De Zon in PMN (uit PMN hoofdstuk 5)

Experiment 1: Schatting van Vermogen van de Zon

Materiaal: Gloeilamp 100 W of beter 150 W met fitting en verlengsnoer, meetlat.

Gebruikte gegevens: Afstand aarde – zon

Kosmische objecten zenden straling uit. Veel straling soms, en verdeeld over allerlei gebieden van het elektromagnetisch spectrum. Deze straling kan ons iets leren over de eigenschappen van die objecten.

Het object dat we het best kunnen waarnemen is de zon. Hiervan ontvangen we veel licht, voornamelijk zichtbaar en ultraviolet. Dat licht een vorm van energie is, is goed te merken als je 's zomers buiten loopt. Maar, om hoeveel energie gaat het eigenlijk?

Een eenvoudige proef, in combinatie met wat natuurkundige kennis, volstaat om hiervan een ruwe schatting te maken: Voor dit experiment is een aantal leerlingen nodig als proefpersoon. Deze leerlingen komen één voor één naar voren, naar een tafel met een brandende 100 W of 150 W gloeilamp: ons model van de zon.

Als proefpersoon stel je je voor dat je op een zonnige dag aan het strand ligt, en je voelt de zon op je huid branden. Hiervoor ontbloomt je je onderarm en je doet je ogen dicht.

Met de ogen gesloten beweegt de proefpersoon zijn arm langzaam in de richting van de lamp, totdat naar zijn gevoel de afstand zodanig is dat het net zo warm aan voelt als in de zon aan het strand. (Een andere leerling of de docent zorgt voor de veiligheid, zodat de proefpersonen zich niet aan de lamp branden.) Als de straling van de lamp net zo sterk is als die van de zon dan meet de docent de afstand tussen de arm en het middelpunt van de lamp, en schrijft het resultaat in een tabel.

1. Neem de tabel met zojuist gemeten afstanden over en bereken het gemiddelde.
2. Bereken de intensiteit van de straling van de lamp, op deze afstand van de lamp.
3. Neem aan dat de berekende intensiteit inderdaad overeenkomt met de intensiteit

van de zonnestraling. Gebruik nu de afstand van de aarde tot de zon om het door de zon ontwikkelde vermogen te berekenen.

4. Vergelijk het resultaat van deze berekening met de gegevens in BINAS Tabel 33.
5. Dit experiment levert als uitkomst (meestal) een heel redelijke schatting van de orde van grootte van het vermogen van de zon, meer dan 10^{24} keer zo groot als dat van de gloeilamp.

Hoe komt de zon aan dat vermogen en hoe vind je dat uit?

Naar aanleiding van deze proef stellen we een vraag over de fysica van de zon, en een vraag die meer betrekking heeft op de wetenschappelijke methode:

- fysisch: Hoe komt de zon aan zoveel energie om uit te stralen?
- methode: Hoe kun je zoeken naar een antwoord op dergelijke vragen?

Het beantwoorden van vragen binnen de natuurwetenschappen berust heel sterk op twee pijlers: het maken van theoretische modellen en het doen van waarnemingen. Met name de wisselwerking tussen deze beide componenten, die elkaar voortdurend corrigeren en aanvullen, is de belangrijkste motor van de groei van wetenschappelijke kennis.

Het door de zon uitgezonden vermogen kan met tamelijk eenvoudige middelen gemeten worden, maar om te weten hoe de zon aan dit grote vermogen komt hebben we een veel breder theoretisch kader nodig. Het opbouwen van zo'n kader begint vaak met het ordenen van gegevens.

Een aantal belangrijke gegevens kon al in de zeventiende eeuw uit de astronomische waarnemingen worden afgeleid: de afstand tot de zon, de straal, en de massa, want die volgt uit de omlooptijden van de planeten. De volgende stap is nu om te gaan kijken naar mogelijke energiebronnen. Er zijn in de loop van de tijd diverse mogelijkheden geopperd. De energiebron van de zon

Verbranding

Eén zo'n voorstel was dat de energie zou worden geleverd door stoffen die verbranden. De energie zou, met andere woorden, van chemische oorsprong zijn. Een heel voorstelbare gedachte want voor mensen in de negentiende eeuw was dit ook de meest belangrijke energiebron. We proberen hiermee een schatting van de totale energie die de zon bezit te maken. Stel, bijvoorbeeld, dat de zon geheel zou bestaan uit steenkool, met een dichte zuurstofatmosfeer.

In de loop van de tijd kwamen meer relevante gegevens beschikbaar. Bijvoorbeeld door de vorderingen, rond het eind van de negentiende, begin twintigste eeuw, van het onderzoek van spectra. Men leerde uit de vorm en de diepte van de spectraallijnen allerlei gegevens af te leiden, bijvoorbeeld over hoeveelheden stoffen. Zo is het nu duidelijk dat de zon voor het grootste deel (in aantallen atomen ongeveer 90%) bestaat uit waterstof. Daarnaast is de hoeveelheid zuurstof is zo klein dat verbranding als energiebron ook al om die reden is uitgesloten.

Opgave 127** Verbrandingsenergie

- Maak een schatting van de hoeveelheid koolstof (en zuurstof) die per seconde nodig is om het energieverlies van de zon door straling te dekken. Gebruik BINAS voor de nodige gegevens.
- Maak een schatting van de maximale levensduur van de zon, als de lichtkracht zou worden opgebracht door dit verbrandingsproces.

Gravitatie

Een tweede mogelijkheid die is voorgesteld, is dat de zwaartekracht de benodigde energie levert. Als op aarde een voorwerp naar beneden valt, wordt er potentiële energie omgezet in kinetische energie, en vervolgens in thermische energie, als het voorwerp op de grond valt. De zwaartekracht op de zon is veel sterker dan op aarde, dus de energie die daar vrijkomt als er iets valt is ook veel groter. Stel nu eens dat de zon in zijn geheel steeds verder inkrimpt. Zou de daarbij vrijkomende energie dan voldoende zijn om de zon gedurende voldoende lange tijd te laten schijnen?

Opgave 128** Zwaarte-energie

Een komeet met massa m valt van grote afstand op een ster met massa M . De kinetische energie van de komeet wordt bij de val geheel omgezet in thermische energie.

- Geef een formule voor de hoeveelheid thermische energie die vrijkomt. Neem aan dat de kinetische energie van de komeet in de begintoestand te verwaarlozen is.
- Neem aan dat de zon is ontstaan uit een grote wolk gas en stof. Bereken de hoeveelheid energie die is vrijgekomen bij de vorming van de zon in ieder geval ruim minder is dan GM_{\odot}^2/R , waar M_{\odot} de massa en R de straal van de zon is.
- Geef een (ruwe) schatting van de minimale snelheid waarmee de zon zou moeten krimpen om met het huidige vermogen te blijven schijnen.
- Hoe lang zou de zon dit vol kunnen houden?

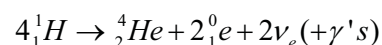
De leeftijd van het zonnestelsel

Relevante gegevens kwamen uit allerlei bronnen. Volgens de evolutietheorie van Darwin was de ontwikkeling van het leven een proces dat zich uitstrekte over miljoenen of miljarden jaren. Ook geologisch onderzoek begon in die richting te wijzen, en een uiterst belangrijke ontwikkeling hierbij was de ontdekking van radioactiviteit. Door het verval van radioactieve stoffen ontstaat een soort natuurlijke klok. Bekend is de koolstof-14 methode, bruikbaar voor het dateren van fossielen met een ouderdom tot ongeveer vijftigduizend jaar. Soortgelijke dateringstechnieken met radioactieve isotopen van bijvoorbeeld uranium, bleken echter ook bruikbaar voor het vaststellen van de ouderdom van gesteenten, tot leeftijden van miljarden jaren.

Kernfusie

Door het combineren van biologisch en geologisch bewijsmateriaal weet men nu dat de zon al minstens 4 miljard jaar schijnt met een vermogen dat vergelijkbaar is met tegenwoordig. (Het vermogen is in die tijd geleidelijk ongeveer 20% groter geworden.) Dit betekende dat het ook uitgesloten was dat de zon al die tijd de energie heeft geproduceerd door alleen maar te krimpen.

De quantumfysica heeft een doorslaggevende rol gespeeld bij het begrijpen van een nieuwe energiebron, namelijk kernreacties. In de kern van de zon wordt, via een aantal tussenstappen, waterstof omgezet in helium. De netto reactievergelijking hiervoor is:



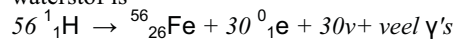
De neutrino's nemen gemiddeld een paar procent van de energie mee, en ze reageren vrijwel niet met de andere materie in de zon. Omdat ze direkt ontsnappen dragen ze ook niet bij aan het verhogen van de temperatuur en de druk. De energie van de fotonen doet er daarentegen ongeveer 170.000 jaar over om langzaam naar buiten te lekken en tenslotte bij het zonsoppervlak te worden uitgestraald.

Opgave 129*** fusie energie

- Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie

$$4\ ^1_1\text{H} \rightarrow\ ^4_2\text{He} + 2\ ^0_1\text{e} + 2\nu + 2\gamma$$
- Bereken hoeveel kilogram waterstof er, per seconde, in het binnenste van de zon wordt omgezet in helium.
- Maak een schatting van hoe lang de zon deze energieproductie maximaal zou kunnen volhouden, gesteld dat hij zou zijn ontstaan uit een wolk gas waarvan 80% van de massa uit waterstof bestond.

In de kern van zware sterren gaan het fuseren van kernen door, en worden er ook zwaardere elementen gevormd. Tot aan het element ijzer komt er hierbij energie vrij. De vorming van nog zwaardere elementen kan wel, en gebeurt wel, maar *kost* energie en verlaagt dus de levensduur. De netto reactievergelijking voor de vorming van ijzer-56 uit waterstof is



- Bereken de maximale levensduur van de zon, als ijzer-56 het eindproduct van het fusieproces zou zijn (en gesteld dat het vermogen van de zon hetzelfde zou blijven).

Plasma's

Omdat voor kernfusiereacties de elektrische afstoting tussen de kernen moet worden overwonnen, kunnen ze alleen plaatsvinden als de kernen voldoende energie hebben. Om de reacties voldoende snel te laten verlopen, moet bovendien de dichtheid zeer groot zijn. Voor deze manier van energieopwekking zijn derhalve extreme omstandigheden van zeer hoge temperatuur en druk nodig. (ongeveer 10^7 K en 10^{14} Pa). Onder de omstandigheden die heersen in een ster is alle materie geïoniseerd. Gassen die voor een belangrijk deel geïoniseerd zijn worden plasma's genoemd. Plasma's worden gezien als een vierde fase of aggregatietoestand van materie, in aanvulling op vast, vloeibaar en gasvormig. Van alle materie in ons universum komt maar liefst 99 % voor in de plasmatoestand. Er bestaat een heel scala aan plasma's die voorkomen in de

natuur, maar ook in technische toepassingen. Voorbeelden in de natuur naast de al genoemde sterren zijn: de bliksem, gasvlammen, aurora's (Poollicht of Noorderlicht) en staarten van kometen. Technische toepassingen komen voor bij: natriumstraatverlichting, TL-buizen, (neon)reclame-buizen, elektrische lasbogen en ook in de zogenaamde fusiereactoren. In de ruimte komen plasma's ook veel voor in wolken in de buurt van hete sterren, die veel ultraviolet licht uitzenden dat het aanwezige gas ioniseert. Nog maar onlangs is ontdekt dat de ruimte tussen de melkwegstelsels gevuld is met zeer ijl geïoniseerd waterstof, met een totale massa die vergelijkbaar is met het totaal aan zichtbare massa in het universum.

Opgave 130* Plasmawolken

- Hoeveel energie is er nodig om waterstof te ioniseren?
- Toon aan dat ultraviolet licht hiervoor kan zorgen en bereken de minimale frequentie die dit licht dan moet hebben

Een plasma als geheel is neutraal, maar het bestaat uit losse elektronen en ionen, die los van elkaar kunnen bewegen. Dit is het belangrijkste verschil tussen plasma's en gassen.



figuur 61

Een gevolg hiervan is dat beide totaal verschillend reageren in aanwezigheid van elektromagnetische velden. Gassen geleiden niet en reageren nauwelijks op de aanwezigheid van elektrische en magnetische velden. Plasma's, daarentegen reageren juist heel sterk. In figuur 61 is bijvoorbeeld goed te zien hoe hete plasmapluisen de magnetische veldlijnen aan de oppervlakte van de zon volgen.

Experiment 2: Vlammen en Plasma

Materiaal: bunsenbrander, 2 x kopergaas (bv. van branders, ongeveer 15 cm x 15 cm), statieven, isolatiemateriaal, hoogspanningsbron

Een vlam is een voorbeeld van een plasma. Zet een bunsenbrander met een niet te grote en niet te sterk ruisende vlam tussen twee kopergaasjes, die aan weerszijden van de vlam zijn vastgezet in statieven, met voldoende isolatiemateriaal. Tussen de gaasjes wordt nu een hoogspanning aangebracht (voorzichtig!!).

- Beschrijf wat je waarneemt.
- Leg uit waarom een geladen elektroscop wordt ontladen als er een vlam in de buurt wordt gehouden.

Het inwendige van de zon

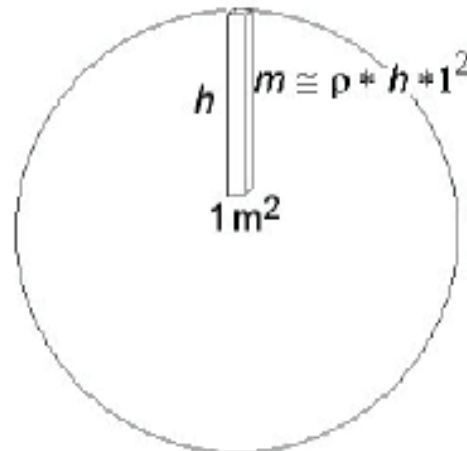
Om aan te tonen dat kernfusie inderdaad een mogelijke energiebron is, moeten we ons een beeld vormen van de omstandigheden in het binnenste van de zon. Hiervoor moet gebruik gemaakt worden van waarnemingen van buitenaf en van theoretische modellen. Gegevens zoals oppervlaktetemperatuur, omvang en massa zijn door meting bekend. Met behulp van modellen over gasdruk en warmtetransport kunnen we dan proberen te extrapoleren naar de kern van de zon, om te kijken of er daar voldaan is aan de genoemde vereisten van 10^7 K en 10^{14} Pa.

