



Zwarte gaten

en het zwarte gat in het centrum van onze Melkweg

Workshop Sterrenkunde

STERRENKUNDE COLLEGE 07-12-18, ASTRONOMY, UNIVERSITY OF GRONINGEN

Deze lesmethode is gebaseerd op een serie van opgaven gemaakt door de Europese partner van het Hubble project, ESA (the European Space Agency) die toegang heeft tot 15% van de totale observeertijd van Hubble, in samenwerking met ESO (the European Southern Observatory)

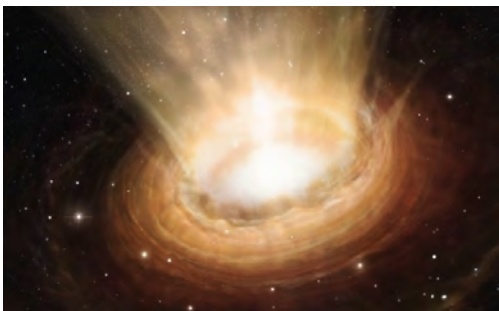
the Hubble European Space Agency Information Centre and the European Southern Observatory: <http://www.eso.org/public/products/education/>.

Vijfde versie, December 2018

VOOR WIJZIGINGEN: WILLEKEMULDER.93@GMAIL.COM

Een introductie over Zwarte gaten

Als we het hebben over zwarte gaten denken veel mensen aan een mysterieus object. Een zwart gat bestaat alleen niet bijzondere materialen, maar uit dezelfde materialen als waarvan de Zon, Aarde en alles op de aarde gemaakt zijn. Het belangrijkste verschil is dat bij een zwart gat al dit materiaal zich in een ongelooflijk klein volume bevindt. Maar hoe klein is klein? Om van alle massa in het volume van de Aarde een zwart gat te maken, moet al het materiaal geperst worden tot een grootte van een knikker met een diameter van 1 cm.



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

De zwaartekrachtwet, ook wel de gravitatiewet van Isaac Newton, gegeven in vergelijking (1), beschrijft dat de aantrekkingskracht tussen de twee massa's m_1 en m_2 kwadratisch toeneemt naarmate de afstand tussen de twee massa's verkleint wordt. Op het aardoppervlak bevinden we ons 6378 km van het centrum van de Aarde. In het geval van de knikker zal de afstand van het knikkeroppervlak tot het centrum gelijk

zijn aan 0,5 cm. Deze enorme vermindering van afstand maakt dat de gravitatiekracht in deze situatie een miljard keer groter wordt dan de situatie van ons aardoppervlak en de Aarde. Deze grote kracht zorgt ervoor dat er vreemde dingen gebeuren met het materiaal wat zich rondom een zwart gat bevindt. De kracht is zo groot dat zelfs licht niet kan ontsnappen.

Waarom een 'zwart gat'?

De wetenschapper John Wheeler bedacht de naam 'zwart gat'. Het werd een gat genoemd, omdat al het materiaal en licht wat verdween in het object, niet meer terug kwam. Niets kon ontsnappen aan het gat.

Laten we eens kijken naar de situatie van de Aarde. Als een object wil ontsnappen van de aarde, bijvoorbeeld een raket, moet deze minstens een snelheid hebben van 11 km/s. Om

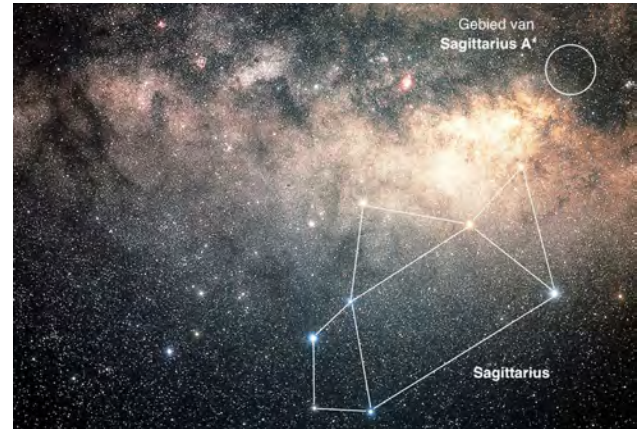
aan een zwart gat te ontsnappen hebben we een snelheid nodig die groter is dan de snelheid van het licht. Omdat niets sneller dan het licht kan gaan kunnen we ook wel zeggen dat niets kan ontsnappen aan een zwart gat. Vroeger dacht men dat een zwart gat alleen in theorie kon bestaan. Tegenwoordig weten we dat ze kunnen bestaan en is er zelfs streng bewijs dat er zich een zwart gat in het centrum van onze eigen Melkweg bevindt.