Gedetailleerde modellen vereisen aanzienlijke theoretische kennis. Een ruwe schatting blijkt echter al vrij eenvoudig tamelijk goede resultaten te leveren..

Onder water kan de (toename van de) druk op een diepte h onder het wateroppervlak worden berekend met behulp van het gewicht van de

waterkolom die zich boven die diepte bevindt. Bijvoorbeeld, boven een oppervlak van 1 m^2 op een diepte van 2 m onder water, bevindt zich een waterkolom van 2 m^3 , met een gewicht van $mg = \rho \times V \times 9,8 = 1.10^3 \times 2 \times 9,8 = 2.10^4 \text{ N}$. De druk is dus $p = F_g/A = 2.10^4/1 = 2.10^4 \text{ Pa}$ (+ de luchtdruk).

Dezelfde methode is bruikbaar om de druk in een ster, of een planeet, of een ander lichaam te berekenen. Op een diepte h onder de oppervlakte van de ster bevindt zich boven een oppervlak van 1 m^2 een materiekolom met een volume van $1 \times 1 \times h \text{ m}^3$. Om de massa van deze kolom te berekenen hebben we de dichtheid nodig. Voor het gemak nemen we hier de gemiddelde dichtheid van de ster, hoewel dit eigenlijk natuurlijk niet klopt, omdat de dichtheid dieper in de ster groter wordt.



figuur 62

Om het gewicht van deze kolom uit te rekenen moeten we de massa vermenigvuldigen met g . Voor het gemak nemen we hiervoor de waarde aan het oppervlak van de ster.

Met $\rho = M/V = 3M / 4\pi R^3$ en $g = GM / R^2$ vinden we nu

$$p = \rho gh = (3M / 4\pi R^3) \times (GM / R^2) \times h$$

Om de druk helemaal in de kern van de ster uit te rekenen nemen we $h = R$. We krijgen dan:

$$p = 3GM^2 / 4\pi R^4$$

Het gebruik van deze formule geeft waarden die niet nauwkeurig zijn maar die in ieder geval een indruk geven van de orde van grootte. Bij een lichaam van gelijkmatige dichtheid is het resultaat bijvoorbeeld dat de druk een factor 2 overschat wordt. Bij een concentratie van massa in de kern kan de formule echter ook een onderschatting van de

druk geven en afhankelijk van de dichtheidsvariaties kunnen de verschillen ook veel groter worden dan een factor 2.

Opgave 131 De druk in de zon

- Maak een schatting van de druk in het centrum van de zon.
- Vergelijk het resultaat met de waarde in BINAS en geef commentaar.

We hebben nu een schatting van de druk. Als we ook de deeltjesdichtheid (in mol/m^3) weten, dan kan er met behulp van de algemene gaswet ook een schatting gemaakt worden van de temperatuur.

Opgave 132*** Kernfusie in de zon

De zon bestaat voor het grootste deel uit volledig geïoniseerd waterstof, dus uit losse protonen en elektronen. Beide dragen bij aan de druk, en het aantal deeltjes is dus twee maal zo groot als bij atomair waterstofgas.

- Ga uit van de gemiddelde dichtheid van de zon en bereken de deeltjesdichtheid in mol/m^3 .
- Maak een schatting van de temperatuur in het centrum van de zon.
- Is fusie op grond van dit model een mogelijke energiebron?

Opgave 133*

Bespreek enkele tekortkomingen in de gegeven schatting van de dichtheid, en probeer vast te stellen waarom ze leiden tot een onderschatting van de centrale druk van de zon.

Verfijningen (Verdieping)

Bovenstaande resultaten zijn ruwe schattingen, en met weinig theoretische kennis kunnen toch al een aantal verbeteringen worden gesuggereerd. Naast voor de hand liggende suggesties tot verfijning, zoals het in rekening brengen van de dichtheidsvariatie, zullen we er ook een paar noemen waar meer voor nodig is. Ten eerste moet een berekening van de centrale temperatuur ook mogelijk zijn wat betreft het

warmtetransport in de ster. Een temperatuurverschil van 10^7 K tussen kern en oppervlak zou bijvoorbeeld niet kunnen bestaan als energie heel snel zou kunnen ontsnappen.

Opgave 134*

Welke vormen van warmtetransport kunnen plaatsvinden in het inwendige van de zon?

Het warmtetransport tussen verschillende lagen in de zon bepaalt bovendien hoe de temperatuur afhangt van de diepte, en is dus ook belangrijk om te bepalen hoe de dichtheid varieert. Een gedetailleerde theorie over warmtetransport is dus een belangrijk onderdeel van een theorie over de bouw van de zon.

Een tweede belangrijk gegeven is dat ook de straling bijdraagt aan de druk in de zon. Fotonen hebben weliswaar geen rustmassa, maar wel impuls. Omdat er bij de botsing met een foton wel degelijk impuls wordt uitgewisseld, wordt er ook een kracht uitgeoefend, en dus leveren fotonen ook een bijdrage aan de druk. Naarmate de temperatuur stijgt komen er meer fotonen, met een hogere impuls, en wordt de bijdrage van de fotonen aan de druk belangrijker. Omdat stralingsdruk geen aandacht aan besteden, maar dat is niet helemaal terecht. Vooral in sterkernen is het wel degelijk van groot belang.

Een derde belangrijk gegeven is dat bij extreem hoge dichtheden de algemene gaswet zijn geldigheid verliest. De materie wordt dan zo sterk samengeperst dat de beschikbare energieniveau's van de elektronen vol raken. Om het gedrag van dergelijke 'gedegeneerde' materie te beschrijven is het noodzakelijk de quantumfysica te gebruiken. Opmerkelijk is dat de berekeningen hierdoor in veel opzichten eenvoudiger worden. Het feit dat elektronen fermionen zijn en voldoen aan het uitsluitingsprincipe van Pauli is de belangrijkste bepalende factor, en het model van 'elektronen in een doos' levert al zeer goede resultaten. Gedegeneerde materie speelt met name tegen het eind van de levensloop van sterren en in de kernen van grote sterren een rol.

Stervende sterren en gedegeneerde materie

De volgende pagina's maakten ooit deel uit van het PMN Astronomie hoofdstuk. Ze vormden een prachtige afsluiting vanwege de integratie van begrippen uit het PMN quantum hoofdstuk (deeltje-in-doos, energie niveaus, Pauli principe), het elementaire deeltjes hoofdstuk, en de sterrenkunde. Maar helaas, er moest geschrapt worden en het was toch net iets te moeilijk. We denken dat het voor docenten juist erg interessant is en PMN docenten zouden er toch iets over kunnen vertellen als afsluiting van astronomie. Dit hoofdstukje kan ook geschikt zijn voor leerlingen die via een opdracht of profielwerkstuk dieper in de astronomie willen duiken.

Door het gebruik van theoretische modellen heeft men niet alleen een goed beeld van de geschiedenis van de zon, maar ook van wat er in het inwendige van de zon gebeurt, en hoe de toekomst van de zon er uit zal zien.

De zon heeft volgens de theorie een centrale temperatuur van $1,4 \cdot 10^7$ K, bij een druk van $2 \cdot 10^{16}$ Pa. Dit is genoeg om op enige schaal fusie van waterstof tot helium te laten plaatsvinden, maar niet genoeg voor de vorming van zwaardere elementen.

In de jonge zon vond de fusie van waterstof plaats in de kern. Omdat de kern inmiddels voornamelijk uit helium bestaat, vindt de verbranding nu plaats in een schil rond de kern. Naarmate de zon ouder wordt, komt deze schil verder naar buiten te liggen, met als gevolg dat er ook meer energie naar buiten ontsnapt, en het uitgestraald vermogen langzaam groter wordt. Het vermogen van de zon is nu ongeveer 20% groter dan in het beginstadium.

De toekomst van de zon

Wat zal er gebeuren, als op den duur de waterstof in de zon steeds verder opraaft? Op den duur komt de fusielaag dan zo dicht onder de oppervlakte te liggen dat de buitenste lagen opzwellen. De zon zal dan omgeven zijn door een uitgebreide, relatief koele atmosfeer die ongeveer tot de baan van Mars zal reiken. Een ster in dit stadium wordt een *rode reus* genoemd.

Bij gebrek aan brandstof krimpt de kern van de zon dan in, tot temperatuur en druk zo ver oplopen dat er in de kern in zekere mate vorming van zwaardere elementen, en met name koolstof en zuurstof plaatsvindt. De temperatuur in de kern loopt dan op, en zodra een bepaalde kritische grens wordt bereikt, gaat dit zelfs opeens heel snel. Er komt dan binnen korte tijd zoveel energie vrij, dat de buitenste lagen van de zon geheel worden weggeblazen, en wat overblijft is de kern: een heet object, dat geleidelijk afkoelt, zo groot als een planeet en zo zwaar als een ster, en omringd door een wolk van weggeblazen materiaal.

Witte dwergen

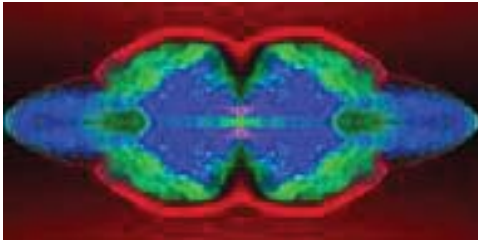
Hoe is dit model van de zon en de zongeschiedenis tot stand gekomen, en hoe kan het worden getoetst? Want er zijn in de geschiedenis van de wetenschap legio voorbeelden van overtuigende theoriën en modellen die uiteindelijk niet correct bleken. Hoe overtuigend ook, theorie moet worden gewantwoord, zeker zolang ondersteuning door waarnemingen ontbreekt, maar eigenlijk ook daarna nog. Echter, we kunnen niet in de toekomst kijken, en we kunnen zelfs niet even in de kern van de zon de temperatuur of de samenstelling gaan meten.

Heel belangrijk, zowel voor de ontwikkeling van, als voor het vertrouwen in onze theorieën over sterren, is de ontdekking van witte dwergsterren geweest.

De eerste van deze bijzondere soort sterren, Sirius B, werd ontdekt in 1862, als begeleider van Sirius A, de helderste ster die vanaf de Aarde aan de hemel te zien is. Pas in 1915 echter werd ontdekt dat het een heel bijzonder object is: heel klein en toch heel zwaar, en heel heet. Vandaar ook de naam *witte dwergen*: wit omdat ze door hun hoge temperatuur wit licht uitzenden, en dwerg omdat ze door hun geringe omvang maar weinig lichtsterk zijn.

Het bestaan en de waargenomen eigenschappen van witte dwergen geven een sterke ondersteuning voor het idee dat het hier inderdaad gaat om de eindstadia van sterren, temeer omdat ze soms nog worden omringd door een wolk weggeblazen materiaal, dat een planetaire nevel wordt genoemd. Deze naam is ontstaan doordat zo'n wolk door een kleine kijker wordt gezien als een schijfje in plaats van een punt, zodat hij wat lijkt op een planeet. In opnamen die met tussenpozen worden gemaakt is soms ook het uitdijen van dit weggeblazen materiaal nog te volgen.

figuur 1



Theorie en waarneming lijken bijna naadloos op elkaar aan te sluiten. Er zijn in de jaren tachtig bijvoorbeeld modelberekeningen gedaan aan de vorming van *bipolaire* planetaire nevels, die ontstaan bij snel roterende sterren. Deze blijken spectaculair goed overeen te komen met verschijnselen die recent werden waargenomen. In figuur 1 is een computeruitdraai weergegeven van Mellema en Icke, en in figuur 2 een foto die recent is gemaakt met de Hubble Space Telescope.

figuur 2



In normale sterren wordt de druk die nodig is om de aantrekking van de zwaartekracht te weerstaan voor een belangrijk deel opgebracht door de gasdruk, dus eigenlijk gewoon via $pV = nRT$. Al spoedig na het ontdekken van het speciale karakter van Sirius B werd duidelijk dat die gasdruk hier bij lange na niet voldoende kon zijn. (en hetzelfde blijkt te gelden voor de stralingsdruk, die bovendien bij het afkoelen van de witte dwerg steeds minder wordt)

Het inwendige van witte dwergen

Een interessant aspect van witte dwergen is dat voor het verklaren van hun inwendige structuur de quantum fysica onontbeerlijk is.

Opgave 1

Op grond van waarnemingen aan de lichtkracht, de temperatuur en de omlooperperiode van Sirius A en Sirius B, konden de omvang en de massa van Sirius B worden bepaald. Het bleek dat Sirius B ongeveer net zo zwaar is als de zon, en ongeveer net zo groot als de aarde.

- Bereken de dichtheid van Sirius B.
Op grond van veronderstellingen over het warmtetransport in de ster, blijkt dat de temperatuur in het inwendige niet veel hoger kan zijn dan ongeveer 10^7 K.
- Stel dat Sirius B geheel uit koolstof zou bestaan, hoeveel mol koolstof is er dan aanwezig op Sirius B?
- Stel dat alle koolstofatomen geheel geïoniseerd zijn, hoeveel mol vrije elektronen zijn er dan aanwezig op Sirius B?
- Geef met behulp van de algemene gaswet een schatting van de gasdruk in het inwendige van Sirius B.

Voor een schatting van de druk die nodig is om evenwicht te bereiken met de zwaartekracht,

kunnen we weer gebruik maken van de

formule
$$p = \frac{3GM^2}{4\pi R^4}$$

Opgave 2

Laat zien dat de druk in de kern van Sirius B van de orde van grootte van 10^{22} Pa moet zijn.

Uit de berekeningen blijkt dus dat de gasdruk hoogstens ongeveer een promille zou kunnen bijdragen aan wat er nodig is om instorting onder invloed van de zwaartekracht te weerstaan.

Gedegenererde materie

Stermateriaal is in de plasmafase, en geleidt zo goed dat in goede benadering weer het model van het deeltje in een doos van toepassing is op de elektronen. Er is echter een belangrijk verschil tussen het gedrag van elektronen in een gewoon plasma, en in een superdicht plasma zoals

dat gevonden kan worden in een witte dwerg of in sommige sterkernen.

In een gewoon plasma zorgt de thermische beweging van de elektronen ervoor dat de elektronen zich niet kunnen verzamelen in de laagste energieniveaus. Door botsingen, met elkaar, met de aanwezige positieve ionen en met fotonen, worden ze voortdurend aangeslagen naar hogere energieniveaus. Doordat er veel energieniveaus onbezet zijn, kunnen de elektronen ook gemakkelijk wisselen. In deze omstandigheden gedragen de elektronen zich als een gas, en wordt hun bijdrage aan de druk in goede benadering beschreven door de gaswetten.

In een witte dwerg is de gasdruk niet genoeg om weerstand te bieden aan de zwaartekracht,

en wordt de materie veel dichter op elkaar geperst. Het effect van deze veel hogere druk is dat de elektronen zich nu wel verzamelen in de lagere energieniveaus. Deze zijn dan ook vrijwel geheel bezet. Boven de niveaus die zijn opgevuld, zijn er maar weinig elektronen met nog hogere energie. Temperatuur heeft dus ook eigenlijk maar weinig invloed op de eigenschappen van een dergelijk plasma. Een elektronengas in een dergelijke toestand wordt een *gedegenererd* elektronengas genoemd. Het gedraagt zich bij samenpersen heel anders dan een gewoon gas.

Opgave 3

Bekijk de elektronen als deeltjes in een doos. Samenpersen van het gas betekent dat de doos kleiner wordt.

- a. Leg uit waarom de kinetische energie van een elektron in een bepaald energieniveau hierdoor toeneemt.

Als het gas niet gedegenererd is, *hoeft* hierdoor de kinetische energie van de elektronen in principe niet toe te nemen. De elektronen kunnen namelijk naar een lager energieniveau vervallen, waarbij ze de toegevoerde energie weer afstaan aan de omgeving.

- b. Beschrijf in macroscopische termen hoe de energie die bij het samenpersen van een gas of een plasma wordt toegevoegd kan worden afgevoerd.

Door deze mogelijkheid om toegevoerde energie weer af te voeren is een gewoon gas veel flexibeler onder samendrukken dan een gedegenererd gas.

- c. Leg uit waarom bij het gedegenererde gas de elektronen niet kunnen vervallen naar een lager energieniveau.

Conclusie

In een witte dwerg is zoveel massa binnen een zo kleine ruimte geconcentreerd, dat zelfs bij de daar heersende druk en temperatuur de gasdruk noch de stralingsdruk voldoende zijn om de zwaartekracht te weerstaan. Dat er toch witte dwergen kunnen bestaan is weer een direct

gevolg van het feit dat elektronen fermionen zijn. Ze moeten voldoen aan het Pauli verbod. Witte dwergen ontlenen, net als metalen, hun stevigheid aan een gedegenererd elektronengas. Het kan worden uitgerekend dat het gedegenererde elektronengas *wel* voldoende druk kan leveren.

Berekening (voor liefhebbers)

Voor de energie van een elektronengas in een driedimensionale kubus met ribben kan de volgende formule worden afgeleid:

$$E = 3,5 \cdot 10^{-38} \cdot \frac{Ne^{5/3}}{L^2}$$

waarin N_e het totaal aantal elektronen in de kubus is.

Uit deze formule is binnen enkele stappen ook een formule af te leiden voor de *druk* van het elektronengas.

Stel dat je deze kubus een klein beetje wilt indrukken, zodat alle ribben een stukje ΔL korter worden. Om de ribben in de x -richting korter te maken moet een hoeveelheid arbeid worden verricht, gegeven door $W = F\Delta L$, waarbij de kracht F gelijk is aan druk maal oppervlak, $F = pL^2$.

In de y - en de z -richting moet nog eens dezelfde hoeveelheid arbeid worden verricht. Door de verrichtte arbeid neemt de energie van de elektronen dus toe met:

$$\Delta E = -3pL^2 \Delta L$$

waar het min-teken opduikt omdat ΔE positief is en ΔL negatief.

Zodoende kunnen we voor de druk afleiden dat $p = - (1/3L^2) dE/dL$.

Toepassen hiervan op de formule voor de energie, en gebruik van $L^3 = V$, het volume van de kubus, geeft:

$$\begin{aligned} p &= 3,5 \cdot 10^{-38} \cdot (2/3) \cdot \frac{Ne^{5/3}}{L^5} \\ &= 2,3 \cdot 10^{-38} \cdot \left(\frac{Ne}{V} \right)^{5/3} \end{aligned}$$

Wat er nu nog moet gebeuren is het berekenen van N_e/V , het aantal elektronen per volume-eenheid. In opgave 117 werd al een schatting gemaakt van het totaal aantal elektronen op Sirius B. Delen door het volume geeft een elektronendichtheid van ongeveer $6 \cdot 10^{35}$ elektronen per m^3 . Invullen in de formule geeft:

$$p = 2,34 \cdot 10^{-38} (6 \cdot 10^{35})^{5/3} = 10^{22} \text{ Pa}$$

Voor een witte dwerg vergelijkbaar met Sirius B kunnen we uit de berekening concluderen dat de druk van het gedegenererde elektronengas in principe genoeg is om instorten te voorkomen. Een tweede belangrijk resultaat is dat de gevonden druk niet afhangt van de temperatuur, wat bij gebruik van de normale gaswetten wel het geval was. Dit betekent dat de witte dwerg, die na het aflopen van de kernfusieprocessen geen energiebron meer heeft, veilig kan afkoelen zonder alsnog in te storten.

Opgave 4

Voor een witte dwerg met een vaste samenstelling is de elektronendichtheid N_e/V evenredig met de dichtheid ρ .

a. Beredeneer dat dit klopt.

Voor de druk van een gedegenererd elektronengas vonden liefhebbers de formule

$$p = 2,3 \cdot 10^{-38} \cdot \left(\frac{Ne}{V} \right)^{5/3}$$

b. Leid hieruit af dat de druk evenredig is met de dichtheid tot de macht 5/3: $p \propto \rho^{5/3}$

Voor een schatting van de druk in de witte dwerg hebben we gebruik gemaakt van de formule

$$p = \frac{3GM^2}{4\pi R^4}$$

c. Leid hieruit af dat de druk evenredig is met het kwadraat van dichtheid maal straal: $p \propto \rho^2 R^2$

d. Gebruik $p \propto \rho^{5/3}$, $p \propto \rho^2 R^2$ en $p \propto M/R^3$ om af te leiden dat: $R \propto M^{1/3}$

e. Gebruik deze formule om aan te tonen dat een witte dwerg kleiner moet worden naarmate de massa toeneemt.

Ondanks dit resultaat, dat witte dwergen van iedere mogelijke massa lijkt toe te laten, ontstaat er bij toenemende massa toch een

Witte dwergen, neutronensterren en zwarte gaten

Bij een witte dwerg zoals Sirius B, met een massa vergelijkbaar met die van de zon, kunnen de elektronen de druk van de zwaartekracht weerstaan. Maar wat gebeurt er met een ster met een veel zwaardere kern? Op het eerste gezicht is er niet zo veel aan de hand. Als de ster zwaarder wordt neemt de zwaartekracht toe, de elektronen worden meer in elkaar gedrukt, en de druk neemt toe. Met gebruik van hier al gebruikte formules kan worden afgeleid dat de witte dwerg kleiner wordt naarmate de massa groter wordt.

probleem. De formule voor de druk van het gedegenererd elektronengas maakt gebruik van de klassieke formule voor de kinetische

energie: $E_k = p^2/2m$. Volgens de relativiteitstheorie is deze formule slechts een benadering, die geldt zolang de kinetische energie veel kleiner is dan de rustenergie m_0c^2 . Echter, naarmate de druk op de elektronen toeneemt wordt de energie steeds hoger, en bij gebruik van de relativistische

energieformule blijkt dat elektronen die relativistisch worden minder bijdragen aan de toename van de druk. Dit verschijnsel is dodelijk voor de witte dwerg met overgewicht. Als een witte dwerg te zwaar wordt, is het niet meer mogelijk om een evenwicht te bereiken tussen de druk en de zwaartekracht, en de witte dwerg stort in.

Opgave 5 (Voor liefhebbers)

Voor deeltjes waarvan de kinetische energie veel groter is dan de rustenergie geldt in benadering dat $E = pc$, waarin c de lichtsnelheid is.

De berekening voor de energie van een kubus gedegenererd elektronengas kan nu worden overgedaan, met $E = pc = hc/2L$ in plaats van $E = n^2h^2/8mL^2$. Vervolgens kan ook de druk opnieuw worden uitgerekend, en dan blijkt dat $p \propto \rho^{4/3}$, in plaats van $p \propto \rho^{5/3}$.

Voor de echte liefhebber met een beetje tijd over: ga je gang.

De massa waarbij instorting plaatsvindt heet de Chandrasekhar limiet, naar de Indiase natuurkundige Subrahmanyan Chandrasekhar, die dit in 1931 heeft berekend, en bedraagt $1,44 M_{\text{zon}}$. Een enorme ondersteuning voor de theorie over witte dwergen is dat er inderdaad geen

witte dwergen met grotere massa gevonden zijn.

Voor een zwaardere ster is er dan nog één bekende mogelijkheid om de totale ineenstorting te voorkomen. Als de energie van de elektronen hoog genoeg is, kunnen ze via elektronvangst protonen omzetten in neutronen.

Opgave 6

- Geef de reactievergelijking voor dit proces.
- Bereken hoeveel energie er nodig is om, via de vangst van zes elektronen, een koolstofkern geheel in neutronen om te zetten.

Neutronen zijn, net als elektronen, fermionen, en moeten dus voldoen aan het Pauli-verbod. Neutronen hebben echter ook een veel grotere massa dan elektronen, en hun energie bereikt dus minder snel relativistische waarden. De druk in een ster die overeind wordt gehouden door een gedegenererd neutronengas kan hierdoor veel verder oplopen dan wanneer de elektronen voor de druk zorgen. Aan de andere kant is de bijdrage aan de druk omgekeerd evenredig met de massa (vanwege

de factor $h^2/8mL^2$ in de energieformule), zodat de neutronen pas bij zeer grote dichtheid voldoende druk leveren. Het evenwicht tussen gewicht en druk kan ook in dit geval weer worden doorgerekend, met als resultaat dat de straal van een neutronenster ongeveer 10^3 maal zo klein moet zijn als die van een witte dwerg. Een neutronenster van enkele zonsmassa's zou een straal hebben van een kilometer of tien.

Opgave 7

- Ga uit van een neutronenster van $2 M_{\text{zon}}$, met een straal van 10 km, en bereken de dichtheid.
- Een bacterie lijdt aan overgewicht, na het eten een cm^3 neutronstermateriaal. Hoe zwaar is de bacterie?
- Een cm^3 neutronstermateriaal wordt vervoerd in een vloot schepen met een gemiddeld laadvermogen van 10^4 ton. Hoeveel schepen zijn er nodig?

Neutronensterren ontstaan ofwel door het instorten van een witte dwerg, die te zwaar wordt doordat er extra massa opvalt, ofwel direct, als eindproduct van een ster waarvan de kern te zwaar is om als witte dwerg te eindigen. Ook neutronensterren zijn

waargenomen. Net als witte dwergen zijn ze echter gebonden aan een massalimiet, van ongeveer $3M_{\text{zon}}$. Boven deze limiet bestaat geen bekend proces dat verder instorten tegen kan houden.

Opgave 8

Leg uit waarom er een limiet is aan de massa van een neutronenster.

Voor nog zwaardere sterren wijst de huidige stand van de theorie in de richting van een totale verdere instorting tot een zwart gat, een massaconcentratie die zo sterk is dat zelfs licht niet aan de zwaartekracht ervan kan ontsnappen. Een groeiende hoeveelheid waarnemingen wijst inderdaad op het bestaan van deze objecten (1,2,3). Er is veel bekend over de natuurkunde van zwarte gaten, maar voor een meer gedetailleerd begrip is een stevige dosis relativiteitstheorie onontbeerlijk. Ze zijn dan ook geen onderdeel van de leerstof van deze cursus.

Supernova's en de bouwstenen van de materie

Middelgrote sterren als de zon verliezen aan het eind van hun leven de buitenste lagen, die worden weggeblazen doordat de fusieschil te dicht onder de oppervlakte komt te liggen, en doordat in de krimpende kern druk en temperatuur zo ver oplopen dat er een nieuwe ronde kernfusie plaatsvindt, tot aan de vorming van koolstof.

Ook een zware ster verliest aan het eind van zijn leven veel materiaal, maar dit gebeurt op een veel heftiger manier. In de kern van de ster zijn druk en temperatuur zo hoog dat er fusie plaatsvindt op veel grotere schaal dan in de zon. (Er geldt dan ook dat hoe zwaarder de ster, des te korter zijn levensduur). De fusie gaat ook al tijdens de normale levensduur van de ster veel verder dan de vorming van helium.

Als de waterstof in de kern op is trekt de kern samen tot druk en temperatuur hoog genoeg zijn om uit helium elementen als koolstof, zuurstof en neon te vormen. In de schil om de kern heen, gaat intussen de waterstofverbranding door. Als de helium op is trekt de kern verder samen en worden elementen als natrium, magnesium en silicium gevormd. Tenslotte wordt er in de kern ijzer en cobalt gevormd, en dan is het op. Verdere fusie *kost* energie. De kern komt zonder brandstof te zitten, en stort op een gegeven moment in. Afhankelijk van de massa blijft er van de kern een neutronenster of een zwart gat over.

Bij de instorting van de kern komt een enorme hoeveelheid energie vrij. De buitenlagen storten eerst mee naar binnen, maar dit wordt gestopt, waarna een enorme schokgolf door de ster naar buiten trekt. De drukgolf wordt versterkt door explosie van kernfusie. Hierbij worden naast alle reeds genoemde elementen ook zwaardere elementen als lood, zilver en goud, tot aan uranium toe gevormd.

Een dergelijke explosie heet een supernova, en al het materiaal van de buitenlagen wordt hierbij met kracht de ruimte ingeslingerd. Het gevolg is dat een volgende generatie sterren, die ontstaat in een door supernova's 'vervuild' omgeving, naast waterstof ook aanzienlijke hoeveelheden (enkele procenten) andere stoffen kan bevatten.

Opgave 9

Welke eenvoudige observatie volstaat om aan te tonen dat de zon ook zo'n tweede generatie ster is?

Opgave 10

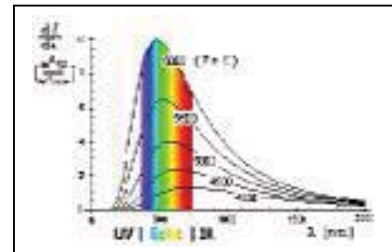
De stoffen die we dagelijks om ons heen zien zijn opgebouwd uit een kleine honderd elementen, waarvan er maar een handjevol veel voorkomen. Tabel 100 D in BINAS geeft een overzicht van de samenstelling van wat we weten over de samenstelling van het heelal, de aardkorst en het menselijk lichaam.