De Melkweg

De Melkweg is het sterrenstelsel dat ons zonnestelsel bevat. Het is een balkspiraalstelsel met een diameter tussen de 100.000 en 180.000 lichtjaren. Sterrenkundigen schatten dat er zo ongeveer 100 tot 400 miljard sterren bevat.



We weten dat de Melkweg een spiraalstructuur heeft, maar er is nog nooit een foto gemaakt van ons gehele Melkweg. Dit betekent dat alle foto's van de Melkweg die je ooit hebt gezien, foto's van andere spiraalstelsels of artistieke foto's waren. Omdat de Melkweg een diameter heeft van 100.000 lichtjaar en wij ons niet op de uiterste randen bevinden, kunnen we slechts een deel van de Melkweg observeren. Daarnaast hebben satellieten simpelweg niet genoeg tijd gehad om zich buiten het stelsel te begeven en een foto te maken.



Het zwarte gat in het centrum van onze Melkweg

De eerste aanwijzing van het bestaan van een zwart gat, kwam doordat wetenschappers een ongewoon sterke bron van radio straling opmerkten in het 'Boogschutter' sterrenbeeld. Deze bron werd later 'Sagittarius A*' (SgrA*) genoemd. Al snel werd duidelijk dat de straling niet afkomstig kon zijn van een ster en het mogelijk een zwart gat kon zijn. Materie dat door zwaartekracht rondom het zwarte gat draait, zou de radio straling kunnen veroorzaken. Doordat het zwarte gat erg klein is kunnen we het object niet direct observeren. Het bewijs voor het bestaan van een zwart gat wordt daardoor geleverd door twee andere observaties:

- 1) de snelheid van de materie dat om het zwarte gat heen draait
- 2) het licht wat uit het specifieke gebied komt

De snelheid vertelt ons iets over de hoeveelheid massa dat zich in dat specifieke volume bevindt, terwijl het licht ons vertelt of alle massa zich daar in de vorm van sterren bevindt. Er zijn veel sterren die zich rondom het centrum van onze Melkweg bewegen. In deze les zullen we kijken naar echte waarnemingen van het centrum van de Melkweg om uiteindelijk de snelheid van deze sterren te kunnen bepalen.

Opdrachten

Zwaartekracht

Zwaartekracht is een kracht die er voor zorgt dat alle objecten naar elkaar toe getrokken worden. Het is een kracht die al sinds het begin van Universum bestaat en overal hetzelfde werkt, op alle verschillende soorten objecten, op elke grootte groter dan een atoom.

In de 17e eeuw, nog voor dat het bestaan van zwaartekracht bekend was, beschreef Johannes Kepler in drie wetten de beweging van een hemellichaam om een ander hemellichaam. Hiermee kan de beweging van een satelliet rond een planeet, de Maan rond de Aarde en planeten rondom de Zon verklaart worden.

Eerste wet van Kepler

Planeten bewegen zich in elliptische banen rond de Zon, waarbij de Zon zich in één van de brandpunten van de ellips bevindt.

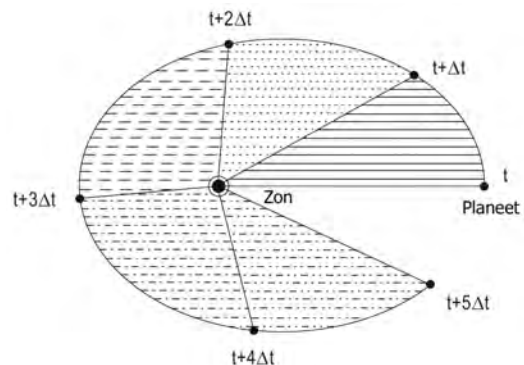
Tweede wet van Kepler

De oppervlakte, A , van het door de voerstraal (de lijn die de planeet met de Zon verbindt) doorkruiste gebied is voor even groot voor

gelijke tijdsintervallen, Δt .

$$\frac{A}{\Delta t} = \text{constant} \quad (2)$$

Dit komt er op neer dat een planeet sneller zal bewegen wanneer hij dichterbij de Zon is.