- Bekijk de tabel en noteer een aantal opmerkelijke overeenkomsten en verschillen.
- Bereken voor de vijf meest voorkomende elementen in het heelal hun percentage.
- Leg uit waarom helium in onszelf en in de aardkorst zo weinig voorkomt, terwijl er in het heelal zo veel van is.
Inmiddels weten we dat elementen uit nog kleinere bouwstenen bestaan. Van de tegenwoordig bekende deeltjes die als elementaire beschouwd worden, zijn er maar een paar die veel voorkomen: Atomen zijn opgebouwd uit up- en down-quarks en elektronen, en daarnaast zijn er in het heelal een heleboel fotonen en neutrino's.
- Leg uit of een mens meer quarks of meer elektronen bevat.
- Leg uit of een mens meer up-quarks of meer down-quarks bevat.
- Schat het aantal fotonen dat de zon per seconde uitzendt en gok wat er meer voorkomt in het heelal, quarks of fotonen.

Conceptuele en andere vragen bij PMN Astrofysica

De onderstaande vragen kunnen gebruikt worden voor discussie in kleine groepjes. De docent gaat rond en heeft een mooie gelegenheid om door luisteren erachter te komen waar de begripknelpunten liggen. Daar kan dan ter plekke of later plenair op in worden gegaan.

1. Alles wat we weten over het heelal komt van waarnemingen vanaf grote afstand en voor een groot deel daterend van de laatste 100 jaar en dus van een momentopname in de geschiedenis van het heelal. Toch denken we dat we veel weten en kunnen we aardig wat voorspellen.
 - a) Welke aannames maken we wanneer we het heelal bestuderen?
 - b) Vind je dat we toch een stevige basis hebben voor kennis over het heelal, of niet? Leg uit.
2. Stel dat we zo maar zouden waarnemen, zonder theorie. Wat voor bezwaren kleven daar aan? Is het eigenlijk wel mogelijk om waar te nemen zonder theorie, zonder ideeën in je hoofd over wat je ziet?
3. Zelfs in de oudheid werd *met* theorie waargenomen. Wat was de theorie van Ptolemeus en hoe beïnvloedde die de waarnemingen en interpretaties van het begin van de jaartelling tot Kepler? (staat niets over in het PMN lesmateriaal, maar mogelijk wel in ANW).
4. Geef voorbeelden van hoe een theorie onze waarnemingen beperkt waardoor we bepaalde astronomieverschijnselen gewoon niet zouden zien.
5. Geef voorbeelden van hoe een theorie juist onze waarnemingen verruimt en ons juist naar iets doet kijken waar we eerder niet naar gezocht zouden hebben.
6. Bij de proef waarbij je de straling van een 100W gloeilamp op je huid voelt en vergelijkt met de straling van de zon op je huid, welke straling uit het spectrum “meet” je dan?
7. Noem verschillen tussen het plasma in het binnenste van een ster en plasma in een tl-buis.
8. Gassen reageren niet of nauwelijks op elektrische en magnetische velden. Plasma’s wel, verklaar.
9. Kelvin en Helmholtz stelden voor dat de zon zijn energie krijgt uit gravitatie-energie door samentrekking. De levensduur van de zon zou dan ongeveer 25 miljoen jaar zijn. Welke waarnemingen op aarde spreken dit tegen?
10. Men neemt al lange tijd aan dat kernfusie de energiebron van de zon is. Maar hoe weten we dat eigenlijk? Welke waarnemingen ondersteunen dat?
11. Wat is de reden dat kernfusie zulke hoge temperaturen vereist?
12. Kijk eens naar de vergelijkingen, is kernfusie radioactief?
13. Toch speelt the samentrekkingstheorie van Kelvin en Helmholtz een rol in de evolutie van sterren en zelfs bij kernfusie. Leg uit.
14. Vergelijk de eindstadia van lichte met zware sterren. Daar staat niet zoveel over in het PMN materiaal. Mogelijk moet je toch even het internet op of kijken in een astronomieboek.
15. Hoe komt het dat een witte dwerg niet helemaal in elkaar klappt? Welk begrippen uit de quantumfysica zijn daarvoor nodig?
16. Zie figuur 69 en noem de belangrijkste karakteristieken van de grafieken. Hoe kunnen we hieruit de temperatuur van de fotosfeer¹ oppervlak van een ster bepalen?
17. Helium werd voor het eerst ontdekt in de atmosfeer van de zon. Hoe kon men zo maar tot de conclusie komen dat er een nieuw element was?
18. Inmiddels is helium ook op aarde gevonden. Bij welk proces wordt Helium voortdurend gevormd en vrijwel overal op aarde?
19. Hoe kun je uit een spectrum aantonen dat er op de zon een magnetisch veld is en hoe sterk dat zou kunnen zijn?
20. Welke vooronderstellingen en theorie gebruik je in dit geval om waarnemingen te sturen en om ze te interpreteren?



¹ De fotosfeer: de laag van de zon die wij zien, de laag die het meeste licht uitzendt.

21. Stel dat we niet een buitenste relatief koele laag van de zon zagen, maar dat we rechtstreeks keken naar materie met een temperatuur van miljoenen graden. Zouden onze instrumenten dan toch nog gewone spectra opmeten, of niet? Leg uit.
22. Op pagina 102 staat een methode om de rotatiesnelheid van de zon te meten. Is die methode toepasbaar op sterren? Leg uit.
23. Kun je radiële snelheid (langs de kijkrichting) van sterren meten via het dopplereffect? Leg uit.
24. Kun je tangentiële snelheid (loodrecht op kijkrichting) van sterren meten via het dopplereffect?
25. Wat denk je dat er bij verre sterren beter gemeten kan worden, de radiële of de tangentiële snelheid?

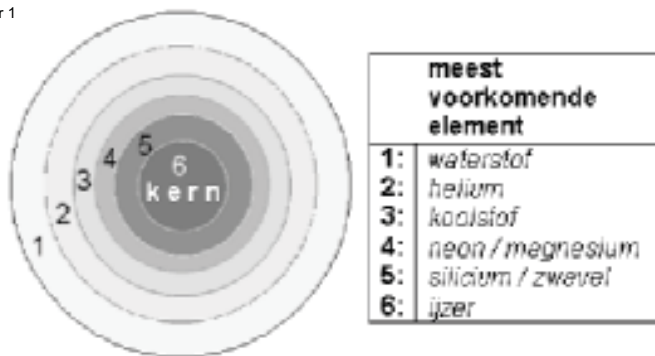
Opgaven uit Centrale Eindexamens en uit School Examens

Supernova

Commentaar: Dit is een opgave die PMN quantumfysica combineert met PMN astrofysica. In een quantum fysica hoofdstuk maakten leerlingen kennis met allerlei toepassingen van een deeltje in een quantumdoosje. In deze som passen ze het doosjesmodel toe op een Supernova, een behoorlijk grote doos dus en met spectaculaire resultaten. De opgave komt uit het Centrale Eindexamen PMN versie tweede periode 2004

Een middelzware ster zoals de zon krijgt zijn energie uit de fusie van waterstof tot helium in zijn kern. Bij zwaardere sterren gaat de fusie verder. De kern van een zware ster bestaat na een tijd voornamelijk uit ijzer, in de vorm van plasma. De vorming van nog zwaardere elementen dan ijzer levert geen energie meer op, maar kost energie. Dan stopt het fusieproces en begint de kern te krimpen. Zonder energiebron is de druk in de kern namelijk niet hoog genoeg om het gewicht van de buitenlagen te weerstaan.

figuur 1



Figuur 1 geeft de schematische opbouw van een zware ster, Rigel-A, een “blauwe superreus” met een massa van $5 \cdot 10^{31}$ kg en een straal van $8 \cdot 10^{10}$ m. De straal van de kern is in vergelijking hiermee verwaarloosbaar. Een ruwe schatting van de druk op de kern kan worden gemaakt met de formule:

$$p = \rho gh$$

Hierin is:

- ρ de gemiddelde dichtheid van de ster;
- g de valversnelling aan het steroppervlak van Rigel A, deze bedraagt $0,5 \text{ m/s}^2$;
- h de straal van de ster.

4p 17 □ Bereken met bovenstaande formule de druk op de kern van Rigel-A.

Het plasma waaruit de kern bestaat geleidt zeer goed. Als gevolg hiervan is op de elektronen in goede benadering het deeltje-in-een-doo model van toepassing. De doos is in dit geval de hele sterkern.

- 4p **18** Leg met behulp van de De-Broglie golflengte uit dat de kinetische energie van de elektronen toeneemt als de sterkern krimpt.

De energie van de elektronen zal steeds verder toenemen. Hierdoor treedt in sommige atoomkernen elektronvangst op, en wordt een proton wordt omgezet in een neutron en een neutrino.

- 3p **19** Teken het reactiediagram van de elektronvangst door een proton.

Een kernreactie waarbij elektronvangst plaatsvindt is de vorming van ijzer-59 uit kobalt-59.

- 4p **20** Bereken hoeveel energie het elektron minimaal moet hebben om deze reactie tot stand te brengen.

Ijzer-59 vervalt via β -verval terug naar kobalt-59. Op een bepaald moment wordt de energie van de elektronen zo groot, dat deze reactie-cyclus op grote schaal heel vaak herhaald wordt. Door de enorme hoeveelheid energie die nu binnen enkele seconden ontsnapt stort de kern in. In de buitenlagen zorgt dit voor een schokgolf die tevens een kernfusiegolf veroorzaakt. Samen met de zwaartekracht op de naar binnen vallende lagen levert dit de energie voor een supernova explosie, waarbij de lichtkracht van de ster met een factor 10^{11} toeneemt en dan geleidelijk uitdooft.

- 2p **21** Leg uit waardoor een groot deel van de energie die bij de elektronverval en -vangstreacties vrijkomt direct uit de ster kan ontsnappen.

Supernova correctiemodel

Antwoorden

Deel-
scores

Opgave 4 Supernova

Maximumscore 4

17 uitkomst: $1 \cdot 10^9$ Pa

voorbeeld van een berekening:

$$p \approx \rho gh = \frac{M}{\frac{1}{2}\pi R^3} \cdot \frac{GM}{R^2} \cdot R = \frac{GM^2}{\frac{1}{2}\pi R^4} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (5 \cdot 10^{31})^2}{\frac{1}{2}\pi (8 \cdot 10^{10})^4} = 9,7 \cdot 10^8 = 1 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

- gebruik van $g = \frac{GM}{R^2}$ 1
- gebruik van $\rho = \frac{M}{\frac{1}{2}\pi R^3}$ 1
- opzoeken en invullen van de getalswaarden 1
- completeren van de berekening 1

Maximumscore 2

18 voorbeeld van een antwoord:

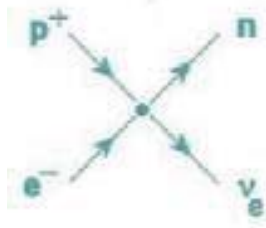
Als de kern kleiner wordt, wordt de beschikbare ruimte voor de elektronen kleiner en moet hun golflengte afnemen. Kleinere golflengte betekent grotere kinetische energie.

- inzicht in het verband tussen beschikbare ruimte en golflengte
- conclusie

1
1

Maximumscore 3

19 □ antwoord:



- p en e aan de linkerkant
- n en ν_e aan de rechterkant
- de pijlen in de goede richting

1
1
1

Maximumscore 4

20 □ antwoord:

$$\Delta m = m(\text{Fe}-59) - 26 m_e + m_e - m(\text{Co}-59) - 27 m_e = 0,00168 \text{ u} = 1,56 \text{ MeV}$$

- het gebruik van de massavergelijking
- opzoeken van de massa's
- omrekenen naar een energie-eenheid
- completeren van de berekening

1
1
1
1

Maximumscore 2

21 □ voorbeeld van een antwoord:

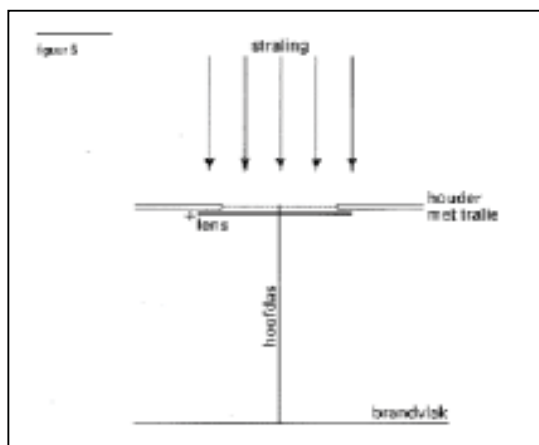
Bij de reacties ontstaan neutrino's, die bijna niet met de andere materie reageren en zodoende vrijwel ongehinderd kunnen ontsnappen, waarbij ook hun energie uit de kern verdwijnt.

- inzicht dat er veel neutrino's vrijkomen
- gebruik maken van het inzicht dat neutrino's bijna niet reageren met materie

1
1

Sterspectra

figuur 1



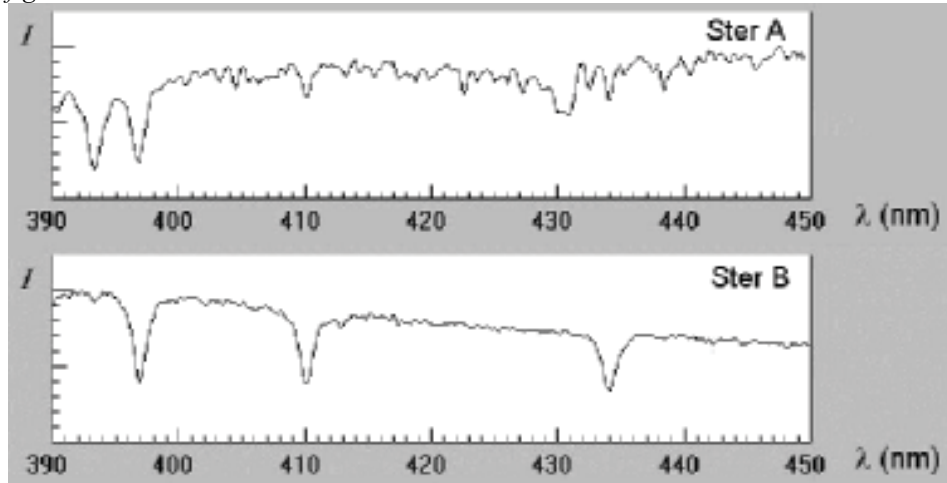
Medewerkers van een sterrenwacht laten de straling van een ster loodrecht op een tralie invallen, zodanig dat de gehele tralie wordt belicht. Vlak achter het tralie plaatsen ze een bolle lens. In figuur 1 is de situatie schematisch weergegeven.

- 2p 1 □ Leg uit wat het voordeel is van het gebruik van de lens in deze meetopstelling.

In het brandvlak van de lens ontstaan spectra. In een eerste orde spectrum meten ze de intensiteit van de straling als functie van de golflengte.

Op een dag wordt op dezelfde manier ook het spectrum van de zon gemeten. Van een deel van het spectrum wordt het (I, λ) -diagram vergeleken met dat van de ster. Beide diagrammen zijn in willekeurige volgorde weergegeven in figuur 2.

figuur 2



- 2p 2 Licht met behulp van tabel 20 uit het informatieboek Binas toe welk van beide diagrammen van de zon is.
- 3p 4 Leg op grond van figuur 2 uit welke van beide sterren, A of B, een hogere oppervlaktetemperatuur heeft.

Sterspectra Correctiemodel

- 2p 1 Voorbeeld van een antwoord:

Licht van één bepaalde golflengte komt als een evenwijdige bundel uit het tralie. De lens focuseert deze evenwijdige bundel in één punt in het brandvlak, zodat op die plaats voor een bepaalde golflengte een scherpe lijn wordt gevormd. (De golflengte is hierdoor nauwkeuriger te bepalen.)

- inzicht dat een bundel voorbij het tralie een zekere breedte heeft
- inzicht in de focuserende werking van de lens

[1]

[1]

Opmerking

Een antwoord als: "Om de lichtintensiteit te vergroten": 0 punten.

- 2p 2 Antwoord: A, want in dat diagram zijn de absorptielijnen bij 393 nm en 397 nm (en bij 431 nm) te zien.
- inzicht dat een 'dip' in het diagram overeenkomt met een absorptielijn in het spectrum
 - conclusie

[1]

[1]

- 3p 3 Antwoord: Het diagram van ster B is dalend en van ster A stijgend, dus het maximum van de stralingskromme van ster B ligt bij kleinere golflengte dan bij ster A.
Volgens de verschuivingswet van Wien ($\lambda_{\max} T = k_W$) heeft ster B een hogere

(oppervlakte-)temperatuur.

- inzicht dat het maximum van de stralingskromme van belang is
- inzicht dat dit maximum voor ster B bij kleinere golflengte ligt dan bij ster A
- conclusie

[1]
[1]
[1]

De Andromedanevel

De Andromedanevel is een sterrenstelsel dat lijkt op onze eigen Melkweg. In figuur 3 is een afbeelding van het stelsel te zien, met twee kleine naburige stelsels. De foto is gemaakt met een digitale camera die gekoppeld werd aan een telescoop.

De Andromedanevel bevindt zich op een afstand van $2,9 \cdot 10^6$ lichtjaar. De hoek tussen de uiteinden van de diameter, de hoekdiameter, bedraagt $3,0^\circ$.

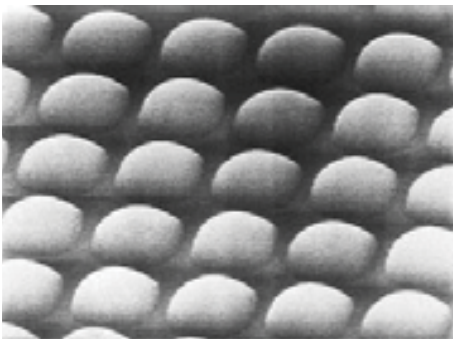


Figuur 3

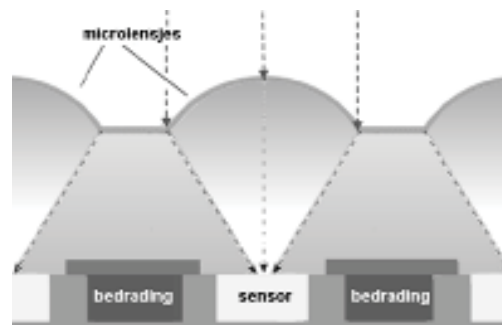
3p 10 □ Bereken de diameter van de Andromedanevel in meters.

Een digitale camera maakt gebruik van een CCD-detector. Een CCD bevat een groot aantal kleine lichtgevoelige cellen. Iedere cel bevat een klein microlensje, dat het licht focusteert op een stukje lichtgevoelig materiaal. Zie de figuren 4 en 5.

Figuur 4



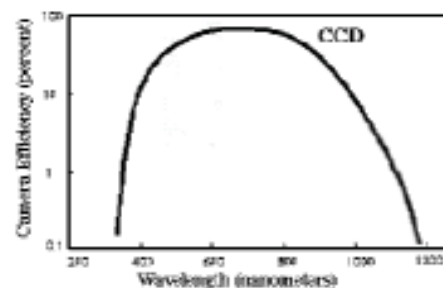
Figuur 5



De werking van de cel berust op het verschijnsel dat licht elektronen in een hogere energietoestand kan brengen. De elektronen kunnen vervolgens vrij bewegen door het gebruikte materiaal en worden verder verwerkt tot een digitaal signaal.

In figuur 6 is de gevoeligheid van een bepaald type CCD-cel weergegeven. Hieruit blijkt dat de cel niet gevoelig is voor infrarode straling met een golflengte groter dan 1200 nm.

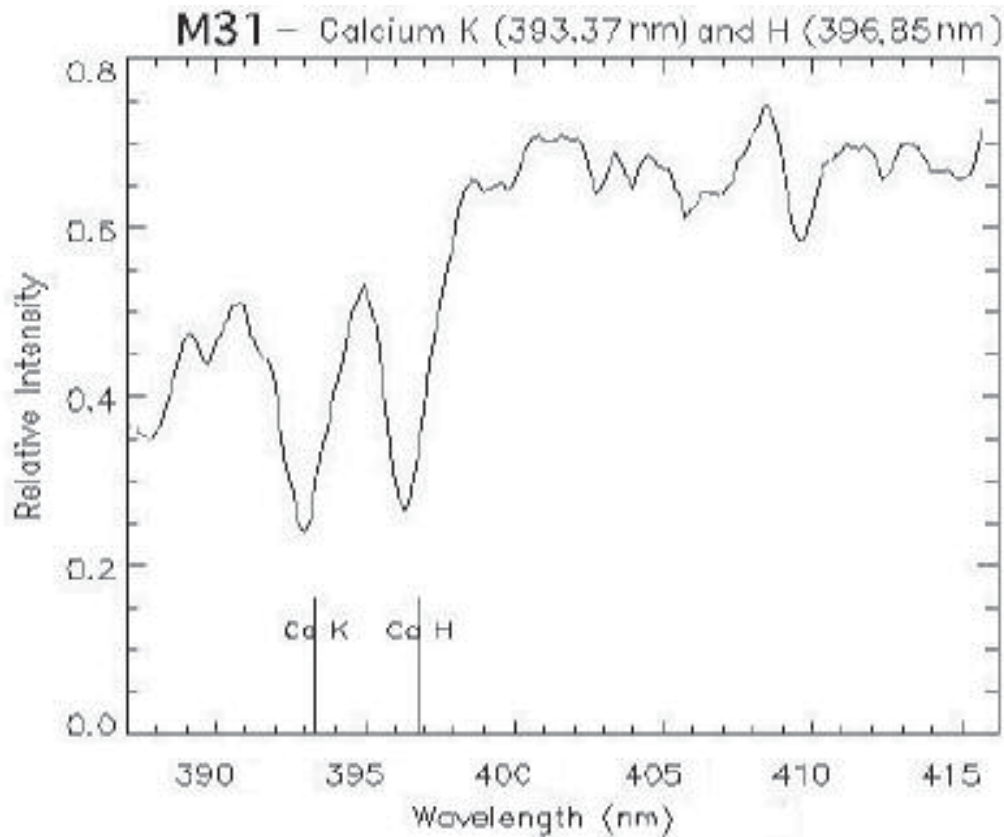
Figuur 6



- 3p **11** Leg uit waarom de gevoeligheid van een CCD-cel altijd begrensd is door een bepaalde maximale golflengte.

Een deel van het spectrum van de Andromedanevel, ook wel aangeduid met M31, is te zien in figuur 7. Onder in de figuur zijn ook twee lijnen van calcium te vinden (Ca K en Ca H) zoals die in een laboratoriumopstelling worden gemeten.

Figuur 7



Uit figuur 7 blijkt dat de absorptielijnen van het spectrum iets verschoven zijn ten opzichte van de geijkte lijnen.

- 2p **12** Licht aan de hand van figuur 7 toe of de Andromedanevel zich naar ons toe of van ons af beweegt.

Voor de golflengteverschuiving ($\Delta\lambda$) van een lijn geldt volgens het dopplereffect:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_r} = \frac{v}{c}$$

met λ_r de golflengte uitgezonden door een bron in rust, v de snelheid van een object en c de lichtsnelheid.

- 3p **13** Bepaal met behulp van de figuur de snelheid waarmee de Andromedanevel beweegt.

Andromedanevel correctiemodel

3p 10 uitkomst: $1,4 \cdot 10^{21}$ (m)

□

voorbeeld van berekening:

$$2,9 \cdot 10^6 \text{ lj} = 2,74 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

$$\tan 1,5^\circ = \frac{\frac{1}{2}d}{2,74 \cdot 10^{22}} \text{ dus } d = 1,4 \cdot 10^{21}$$

- omrekenen lichtjaar naar m
- gebruik $\tan \alpha$
- completeren berekening

[1]

[1]

[1]

Opmerking:

Als alternatief kan ook de hoek in radialen worden uitgedrukt en dan met $s = \alpha \cdot r$ de diameter berekenen.

Indien in plaats van de tangens de sinus wordt genomen zonder op te merken dat die voor kleine hoeken vrijwel gelijk zijn dan maximaal 2 punten.

3p 11 voorbeeld van een antwoord:

□

Om een elektron aan te slaan is een bepaalde minimale energie nodig. Bij een grotere golflengte hoort een kleinere frequentie en hebben de bijbehorende fotonen een lagere energie. Hiermee kunnen de elektronen niet meer naar de hogere toestand gebracht worden.

- inzicht dat er een minimale energie nodig is om een elektron aan te slaan
- inzicht dat bij grotere golflengte de bijbehorende fotonenergie kleiner is
- conclusie

[1]

[1]

[1]

2p 12 voorbeeld van een uitleg:

□

De absorptielijnen van calcium zijn verschoven naar een kleinere golflengte (blauwverschuiving). Dit betekent dat Andromeda zich naar ons toe beweegt.

- inzicht dat absorptielijnen verschoven zijn naar kleinere golflengte
- inzicht dat blauwverschuiving hoort bij een naderende beweging

[1]

[1]

4p 13 uitkomst: $v = 3 \cdot 10^5$ m/s

□

voorbeeld van een bepaling:

$$\Delta x = 2 (\pm 0,5) \text{ mm}$$

dus met schaalfactor volgt $\Delta \lambda = 0,8 \text{ nm}$

$$\Delta \lambda / \lambda_r = 0,8 / 397$$

$$\text{dus } v = 3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

- bepaling Δx in de figuur
- omrekenen naar $\Delta \lambda$ met schaalfactor
- gebruik formule $\Delta \lambda / \lambda_r = v / c$
- completeren van de berekening

[1]

[1]

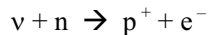
[1]

[1]

Antares

Commentaar: Dit is een opgave die in de eerste plaats over deeltjesfysica gaat, maar waarin aan het eind de sterrenkunde toch in beeld komt, omdat de neutrinedetector Antares bedoeld is als neutrinotelescoop waarmee processen in het heelal kunnen worden bestudeerd. Centraal Eindexamen 2002 2^{de} tijdvak (CE02T2)

Neutrino's kunnen alleen indirect worden waargenomen door de reacties die ze veroorzaken. Eén zo'n reactie betreft de botsing tussen een neutrino en een neutron, met de volgende reactievergelijking:



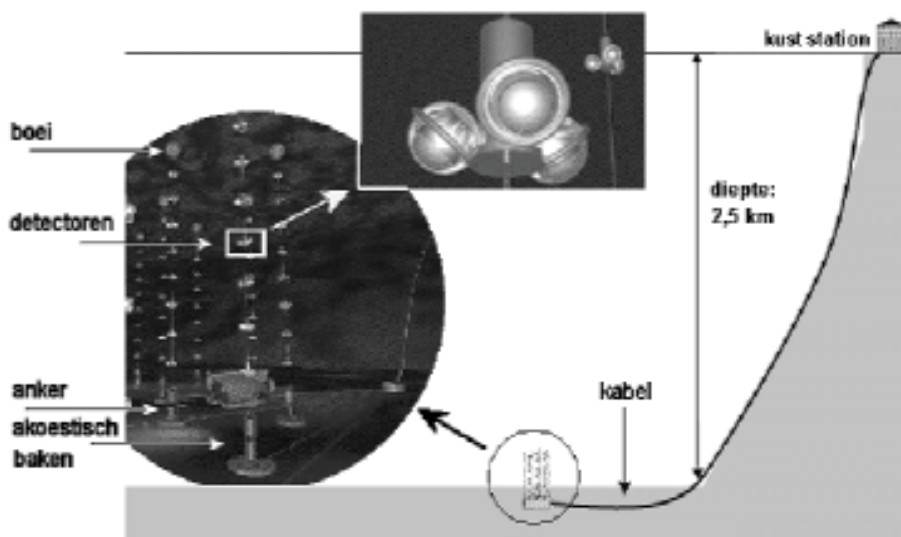
Er is een soortgelijke reactie die de wisselwerking van antineutrino's met materie beschrijft. Deze tweede reactie kan worden gebruikt voor het waarnemen van antineutrino's.

3p 1 Leidt met behulp van symmetrieën uit de gegeven reactievergelijking de bij deze tweede reactie behorende reactievergelijking af.

Neutrinedetectoren zijn altijd zeer groot. Antares, een neutrinedetector in aanbouw in de Middellandse Zee, zal bijvoorbeeld zo'n dertig miljoen kubieke meter zeewater omvatten.

2p 2 Leg uit waarom neutrinedetectoren groot moeten zijn.