Derde wet van Kepler

Het kwadraat van de periode, P , van de planeten is evenredig met de derde macht van de lange as, a , van een elliptische beweging rondom de Zon. Dit kan ook wel beschreven worden met de vergelijking:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3, \quad (3)$$

waar G staat voor de valversnelling, m_1 voor de massa van de Zon en m_2 voor de massa van de planeet.

Opdracht 1 Ellipsen

De eerste wet van Kepler zegt dat planeten in ellipsbanen rondom de Zon bewegen. Een ellips met zijn middelpunt op $(0,0)$ kan beschreven worden met een kromme door de punten (x,y) gegeven door de formule:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

Gegeven is dat $a = 10$ en $b = 5$. Gebruik vergelijking 4 om verschillende punten (x,y) te berekenen. Teken een ellips door de punten met elkaar te verbinden. Herhaal deze opdracht, maar dan met $a = 10$ en $b = 2$.

- ? Wat betekenen de waardes van a en b als je kijkt naar een ellips?
- ? Welk figuur krijg je als je de waardes $a = 10$ en $b = 10$ gebruikt?

De lijnen met de lengtes a en b worden ook wel de semi-major (lange) en semi-minor (korte) as genoemd. Een ellips heeft twee brandpunten. De afstand van één brandpunt naar een willekeurig punt op de ellips, terug naar het andere brandpunt, is altijd gelijk aan $2a$.

De omlooptijd van een planeet is de tijd die een planeet nodig heeft om een volledige ellipsbaan om de Zon te maken. De derde wet van Kepler zegt dat als je twee van de

volgende drie waardes weet: de periode P , de lengte van de lange as a , en de totale massa van de lichamen $(m_1 + m_2)$, de onbekende waarde berekend kan worden.

Opdracht 2 De massa van de Aarde en de Zon

Bereken met behulp van de derde wet van Kepler, vergelijking 3 de totale massa van de Aarde en de Zon bij elkaar. Hierbij is gegeven dat de semi-major as van de omwenteling van de Aarde gelijk is aan 150 miljoen kilometer, zijn periode gelijk is aan 1 jaar en de valversnelling $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$.

Kepler publiceerde zijn wetten in 1609 en 1619. In 1687 liet Isaac Newton zien dat de wetten een gevolg zijn van de universele zwaartekracht wet. Dit betekent dat er zwaartekracht niet alleen werkt tussen de Aarde en de Zon, maar tussen elke twee objecten met massa. In andere woorden, zwaartekracht maakt dat een steen op de Aarde valt, het houdt de maan in zijn omloopbaan om de Aarde, de Aarde rond de Zon, de Zon in zijn baan rond het middelpunt van onze Melkweg en tot slot een ster in een baan rondom een zwart gat.

Vanaf de jaren '90 weten sterrenkundigen dat er sterren zijn die snel weg bewegen van het middelpunt van onze Melkweg. Zou dit een indicatie kunnen zijn van het bestaan van een heel zwaar zwart gat in het centrum van onze Melkweg?

De observaties

Het observeren van sterren die dichtbij het centrum van onze Melkweg staan is erg lastig. De grote ruimte tussen ons en het centrum is gevuld met vele sterren en stoffige wolken. Deze blokkeren het zicht vanaf de Aarde. Dit is waarom we niet met optische telescopen richting het centrum van onze Melkweg kijken maar met satellieten die kijken naar infraroodstraling. Infrarood straling heeft namelijk langere golflengtes dan zichtbaar licht, waardoor het minder geblokkeerd wordt door de stof wolken. Hierdoor kan de infrarood straling van de sterren ons bereiken en kunnen wij ze observeren. Bij infrarood straling kun je denken aan sterren die nog zo jong zijn dat ze alleen nog maar warmte uitstralen en nog geen zichtbaar licht.

Een groep wetenschappers, onder leiding van Reinhard Genzel, heeft over een aantal jaar infrarood afbeeldingen van het centrum van onze Melkweg gemaakt, om te kijken of er mogelijk een zwart gat aanwezig was. Om in het centrum een zwart gat te kunnen ontdekken moesten Reinhard Genzel en zijn groep nieuwe technieken toepassen om zo nauwkeurig mogelijke observaties te maken van de precieze locaties van de sterren. Uiteindelijk zijn er observaties gedaan met de ESO Very Large Telescope in Chili.

Het bovenstaande figuur laat een nabij-infrarood afbeelding van de paar centrale licht jaren van ons Melkweg stelsel, verkregen met het NACO instrument van de Very Large Telescope. De compacte objecten zijn sterren: de blauwe sterren zijn heet en de rode sterren zijn koeler.



Zoals eerder genoemd heeft Reinhard Genzel op verschillende momenten foto's gemaakt van de posities van de sterren dichtbij het centrum van ons Melkweg stelsel. In 2002 bleek dat na het vergelijken van duidelijke foto's, de sterren leken te verschuiven over tijd. Gedurende de periode van 1992 tot 2002 is in het bijzonder de ster genaamd S2 ver verschoven. Coördinaten van de locatie van S2 zijn over de jaren heen genoteerd en staan gegeven in tabel 1.

In opgave 1 zijn we bezig geweest met het kijken naar ellipsbanen. We zijn door het kijken naar de vergelijking van een ellips te weten gekomen dat de lange as van een ellips, ook wel a , de semi-major as is. In opgave 2 hebben we gekeken naar de derde wet van Kepler en hebben we berekend hoe zwaar de Zon en de Aarde samen zijn.

Het doel van de les van vandaag zal het berekenen van twee andere hemellichamen zijn, namelijk: 'De massa van het Zwarte gat in het centrum van ons Melkweg stelsel, SgrA*, en de massa van de ster S2 die om hem heen beweegt'.

Datum (jaar)	x (arcsec)	Δx (arcsec)	y (arcsec)	Δy (arcsec)
1992.226	0.104	0.003	-0.166	0.004
1994.321	0.097	0.003	-0.189	0.004
1995.531	0.087	0.002	-0.192	0.003
1996.256	0.075	0.007	-0.197	0.010
1996.428	0.077	0.002	-0.193	0.003
1997.543	0.052	0.004	-0.183	0.006
1998.365	0.036	0.001	-0.167	0.002
1999.465	0.022	0.004	-0.156	0.006
2000.474	-0.000	0.002	-0.103	0.003
2000.523	-0.013	0.003	-0.113	0.004
2001.502	-0.026	0.002	-0.068	0.003
2002.252	-0.013	0.005	0.003	0.007
2002.334	-0.007	0.003	0.016	0.004
2002.408	0.009	0.003	0.023	0.005
2002.575	0.032	0.002	0.016	0.003
2002.650	0.037	0.002	0.009	0.003
2003.214	0.072	0.001	-0.024	0.002
2003.353	0.077	0.002	-0.030	0.002
2003.454	0.081	0.002	-0.036	0.002

Table 1: Coördinaten van de positie van de ster S2. Kolom 1: datum van de meting. Kolom 2-5: x en y posities van de ster en de onzekerheden van beide coördinaten. De gebruikte eenheden zijn arc-seconden. Het zwarte gat is respectievelijk geplaatst op de locatie $(0.0, 0.0)$.

Bepalingen van massa's

Hoe bepalen we de massa's van objecten die om elkaar heen draaien. We hebben dit al reeds gedaan voor de Zon en de Aarde doordat we wisten hoe de Aarde zich rondom de Zon beweegt. Daarom gaan we voor het bepalen van de massa van SgrA* gebruikmaken van locaties van S2 in tabel 1.

Met de derde wet van Kepler kan de massa van SgrA* bepaald worden. Deze wet zegt ons dat als we de totale massa, $m = m_{\text{BH}} + m_{\text{S2}}$, willen berekenen, we de lengte van de semi-major as, a , en de periode, P van de stellaire baan van S2 om het zwarte gat moeten weten.