Antares wordt aangelegd in een diep gedeelte van de Middellandse Zee, in de buurt van de Franse kust. Op een diepte van 2,5 km worden duizend zeer gevoelige lichtdetectoren bevestigd aan verticale kabels, die worden verankerd op de zeebodem. Zie figuur 1.



figuur 1

Als een neutrino via de gegeven reactie een elektron produceert, kunnen er lichtflitsjes ontstaan. De lichtdetectoren moeten deze lichtflitsjes waarnemen.

Op de diepte van de opstelling is er geen storende invloed meer van verstrooid daglicht. Het is opvallend dat de detectoren bovendien naar beneden gericht zijn, zodat alleen deeltjes die van onderen komen kunnen worden waargenomen.

2p 3 Geef een reden waarom de detectoren naar beneden gericht zijn.

De lichtflitsjes maken deel uit van de zogenaamde cherenkovstraling, die vrijkomt als de snelheid van het elektron groter is dan de lichtsnelheid in water.

Tussen de brekingsindices van twee media en de snelheid van het licht in die media bestaat het volgende verband:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Hierin is

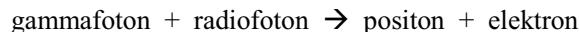
- n_1 de brekingsindex van medium 1;
- n_2 de brekingsindex van medium 2;
- v_1 de lichtsnelheid in medium 1;
- v_2 de lichtsnelheid in medium 2.

4p 4 Bereken de minimale snelheid van de elektronen die cherenkovstraling veroorzaken.

Antares is vooral bedoeld voor het bestuderen van hoog energetische processen ver weg in het heelal. Bij die processen komen behalve neutrino's, ook gammafotonen vrij.

Deze bereiken de aarde echter niet doordat ze onderweg reageren met de 'achtergrondstraling' in het heelal. Dit zijn radiofotonen met een frequentie in de orde van grootte van 10^{11} Hz.

Bij deze reactie wordt een elektron-positon paar gevormd:



Paarvorming door de interactie van een gammafoton (met energie E_1) en een radiofoton (met energie E_2) kan volgens de relativiteitstheorie alleen plaatsvinden als

$$E_1 \cdot E_2 \geq m_e^2 c^4$$

3p 5 Bereken de orde van grootte van de energie die een gammafoton minstens moet hebben om deze paarvorming mogelijk te maken.

Antares correctiemodel

3p voorbeeld van een antwoord:

1 toepassen van $X(\nu, e^-)$: ν naar rechts, e^- naar links levert: $n + e^+ \rightarrow p^+ + \bar{\nu}$
toepassen van T levert: $\bar{\nu} + p^+ \rightarrow n + e^+$

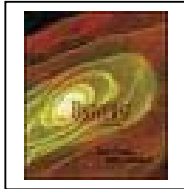
- toepassen van $X(\nu, e^-)$
- toepassen van T
- omdraaien

[1]
[1]
[1]

opmerking: eindresultaat $\bar{\nu} + e^- \rightarrow n + p^-$: Goed rekenen

- 2p voorbeeld van een antwoord:
De kans per atoomkern op een reactie met een neutrino is erg klein. Alleen door erg veel atoomkernen te gebruiken blijft nog een meetbaar signaal over.
- 2 inzicht dat de kans op interactie met een neutrino erg klein is [1]
 inzicht dat er dus erg veel kernen nodig zijn [1]
- 2p voorbeeld van een antwoord:
Door onder een dikke laag water (naar beneden) te kijken worden storende signalen ten gevolge van kosmische straling zoveel mogelijk onderdrukt (terwijl neutrino's dwars door de aarde vliegen).
- 3 inzicht in de noodzaak om ruis te onderdrukken [1]
 noemen van kosmische straling [1]
- 4p uitkomst: $v_{\min} = 2,242 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
voorbeeld van een berekening:
- 4 Uit $\frac{n_{\text{vacuum}}}{n_{\text{water}}} = \frac{v_{\min}}{c}$ volgt: $v_{\min} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{1,337} = 2,242 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.
- inzicht dat de brekingsindex van vacuüm 1,000 is en gebruik van c [1]
 opzoeken van c en van n_{water} [1]
 inzicht dat c_{water} minimaal voor blauw licht [1]
 completeren van de berekening [1]
- 3p uitkomst: de orde van grootte is 10^{-4} J
voorbeelden van een berekening:
- 5 $E_1 \cdot E_2 \geq m_e^2 c^4 = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ J}$. Hierin is $E_2 = hf = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{11} = 6,6 \cdot 10^{-23} \text{ J}$.
Dus $E_1 \geq \frac{6,7 \cdot 10^{-27}}{6,6 \cdot 10^{-23}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ J}$.
- De orde van grootte van de energie van het gammafoton is dus 10^{-4} J .
- berekenen van de energie van het radiofoton E_2 [1]
 berekenen van $m_e^2 c^4$ [1]
 completeren van de berekening [1]

Universe, een leerboek en naslagwerk over astronomie



Roger A. Freedman,
William J. Kaufman III
(2005). *Universe* (7th
edition), New York:
Freeman and Company.
Prijis Euro 63,80 (totaal, dus
inclusief verzendkosten) van Amazon.co.uk,
693 pagina's + appendices.

Op aanraden van Beare (zie artikel elders in dit boekje) heb ik *Universe* gekocht, als naslagwerk. Het is inderdaad een boek met een overzicht over de hele astrofysica: planeten en manen, zon, sterren en ster-evolutie, en galaxieën en de cosmos. Het is zeer up-to-date. Ik kocht het in augustus 2004. De datum in het boek is 2005, en in een paragraaf over zonneneutrino's vond ik inderdaad informatie over onderzoek van begin 2004!

Dit is de 7^{de} editie van een populair leerboek. De meeste fouten zullen er wel uit zijn al vond ik ergens pijltjes verkeerd staan. Gezien het publicatiesuccess, was er gelegenheid om illustraties, foto's, oefeningen, CD echt goed te doen. Auteur Roger Freedman is ook bekend van Young en Freedman *University Physics*, één van de populairste natuurkundeleerboeken in de VS, gepubliceerd door Pearson/Addison-Wesley. Dat is de oude Sears/Zemansky inmiddels in 11^{de} editie. De auteur van de eerste *Universe* edities Kaufman was in zijn leven een bekend astronoom en populair schrijver.

In de VS begint de Universiteit beneden ons VWO eindniveau. Alle studenten moeten eerst een brede oriëntatie doen. Gedurende de eerste twee jaar halen alle studenten studiepunten in exacte vakken, talen, *social science*, en *humanities*. Een student die uiteindelijk bestuurskunde of geschiedenis kiest als hoofdvak zal dus toch nog exacte vakken moeten doen. Het gaat om grote aantallen studenten met bijbehorende financiering. De afdelingen natuurkunde, biologie, scheikunde, en aardwetenschappen doen hun uiterste best om aantrekkelijke cursussen aan te bieden en elkaar studenten af te vangen. Er is dus een

breed aanbod van cursussen variërend van traditionele, wiskundige cursussen voor techniek studenten tot "science for poets" voor echte alfa's. Dat brede aanbod levert veel aantrekkelijke leerboeken op.

Universe is geheel in kleur en dat is natuurlijk prachtig voor een astronomie boek. De benodigde natuurkunde wordt steeds uitgelegd en dat is voor Freedman een koud kunstje gezien zijn lange ervaring met *University Physics*. Trouwens vanwege het vele onderwijs aan een breed publiek in het eerste jaar, hebben Amerikaanse universitair docenten meer ervaring met het uitleggen van basisbegrippen dan hun Nederlandse collega's. De echte astronomen onder ons zullen liever boek kopen dat dieper graaft en meer gericht is op 3^{de} jaars hoofdvakstudenten dan op 1^{ste} jaars gemengd publiek.

Er zijn een aantal handige rubrieken. In *Tools of the Astronomer's Trade* worden meettechnieken en eenvoudige berekeningen uitgelegd. Zo is er een pagina over het bepalen van tangentiële en radiale snelheden van sterren en een andere pagina over absolute helderheid, afstand, en schijnbare helderheid (*luminosity, distance, apparent brightness*). Elk hoofdstuk heeft aan het eind a) een overzicht van sleutelbegrippen, b) een fors aantal vragen (*review questions*) waarin de lezer zijn/haar begrip kan testen, c) *advanced questions* die nogal eens behoorlijke berekeningen kunnen eisen, d) discussievragen voor groepsdiscussies, e) Web of CD-ROM vragen die met behulp van web of CD moeten worden beantwoord, f) observatie opdrachten, en tenslotte g) groepsopdrachten. Een scala aan verwerkingsmogelijkheden. Er zijn enkele gast essays zoals een stukje door John Bahcall over de zon. In een andere rubriek wordt voortgaand onderzoek beschreven. Het boek komt met twee CDs. Eén CD heeft verdere uitbreidingen van het boek zoals voor elk hoofdstuk doelstellingen, animaties/videos, opdrachten met Starry Night Backyard (een planetarium programma op de tweede CD waarmee je de nachthemel op elke willekeurige datum en

vanaf elk punt op aarde op je scherm zet), verrijkingsstof, meerkeuzevragen voor zelftoetsing, weblinks, literatuurlinks, en geschiedenislinks.

Samenvattend: Universe geeft een encyclopedisch overzicht van sterrenkunde op eerste jaars niveau en heeft daarbij een zeer rijke schatkist aan verwerkingsmogelijkheden, didactische ideeën, en hulpmateriaal op CD.

Wat hebben wij daaraan in Nederland waar de sterrenkunde nauwelijks aan bod komt in het middelbaar onderwijs? *Universe* kan naslagwerk zijn voor de docent en bron voor leerlingprojecten, het boek moet binnen het bereik zijn van gemotiveerde NG of NT leerlingen. Docenten met veel meer achtergrond in de sterrenkunde hebben waarschijnlijk liever een soortgelijk boek maar dan op 3^{de} of 4^{de} jaars niveau. Wat mezelf betreft, ik wilde gewoon een naslagwerk voor astronomie op de plank hebben dat je ook eens af en toe in de trein mee kan nemen voor ontspannen lezen of zelfs plaatjes kijken en daar voldoet het uitstekend aan. Jammer toch dat onze volle middelbare school programma's geen ruimte hebben om keuze modules te doen, bv. over sterrenkunde!

Role Playing in Physics and Astronomy²

Het volgende artikel gaat over de bewegingen van de planeten rond de zon. Dat is geen stof voor de tweede fase, ook niet voor PMN, maar kan wel nuttig zijn in een ANW les, of gewoon als een eerste les in astronomie. Ed heeft dit in de Filippijnen vaak gedaan met studenten in de leraaropleiding van ongeveer 17 jaar oud en met middelbare school docenten.

Het rollenspel helpt om heen en weer te denken tussen zinnen over planetenbanen in een boek, een 2-dimensionaal beeld van mensen in het rollenspel, en een beoogd ruimtelijk beeld van planetenbanen in het hoofd.

Ed van den Berg³
Science and Mathematics Education
Institute, University of San Carlos
Talamban Campus
Cebu City, Philippines 6000

² Berg, E. van den (2000). Role-playing in Astronomy. *School Science Review*, 81(296), 125-129.

³ Presently at Centre for Science Education, University of Utrecht, Utrecht, Netherlands

Introduction

One of the main difficulties in physics and astronomy teaching is *visualization* of abstract concepts and theories. Another main problem is to get students involved. Role-playing or *simulations* by people can do both. For example, students could gain insight in electric circuits by playing electrons traveling through circuits and transporting energy from batteries to resistors and light bulbs. In one research study some students even reconstructed the proper relationships between current, voltage, and energy by remembering a role-play 2½ years earlier (Berg & Grosheide, 1997). As with every simulation and analogy, there are points of correspondence with the theory and there are points of non-correspondence. For example, popular molecular models are intended to show the spatial distribution of atoms in a crystal. However, students could get the impression that atoms are little balls and that atomic bonds are sticks between atoms. Or worse, students could get the idea that atoms *are* hard balls rather than mainly empty space. In any visualization or model the teacher/textbook will have to point out the points non-correspondence between the visualization and the theories and concepts. The non-correspondence is often not sufficiently emphasized. By having students repeat the role playing in small groups or by providing additional features to be simulated in small group role-plays, the teacher has an opportunity to listen and observe and discover unexpected student misinterpretations of the role-play. These can then be discussed in the small group or addressed in the final plenary closing discussion. The role-plays presented here have been used with students and teachers of various age groups. Please note that the plenary role-plays can be very gratifying and stimulating, but that the small group exercises of role plays with proper teacher checking and feed-back are essential to make the use of role-plays effective. The small group plays generate the important conceptual discussions about spatial relationships between astronomical objects. For beginning teachers plenary role-plays require less classroom management skill than small group plays, particularly if the small group plays take place outside the classroom in corridors and other spaces.

Astronomy Examples

Earth/planet revolution around the Sun: A student can walk around a light bulb (the Sun). The teacher asks questions about the timing and position, for example, let the student (Earth) go forward 3 months, or let him/her go forward and ask the class how much time elapsed. Points of non-correspondence obviously are the relative sizes of the light bulb (Sun) and student (Earth) and the shapes (non-spherical) as well as orientation (Earth rotation axis should be slanting). Use a circular orbit rather than an elliptical one to prevent students from exaggerating the varying distances from Earth to Sun (remember the popular misconception that seasons are caused by varying Earth-Sun distances so eminently displayed in the video *The Private Universe?*). The difference between aphelion and perihelion is only 5 million-km compared to the average Earth-Sun distance of 150 million km.

Earth rotation: Now introduce night and day. Let students suggest how to do that (while walking around the bulb, the student who plays Earth should keep turning around). A point of non-correspondence is the fact that the student's rotation axis is upright rather than tilted at 23° . One could demonstrate the tilting using a ball and a stick as axis. Another point of non-correspondence is that the demonstrating student is unlikely to rotate 365 times while going around the light bulb (Sun) once.

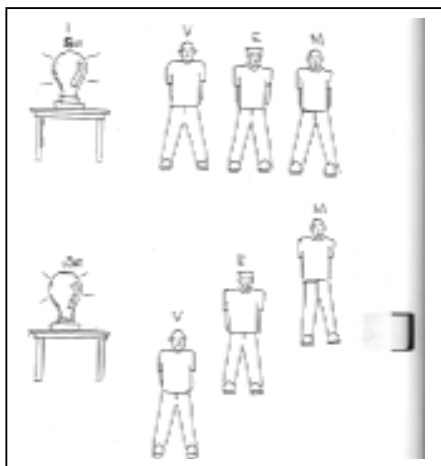


Figure 1: Three planets, Venus, Earth, and Mars moving with different angular velocities.