Eerst zullen we de waarde van de semi-major as, a , van de stellaire baan van S2 om

het zwarte gat berekenen. Wanneer we een waarde hebben gevonden kunnen we met behulp van de tweede wet van Kepler de periode van de stellaire baan berekenen. Met behulp van a , P en de derde wet van Kepler kunnen we uiteindelijk de massa van het zwarte gat gaan herleiden. **Laten we beginnen!**

Opdracht 3 De bepaling van de waarde van a

De lengte van de semi-major as, a , van de stellaire baan van ster S2, kan bepaald worden door de ellipsbaan te plotten aan de hand van de data gepresenteerd in tabel 1. In de grafiek zijn alle data punten al reeds geplott, met de uitzondering van de datapunten uit 2002.

? Plot alle posities van de ster S2 gedurende het jaar 2002 op papier en op schaal in de grafiek.

- ? Geef bij elke positie de grootte van de onzekerheden in de meting aan. Dit kan je doen door het tekenen van onzekerheidsbalken ter grootte van de onzekerheid.
- ? Teken een ellips door de punten van de metingen. Bij het tekenen van de ellips hoeft de lijn niet precies door alle punten te tekenen, omdat er onzekerheden zijn in de posities.
- ? Meet de semi-major as in arc-seconden. Reken dit getal om naar een lengte in lichtjaar gegeven het feit dat 2 arc-seconden gelijk zijn aan 82 lichtdagen in het centrum van het Melkweg stelsel.
- ? Vergelijk je meting met de resultaten van je klasgenoten en gebruik deze informatie om een schatting te maken van de onzekerheid in de meting. De semi-major as van de ellips die het beste past bij de metingen kan nauwkeuriger berekend worden door middel van het gebruiken van een wiskundige vergelijking.

Als het verschil tussen jouw meting en de wiskundige berekening groter is dan jouw onzekerheid, heb je waarschijnlijk de onzekerheid in jouw meting onderschat. Als het verschil tussen de twee waarden veel kleiner is dan jouw onzekerheid, heb je waarschijnlijk de onzekerheid in jouw meting overschat.

Wetenschappers hebben de posities van S2 uit tabel 1 nauwkeurig geanalyseerd. Hieruit hebben zij bepaald dat de lengte van de semi-major as van de omwenteling van de ster S2 is $a_{S2} = 5.4 \pm 0.4$ lichtdagen is. Deze waarde is gepubliceerd in het artikel (Schrödel et al. 2003).

Nu moeten we de periode P van de baan van S2 zien te vinden. In de tijd van één omwenteling van de ster rondom het zwarte gat, zal de voerstraal, de lijn tussen het

zwarte gat en de ster, de gehele oppervlakte van de ellips doorkruisen. De oppervlakte van een ellips is gelijk aan

$$A_{\text{ell}} = \pi \times a \times b. \quad (5)$$

De tweede wet van Kepler vertelt ons dat de oppervlakte doorkruist door de voerstraal, proportioneel is aan het tijdsinterval van dit gebied.

Bijvoorbeeld, gedurende een halve periode, $P/2$, zal voerstraal de helft van het totale oppervlakte van de ellips, A_{ell} , doorkruisen. Over het algemeen genomen, in het tijdsinterval Δt waarbij de ster zich van positie 1 naar positie 2 verplaatst, zal de voerstraal een oppervlakte van

$$\Delta A = \frac{\Delta t}{P} A_{\text{ell}} \quad (6)$$

doorkruisen. Om de periode, P , te berekenen moeten we eerst ΔA , Δt en A_{ell} bepalen.

Opdracht 4 Het berekenen van de waarde van P

Met gebruik van meetpapier kunnen we de waarden voor ΔA voor de gegeven Δt schatten. Dit kan op de volgende manier:

- ? Meet alle waarden van A_{ell} en ΔA tussen alle combinaties van twee posities in de tekening gemaakt in Opgave 3. Verdeel deze taak over de gehele klas. Je kan de oppervlaktes schatten door de vierkantjes van het meetpapier te tellen. Bereken daarna P met behulp van vergelijking (3) voor elke combinatie van twee posities. Als alle waarden voor de Periode berekend voor de verschillende Δt , kunnen jullie met de resultaten van de hele klas een gemiddelde periode uitrekenen.

Wetenschappers zijn ertoe instaat geweest om met behulp van de data uit tabel 1 een nauwkeurige waarde voor de periode van de elliptische omwenteling van S2 te bepalen.

De periode van de omwenteling van de ster S2 is $P_{S2} = 15.7 \pm 0.7$ jaar. Deze waarde is gepubliceerd in het artikel (Schrödel et al. 2003).

Omdat de methode voor het bepalen van de waarde van P uit het artikel vele malen nauwkeuriger is de waarde die wij zojuist hebben bepaald, zullen we voor de laatste opgave

de waarde van $P_{S2} = 5.4$ lichtdagen aannemen.

Opdracht 5 Het bepalen van de totale massa van het zwarte gat, SgrA*, en de ster S2

- ? Bereken de totale massa m van de ster S2 en het zwarte gat met gebruik van de derde wet van Kepler. *Hint: Neem hierbij aan dat $m_1 = m_{ZG}$ en $m_2 = m_{S2}$.*



Extra: Is er echt een zwart gat?

Is er echt een zwart gat?

Nu de totale massa $m = m_{ZG} + m_{S2}$ bepaalt is, rest zich nog de vraag hoeveel van deze massa deel uit maakt van het zwarte gat en hoeveel van de ster.

Sterren hebben massa's die variëren tussen $0.08 \sim 120M_{\odot}$ (M_{\odot} betekend zonsmassa's). De totale massa m berekend in Opgave 5 is echter veel groter. Daarom, ongeacht wat voor een type ster we mee te maken hebben, het heeft een verwaarloosbare massa, m_{S2} , ten opzichte van de massa van het zwarte gat, m_{ZG} . Dit leidt tot de conclusie dat bijna alle massa tot het zwarte gat toebehoort.

Maar wacht even, weten we eigenlijk wel zeker dat al deze massa toegekend kan worden aan een zwart gat? We hebben alleen een berekende massa. Het kan zo zijn dat deze massa niet tot een zwart gat toebehoort, zelfs al is de massa zeker gelijk aan een groot aantal sterren. Zoals aan het begin van de les is gezegd, het verschil tussen deze twee mogelijkheden komt voort uit het feit dat sterren zichtbaar licht uitstralen en een zwart gat niet. Daarom zouden we kunnen onder-

zoeken of alle berekende massa tot het zwart gat behoort, door te kijken naar het licht wat uitgestraald wordt. De vraag is dan ook:

Hoeveel licht verwachten we van SgrA als alle berekende massa zich in de vorm van sterren bevindt?*

Opdracht 6 Een zwart gat of veel sterren?

Als eerste aanname kunnen we ervan uitgaan dat alle massa toegekend wordt aan sterren ter grootte van de Zon. De massa van de Zon, M_{\odot} , is ongeveer 2×10^{30} kg.

? Hoeveel sterren ter grootte van de Zon (N_{\odot}) hebben we nodig op de plaats van SgrA* om de totale massa te kunnen verantwoorden?

De helderheid van de Zon, L_{\odot} , is ongeveer 4×10^{26} W.

? Wat is de totale helderheid die je verwacht aan de hand van het berekende aantal zonsmassa's?

Sterrenkundigen gebruiken vaak de term 'magnitudes' in plaats van helderheid. De absolute magnitude, M , van de Zon is gelijk aan $M = \pm 4.83$. De afstand, D , tot het mid-

delpunt van onze Melkweg is ongeveer $D = 8.0$ kpc.

- ? Bereken de schijnbare magnitude van de Zon als deze zich in het middelpunt van de Melkweg zou bevinden. Wat zou de schijnbare magnitude zijn als er N_{\odot} zonnen zich op de plaats van SgrA* zouden bevinden?

Sterrenkundigen hebben geobserveerd dat er bijna geen licht afkomstig is uit het centrum van de Melkweg. Dit kan ook herleid worden uit de infrarood foto's gemaakt van het centrum. Ze laten zien dat er minder licht afkomstig is van de locatie van SgrA* dan van de omliggende sterren. De conclusie is dat het centrum te donker om het aantal sterren te bevatten dat uit de gemeten massa berekend is. Daarom is deze grote massa te verklaren met het bestaan van een zwart gat.