Other planets: One could have several planets go around the Sun at the same time. Just take only 3 planets in order not to confuse (Figures 1 and 2). For example, take Venus (revolves around the Sun in 224 days), Earth (365 days) and Mars (687 days). The Earth revolves almost twice during one revolution of Mars. This way one can show the different periods of revolution and *how that looks as seen from the Earth*. Several students could accompany the Earth in order to see the apparent motion of the planets as seen from Earth. The points of non-correspondence are again the relative distances of the planets to the Sun and the timing (one revolution in a minute instead of a year).

Zodiac star patterns throughout a year: One could place the light bulb (Sun) in the middle of the classroom. The student playing Earth can see the stars only at night, that is when the student has his/her back toward the light bulb (Sun). At opposite parts of the bulb, the student will face a different "sky", for example, the East respectively West wall of the classroom. The ceiling and floor can be seen from any point of the orbit of the student, so there are stars (Polaris in the Northern Hemisphere, Southern Cross at Southern Hemisphere) which can be observed all year round while stars closer to the ecliptic plane are seasonal.



Figure 2: Planets moving at different speeds around the Sun.

The major points of non-correspondence are again sizes and distances. The stars are very far away, almost infinitely far. Compared to the stars, the planets are almost infinitely close to the Earth and the Sun. Furthermore, the stars in a Zodiac pattern may have very different distances even though their apparent brightness might be similar. It is important to

include variation of distance in the role-play or in diagrams on the black board during the discussion afterwards. If the role-play is done in a big room, in the hall, or outside, then there is a good opportunity to vary the distance between Earth and the stellar background. Another point of non-correspondence is the fact that with a light bulb as Sun, objects across the light bulb on the other side of the room can be seen. However, the real Sun is so bright and the scattering of light by the atmosphere so strong, that during the day no stars can be seen at all.

Seasons (with balloon or ball and light bulb as Sun): Now the student going around the light bulb (Sun) carries a globe⁴. The rotation axis of the balloon or ball is tilted. Start on one side with the North Pole tilted away from the bulb. Then the student moves to the opposite side of the bulb while keeping the same orientation of the globe's axis. Now the North Pole will face the bulb and the South Pole will point away from the bulb. Abundant interaction between teacher and students will be necessary regarding the implications of the tilt of the Earth's axis such as intensity of solar radiation per unit of surface area and length of the day. It might be useful to have students repeat the role-play in small groups including explanations of the seasons. This sounds like mimicry, but while students repeat the role-play in small groups, the teacher listens and observes and has a good opportunity to pick up student misconceptions to be discussed in the small group and in the plenary closure of the lesson. Students need the exercise, explaining the seasons is difficult.

Moon revolution around the Earth: While the student E (Earth) is moving around the light bulb (Sun) another student M (Moon) is moving around student E. During one revolution around the light bulb, student M can revolve around student E almost 13 times. The major point of non-correspondence is that the Moon's orbit makes a small angle with the plane defined by the Sun and the Earth's revolution (the ecliptic plane). That small 5° angle is responsible for the fact that solar and lunar eclipses do not occur every month. Students discover this themselves in the role-

play. One way to get this clear is to do a demonstration with balls or balloons representing Earth (a basketball) and Moon (a tennis ball). The diameter of the Moon is about ¼ that of the Earth.

Faces of the Moon: This is a bit difficult to simulate with people only, but people and balls will do. Put the light bulb (Sun) far away. Use the teacher's head as the Earth and a tennis ball as the Moon. Then show the revolution of the Moon around the Earth. A darkened classroom would be nice. The advantage of using the teacher's head as Moon is that the teacher will exactly see faces of the Moon on the ball. Obviously this is a demonstration that should be repeated in small student groups. An alternative for the teacher's head is to use a basketball as Earth and a tennis ball as Moon and to show the faces of the Moon that way.

Solar and lunar eclipse: Using the same set-up as in faces of the Moon, one can illustrate a solar eclipse and why it only occurs once in a blue moon rather than every month. The tennis ball (Moon) moves around the basket ball or teacher's head (Earth) in a plane which is 5° tilted compared to the horizontal surface defined by the classroom floor (Earth and Sun system). In the demo one has to exaggerate this tilt to make things clear. The point where the Moon's orbit intersects the Sun-Earth plane (called ecliptic) is the only Moon location where a solar eclipse (Moon between Earth and Sun) or lunar eclipse (Moon "behind" Earth) could occur. The points of non-correspondence are again the relative sizes and distances of Sun and Earth-Moon.

Moon rotation: Student M is just walking around student E, so student M (Moon) always presents the same face to student E (Earth). Yet on balance student M rotates once during one revolution. This has to be played in a role-play to be clear to students! Again the points of non-correspondence are the relative distances and the orientation of the rotation axes of Moon and Earth. The fact that the Moon's rotation period exactly equals its revolution period around the Earth is not accidental but has to do with the history of tidal interaction between Moon and Earth.

⁴ Instead of a globe I have often used a balloon or ball with marks for the North and South Pole.

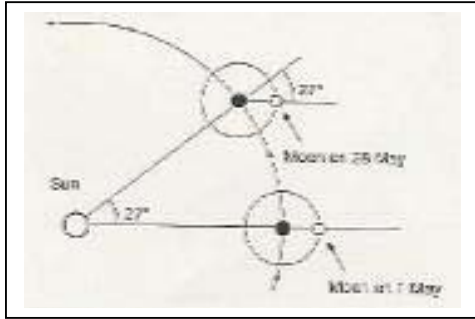


Figure 3: The Moon circling the Earth covers 360° in 27.3 days but needs another two days to line up with the Sun and the Earth again.

Difference between Moon revolution time (29.3 days) and Moon period (27.3 days): The moon revolves over 360° in 27.3 days but it takes the Moon 29.3 days to return to exactly the same position with respect to the Earth's surface. The reason is that in 27.3 days the Earth moves over $(360/365) \times 27.3 = 27^\circ$. So to return to exactly the same place above the Earth surface, the Moon has an extra 27° to go after completing its circle of 360° . This can be played out, but might be clearer through a diagram on the board after having done the previous role-plays (figure 3).

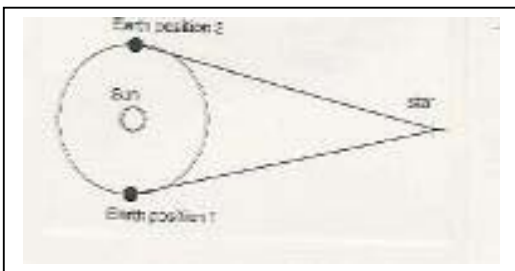


Figure 4: Distance measurement of stars using parallax

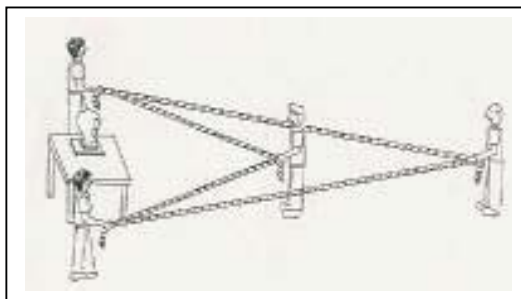


Figure 5: Acting out parallax and distance measurement. The parallax angles in the figure are greatly exaggerated.

Parallax and measurement of distance of stars:

One student (the Earth) is up front and revolves around the Sun (a light bulb or the teacher's table). Choose a student in the front row. The direction of the student as seen from the position to the left of the table and to the right of the table (positions of the Earth which are 6 months apart) is different (figure 4). If we now take a student in the back and compare the direction of that student from the two Earth positions, the angle between the two directions is smaller. If we would look at an object beyond the classroom windows, the angle between the two directions is smaller yet. So the angle between the two directions is a measure for distance. In fact, for small angles, halving the angle would mean doubling the distance. One could make the demo clearer yet by taking a long rope (clothes' line) and showing the triangle between the star (student) and the two Earth positions (other student, figure 5).

Acknowledgment

Renante C. Embalzado, then a third year physics teacher education student, drew figures 1 and 5. He has been teaching since June 2000.

References

1. Berg, E. van den, Grosheide, W. (1997). Learning and teaching about energy, power, current and voltage. *School Science Review*, 78(284), 89-94.

Worksheet for Small Group Tasks

The following are examples of tasks for small student groups doing their own role-plays after the teacher has demonstrated several role-plays in a plenary session. One could ask each student group to do the same tasks, or one could assign different tasks to different groups and ask them prepare a role-play for the plenary class closing session or the next day's lesson.

1. One student plays the Sun, another student plays the Earth:
 - Show how the Earth revolves around the Sun.
 - Show how far the Earth travels in 3 months, in 4 months, in 6 months.
 - Show the difference between the revolution and the rotation of the Earth.
2. One student plays the Sun, one Venus, one the Earth, and another one Mars. Venus is closer to the Sun. Its distance from the Sun is $3/4$ of the distance of the Earth-Sun distance. Why can we see Venus only right before Sunrise

and right after Sunset but not in the middle of the night? Try to answer this through a role-play. Remember that the Earth should rotate to simulate night and day. Try to role-play the difference between Venus being seen in the early morning and Venus being visible in the early evening. Also contrast the possible positions of Venus with those of Mars. What are the points of non-correspondence in your play?

3. One student plays the Sun, one the planet Pluto, and one the planet Neptune. The average distance Sun – Neptune is 30 astronomical units and Sun Pluto is 40 astronomical units, however, the Pluto orbit is much more elliptical than Neptune's. The planet Pluto is sometimes closer to the Sun than Neptune but most of the time it is farther than from the Sun than Neptune. The revolution periods are 84 years for Neptune and 250 years for Pluto. How could you role-play this?
4. One student plays the Sun, one plays a comet and other students can play various planets. How does a comet go around the Sun compared to the Earth? Is it possible to role-play that? What is the difference with the Earth orbit? What is the crucial point of non-correspondence with a real comet orbit?
5. One student plays the Earth, another student plays the Moon. The Moon always has its same face to the Earth. Proof in a role-play that this means that the Moon's rotation and revolution periods are equal, in other words, the Moon rotates once during one revolution around the Earth.
6. One student or a light bulb plays the Sun, another student carries a globe (if available, otherwise use a balloon with markings for N- and S-poles around the Sun.
 - Simulate the Earth's revolution and show the causes of the seasons on the Northern and Southern hemispheres.
 - Show the position at which it is summer in the North and winter in the South.
 - Show the position where it is summer in the South and winter in the North.
 - Show the position where North and South are equally well lighted, which dates are that in the year?
 - The Sun's energy received at a particular place on Earth depends on the length of the day and on the angle of the Sun's rays with the ground. Show how these two vary while the Earth revolves around the Sun.
7. Parallax: Demonstrate how the distance to stars can be measured by determining the difference in direction of a star from two points of the Earth revolution. It might be handy to use a few meters of string to connect the Earth to the star from two different positions. The two pieces of rope will intersect at the parallax angle. What are the points of non-correspondence in this simulation of parallax?

**Resources to enliven the
teaching of astronomy to
upper secondary students**

Richard Beare, *School Science Review*, June
2004, 85(313), p115-125

Bronnen op het gebied van sterrenkunde

Websites

Organisaties

- <http://www.sterrenkunde.nl/> (pagina van de Jongeren Werkgroep Sterrenkunde)
www.phys.uu.nl/~jwg (idem)
<http://www.astronomy.nl> (pagina van de professionele astronomen, maar met pr deel)
www.dekoepel.nl/ (Coördinerend bureau rond alles wat met amateursterrenkunde te maken heeft)
<http://www.phys.uu.nl/~eaae/> (Nederlandse afdeling European Association for Astronomy Education)
- <http://www.eso.org/outreach/> (European Southern Observatory, met educatie en outreach)
<http://www.esa.int/esaED/index.html> (European Space Agency, met educatie en outreach)

Lesmateriaal

- <http://www.astroex.org/> (grotere opdrachten voor eindexamenleerlingen; bronnen voor PWS)
<http://www.gettysburg.edu/academics/physics/clea/ASTRO.html>
<http://www.calvin.edu/~lmolnar/moon/Tool.html> (site om met de maanfasen te oefenen)
<http://www.phys.uu.nl/~wwwpmm> (hoofdstuk 5 Astrofysica)

Vakinhoudelijk

- <http://www.allesoversterrenkunde.nl> (site van wetenschapsjournalist Govert Schilling)
<http://www.xs4all.nl/~carlkop/astronet.html> (site van een wetenschapsjournalist Carl Koppeschaar)
<http://www.raayland.nl/vakken/aardrijkskunde/sterrenk.htm> (mooie site van een ANW-collega)
<http://www.dma.be/p/infoster/negepl/> (Tochtje door het Zonnestelsel; mooie plaatjes en info)

- <http://www.astromynotes.com> (uitleg van basissterrenkunde)
www.hubblesite.org (mooie foto's van de Hubble-ruimtetelescoop)
<http://www.jpl.nasa.gov/>
<http://www.seti-inst.edu/> (zoektocht naar buitenaards leven)
<http://exoplanets.org/> (actuele lijst van gegevens van planeten bij andere sterren)

Boeken

docenten

- | | | |
|--|-----------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Ontwikkeling van ideeën over het heelal
(lesmateriaal + docentenhandleiding + essay) | project ANW / SLO | 1996 |
| <input type="checkbox"/> Informatiemap Sterrenkunde voor ANW | NOVA | 2001 |
| <input type="checkbox"/> Evoluerend Heelal | Govert Schilling | 2004 |
| <input type="checkbox"/> De korste introductie KOSMOLOGIE | Peter Coles | 2003 |
| <input type="checkbox"/> De kosmos in een notendop | Govert Schilling | 2001 |
| <input type="checkbox"/> Evolutie in Wee- en Sterrenkunde | Mat Drummen e.a. | 2001 |
| <input type="checkbox"/> Stephen Hawking's Universum verklaard | David Filkin | |
| <input type="checkbox"/> Natuur en Techniek Wetenschappelijke Bibliotheek | | |
| - Sterren | | |
| - Kosmische Wolken | | |
| - Het zonnestelsel | | |
| - Planeten verkend | | |
| - en andere | | |
| <input type="checkbox"/> De evolutie van het leven | P. Whitfield (Natuur en Techniek) | |
| <input type="checkbox"/> De evolutie van de aarde | D. Elsom (Natuur en Techniek) | |
| <input type="checkbox"/> De evolutie van het heelal | C.A. Ronan (Natuur en Techniek) | |
| <input type="checkbox"/> Sterrengids (wordt jaarlijks uitgegeven door De Koepel) | | |
| <input type="checkbox"/> Jaarboek sterrenkunde (jaarlijks) | Govert Schilling | |

leerlingen

<input type="checkbox"/> Handboek sterrenkunde	Govert Schilling	2003
<input type="checkbox"/> Wat was er voor de oerknal?	Govert Schilling	1997
<input type="checkbox"/> Klein en groot – over micro en macrokosmos	Govert Schilling	1997
<input type="checkbox"/> Het universum voor beginners	F. Pirani en C. Roche	
<input type="checkbox"/> Sterrenkijken	David Levy	1996
<input type="checkbox"/> De ruimte ontdekken	H. Cooper en N. Henbest	1995
<input type="checkbox"/> Heelal zonder grenzen	Eddy Echternach	1992
<input type="checkbox"/> Sterren en planeten (wordt jaarlijks uitgegeven door De Koepel)		

Tijdschriften

- Zenit (sterrenkunde-weerkunde-ruimtevaart info bij De Koepel)
- Universum (voor en door jongeren van de Jongeren Werkgroep voor Sterrenkunde)
- artikelen in Natuurwetenschap en Techniek, Mens en Wetenschap, KIJK, EOS e.d.