Kleine en grote zwarte gaten

Je zal je vast afvragen of alle zwarte gaten zo groot en zwaar zijn als die in het centrum van onze Melkweg. In de introductie werd genoemd dat een zwart gat een object is waaraan licht niet meer kan ontsnappen. Laten we eens gaan kijken naar snelheden die verschillende objecten nodig hebben om te kunnen ontsnappen. De ontsnapsnelheid van een bolvormig object met massa m en straal r wordt gegeven door de vergelijking

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2Gm}{r}}. \quad (7)$$

Opdracht 7 Wat creëert een zwart gat?

- ? Bereken de ontsnapsnelheid van de Aarde gegeven dat de massa van de Aarde gelijk is aan $m_{\oplus} = 6 \times 10^{24}$ kg

en de straal van de Aarde gelijk is aan $R_{\oplus} = 6378$ km.

- ? Bereken de ontsnapsnelheid als de straal van de Aarde gelijk was aan slechts 0.5 cm.
- ? Tenslotte, bereken de ontsnapsnelheid als de Aarde de straal had van R_{\oplus} , maar een massa van 2200 keer de massa van de Zon.

Uit de vorige berekeningen kun je zien dat je op twee manieren de Aarde kan transformeren tot een zwart gat: als je de massa enorm samendrukt of als de massa enorm vergroot wordt. De Zon heeft een straal dat een kleine honderd keer groter is dan de straal van de Aarde. Daarom de tweede manier betekend dat een object met 2200 keer de massa van de Zon, in een volume wordt samengedrukt van meer dan 100 keer kleiner dan de Zon. De cruciale eigenschap dat een zwart gat definieert is daarvoor niet de massa of de grootte, maar de mate van compactheid van het object. Dit is ook wel de massa-straal relatie verkregen uit vergelijking 7.

Opdracht 8 Wat als wij zelf een zwart gat waren?

- Betekend compactheid dat er zwarte gaten kunnen zijn die vele maten kleiner zijn dan de Aarde, mits zij tot een zeer klein object samengedrukt zijn?
- ? Neem de massa van je eigen lichaam en bereken de straal die je nodig hebt om een ontsnapsnelheid gelijk aan de lichtsnelheid te bereiken. Dit is dan gelijk aan de straal die jouw lichaam zou moeten hebben om jezelf in een zwart gat te veranderen. Vergelijk deze straal een met de typische grootte van één atoom: 2×10^{10} m.



De Conclusie

Aan het einde van deze les zie je dat alles, de Zon, de Aarde en zelfs je eigen lichaam een zwart gat kan zijn als je de mogelijkheid had om de massa samen te duwen tot een zeer klein volume. Echter, in het Heelal hebben we alleen zwarte gaten gevonden die een massa hadden groter dan een zons-massa. Zwarte gaten kunnen veel groter zijn, zie bijvoorbeeld SgrA*. Dit is niet vreemd natuurlijk. Zelf zou je niet spontaan kunnen veranderen in een zwart gat. Het heeft een soort 'compressie-machine' nodig wat door beide natuur en mens nog niet realistisch is. Hetzelfde geldt voor de Aarde. De Aarde zal nooit bij zichzelf ontploffen. Materie is robuust genoeg zodat de binnenste lagen van de Aarde de top lagen ondersteunt.

Alleen in sterren die vele malen zwaarder zijn dan de Zon is de materie die zich in het centrum bevindt, niet stabiel genoeg om de

buitenste lagen te ondersteunen. Deze sterren weerhouden zich van instorten door hun brandstoffen even snel te verbranden als dat er licht en warmte geproduceerd wordt. Op een bepaald moment is de brandstof op en houdt de ster echter op met licht uitstralen. Op dit moment kunnen de binnenste de druk van de buitenste lagen niet meer tegenhouden en de ster zal imploderen tot een zwart gat. Dit is wat sterrenkundigen een 'supernova' noemen.

Het verhaal over het universum komt hierbij tot zijn einde. Als je te klein bent in dit Universum zal je nooit geen risico hebben om niet in te storten, maar zal je ook geen licht uitstralen. Als je te groot bent in dit Universum zal je helder licht uitstralen. Je zal een balans vinden tussen deze twee extremen zoals de Zon heeft. Deze sterren combineren een schitterend leven tot een teder einde.