Video's

<input type="checkbox"/> Stephen Hawkings Universum	Teleac / NOT	1997
<input type="checkbox"/> Reis door de ruimte (25 afl. 10 min + boek)	Teleac / NOT	1998
<input type="checkbox"/> Encyclopedia Galactica (25 afl. 10 min + handl.)	Teleac / NOT	1999
<input type="checkbox"/> Fysica Bits (blok 11 tm 13 + handl.)	Teleac / NOT	1999
<input type="checkbox"/> Het heelal	Teleac / NOT	2002
<input type="checkbox"/> Ontdekkingen van de 20e eeuw (enkele afl.)	Teleac / NOT	2002

CD's

- Redshift Multimedia Astronomy
- Starry Night Backyard
- Earth Centered Universe
- Skyglobe
- Leven in het Heelal (interactief, veel info:evolutie heelal, aarde en mens)
- Deep Impact (interactieve en educatieve gids voor kometen en het universum)

Antwoorden Conceptuele en andere vragen bij PMN Astrofysica

1. Alles wat we weten over het heelal komt van waarnemingen vanaf grote afstand en voor een groot deel daterend van de laatste 100 jaar en dus van een momentopname in de geschiedenis van het heelal. Toch denken we dat we veel weten en kunnen we aardig wat voorspellen.
 - a) Welke aannames maken we wanneer we het heelal bestuderen?
 - b) Vind je dat we toch een stevige basis hebben voor kennis over het heelal, of niet? Leg uit.

Aannames: Dat in het heelal overal dezelfde natuurwetten gelden als hier op aarde. We nemen ook aan dat het niet nodig is om een ster een paar miljard jaar te volgen om stervolutie te beschrijven, maar dat we onze theorieën over stervolutie kunnen toetsen door momentopnames van allerlei verschillende objecten op een rijtje te zetten. Doordat goede theorieën leiden tot zeer specifieke voorspellingen van waarneembare verschijnselen, kan de kennis voortdurend getoetst worden en krijgen we langzamerhand een behoorlijk consistent theoretisch bouwwerk dat goed overeenstemt met allerlei soorten waarnemingen.

2. Stel dat we zo maar zouden waarnemen, zonder theorie. Wat voor bezwaren kleven daar aan? Is het eigenlijk wel mogelijk om waar te nemen zonder theorie, zonder ideeën in je hoofd over wat je ziet?

Door zo maar waarnemen zonder theorie als gids, krijg je allerlei losse feitjes waar je niets mee opschiet. Trouwens, als je geen theorie hebt, weet je niet wat je ziet. Een lichtje in de nacht kan dan ook een gloeilamp zijn ipv een ster, of een lampion, of ... Zonder theorie weten we niet wat we zien. Dat geldt ook in het dagelijks leven. De stimuli van onze zintuigen zijn slechts elektrische signalen en krijgen alleen betekenis wanneer die in verband worden gebracht met de begrippenbibliotheek in de hersenen waar signalen geïnterpreteerd worden.

3. Zelfs in de oudheid werd *met* theorie waargenomen. Wat was de theorie van Ptolemeus en hoe beïnvloedde die de waarnemingen en interpretaties van het begin van de jaartelling tot Kepler? (staat niets over in het PMN lesmateriaal, maar mogelijk wel in ANW).

Ptolemeus verklaarde de voorwaartse en achterwaartse (retrograde) beweging van de planeten met cirkels en epicykels met de aarde als middelpunt. Met zijn complexe systeem slaagde hij erin de posities van planeten nauwkeurig te voorspellen. Mochten er afwijkingen zijn, dat was de neiging om de epicykels aan te passen of er nieuwe bij te verzinnen.

4. Geef voorbeelden van hoe een theorie onze waarnemingen beperkt waardoor we bepaalde astronomieverschijnselen gewoon niet zouden zien.

In een geocentrisch wereldbeeld probeer je alle waarnemingen van beweging van planeten en andere objecten in te passen in Ptolemeus'epicykel systeem. Vanuit een heliocentrisch wereldbeeld kijk je heel anders tegen planeten aan. Dan denk je aan aardachtige rotatie en revolutie van planeten en wat dat voor invloed zou kunnen hebben op planeten als Jupiter en Saturnus. Dan zie je de ringen van Saturnus in een ander licht. Je vindt dan ook een stormcel op Jupiter.

5. Geef voorbeelden van hoe een theorie juist onze waarnemingen verruimt en ons juist naar iets doet kijken waar we eerder niet naar gezocht zouden hebben.

Theorieën over uitdijning van het heelal hebben geleid tot het idee dat er veel meer massa moet zijn dan we tot dusver gezien hebben. Op grond daarvan gaan astronomen op zoek, bijvoorbeeld naar bruine dwergen...sterachtige objecten die te klein zijn om continue een fusiereactie op gang te houden. Inmiddels zijn deze ook ontdekt. Of, vanuit het idee van gravitatielenzen, afbuiging van licht door grote massa's, kan men concluderen dat verschillende melkwegstelsels op een bepaalde telescoopfoto allemaal beelden zijn van melkwegstelsel gezien door een gravitatielens.

6. Bij de proef waarbij je de straling van een 100W gloeilamp op je huid voelt en vergelijkt met de straling van de zon op je huid, welke straling uit het spectrum "meet" je dan?

Vooral infrarood.

7. Noem verschillen tussen het plasma in het binnenste van een ster en plasma in een tl-buis.

In een tl-buis zijn de meeste elektronen toch nog gebonden aan atoomkernen en samen vormen ze ionen, doordat er hier en daar enkele elektronen worden losgeslagen. In het binnenste van een ster zijn de meeste elektronen ongebonden en hebben we een mengsel van elektronen en geheel of vrijwel kale atoomkernen.

8. Gassen reageren niet of nauwelijks op elektrische en magnetische velden. Plasma's wel, verklaar. Gassen hebben neutrale moleculen/atomen. Bewegende neutrale moleculen/atomen worden niet afgebogen in elektrische en magnetische velden. In een plasma zijn de deeltjes geladen: elektronen en ionen. Die worden wel afgebogen.

9. Kelvin en Helmholtz stelden voor dat de zon zijn energie krijgt uit gravitatie-energie door samentrekking. De levensduur van de zon zou dan ongeveer 25 miljoen jaar zijn. Welke waarnemingen op aarde spreken dit tegen?

Allerlei geologische waarnemingen laten zien dat de aarde veel ouder dan 25 miljoen jaar. De dikte van allerlei sedimenten die zijn afgezet, erosieprocessen bij bergen, leeftijd van fossielen, etc. wijzen allemaal op een leeftijd in de orde van 4 miljard jaar.

10. Men neemt al lange tijd aan dat kernfusie de energiebron van de zon is. Maar hoe weten we dat eigenlijk? Welke waarnemingen ondersteunen dat?

Eén reden is dat we geen andere processen kennen die zoveel energie kunnen produceren en voor zo'n lange tijd. Ander bewijsmateriaal is dat er diverse fusieprocessen zijn: waterstof, en bij hogere temperaturen andere elementen waarbij uiteindelijk ijzer gevormd kan worden

11. Wat is de reden dat kernfusie zulke hoge temperaturen vereist?

Protonen moeten de wederzijdse Coulomb barrière overwinnen om binnen het bereik van de kernkracht te komen. De benodigde energie kan eventueel uitgerekend worden door in de elektrische potentiële energie $r = 10^{-15}$ m in te vullen. De typische temperatuur waarbij veel protonen die energie thermisch hebben kan gevonden worden door kT gelijk te stellen aan die potentiële energie.

12. Kijk eens naar de vergelijkingen, is kernfusie radioactief?

De enige deeltjes die vrijkomen zijn neutrino's en daar hebben mensen toch geen last van. Wel komt er gammastraling vrij, maar het is heel iets anders dan al die radioactieve restproducten die bij kernsplijting worden gevormd.

13. Toch speelt the samentrekkings-theorie van Kelvin en Helmholtz een rol in de evolutie van sterren en zelfs bij kernfusie. Leg uit.

De starttemperatuur voor kernfusie in een ster wordt bereikt m.b.v. gravitatieenergie uit de samentrekking van een grote waterstofwolk. Door het samentrekken wordt het binnenste van de wolk steeds heter totdat een temperatuur van miljoenen kelvin wordt bereikt en het fusieproces start.

14. Vergelijk de eindstadia van lichte met zware sterren. Daar staat niet zoveel over in het PMN materiaal. Mogelijk moet je toch even het internet op of kijken in een astronomieboek.

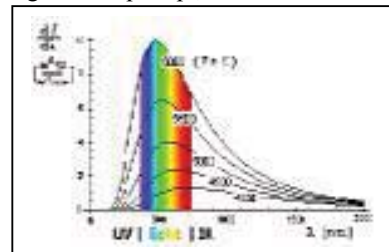
Lichte sterren: via een rode reus stadium wordt uiteindelijk een witte dwerg gecreëerd. Zware sterren: neutronenster of zwart gat. Zie diverse boeken en websites voor details.

15. Hoe komt het dat een witte dwerg niet helemaal in elkaar klapt? Welk begrippen uit de quantumfysica zijn daarvoor nodig?

Vanwege het Pauli principe kunnen de elektronen in een witte dwerg niet oneindig dicht bij elkaar komen. Het is de druk van een "gedegenereerd elektrongas" dat de stevigheid levert. Hierbij zijn alle elektrontoestanden tot aan het Fermi-niveau vrijwel geheel gevuld. De elektronendruk is voldoende zolang de massa van de witte dwerg de "Chandrasekharlimiet niet overschrijdt. (ongeveer 1,4 maal de massa van de zon) Valt er meer massa op de witte dwerg, bijvoorbeeld doordat hij in een dubbelstersysteem massa van zijn begeleider opslurpt, dan ontstaat een supernova-explosie waarbij een neutronenster of een zwart gat ontstaat.

16. Zie figuur 69 en noem de belangrijkste karakteristieken van de grafieken. Hoe kunnen we hieruit de temperatuur van de fotosfeer⁵ oppervlak van een ster bepalen?

Uit de ligging van de piek kan de temperatuur van de fotosfeer van een ster worden afgeleid. Hoe heter de ster, hoe kleiner de meest uitgestraalde golflengte, dus hoe meer naar links de piek in de grafiek.



⁵ De fotosfeer: de laag van de zon die wij zien, de laag die het meeste licht uitzendt.

Hoe heter, hoe blauwer. Het zegt dus ook iets over de kleur.

17. Helium werd voor het eerst ontdekt in de atmosfeer van de zon. Hoe kon men zo maar tot de conclusie komen dat er een nieuw element was?

Uit het spectrum. Er waren absorptielijnen in het zonnenspectrum die men bij andere elementen op aarde niet gezien had.

18. Inmiddels is helium ook op aarde gevonden. Bij welk proces wordt Helium voortdurend gevormd en vrijwel overal op aarde?

Alfaverval. De uitgezonden deeltjes zijn heliumkernen.

19. Hoe kun je uit een spectrum aantonen dat er op de zon een magnetisch veld is en hoe sterk dat zou kunnen zijn?

Zeeman effect, splitsing van spectraallijnen.

20. Welke vooronderstellingen en theorie gebruik je in dit geval om waarnemingen te sturen en om ze te interpreteren?

Dat fysische processen op de zon op dezelfde manier plaatsvinden als op aarde.

21. Stel dat we niet een buitenste relatief koele laag van de zon zagen, maar dat we rechtstreeks keken naar materie met een temperatuur van miljoenen graden. Zouden onze instrumenten dan toch nog gewone spectra opmeten, of niet? Leg uit.

Zonder die buitenste koele laag zouden er geen donkere absorptielijnen in het spectrum zitten. In plaats daarvan zouden we vooral een gamma-emissiespectrum zien met typische lijnen voor energie die vrijkomt bij de diverse componenten van de fusiereactie.

22. Op pagina 102 staat een methode om de rotatiesnelheid van de zon te meten. Is die methode toepasbaar op sterren? Leg uit.

Nee, want vrijwel alle sterren worden als punt waargenomen en dan is het niet mogelijk om de ene kant van de ster met de andere te vergelijken. Hoogstens kan er uit de verbreding van spectraallijnen een conclusie over de temperatuur getrokken worden.

23. Kun je radiële snelheid (langs de kijkrichting) van sterren meten via het dopplereffect? Leg uit.

Ja, er zal verschuiving zijn van spectraal lijnen naar blauw (nadering) of naar rood (verwijdering).

24. Kun je tangentiële snelheid (loodrecht op kijkrichting) van sterren meten via het dopplereffect?

Nee. Het Doppler effect werkt alleen voor bepaling van de component van de snelheid langs de kijkrichting. In de richting loodrecht daarop (tangenteel) is er geen Doppler effect.

25. Wat denk je dat er bij verre sterren beter gemeten kan worden, de radiële of de tangentiële snelheid?

De radiële snelheid zal veel eenvoudiger zijn, want voor een dopplermeting maakt het niet zoveel uit of een ster ver weg of dichtbij staat, zolang er maar voldoende licht binnenkomt of spectraallijnen te meten.