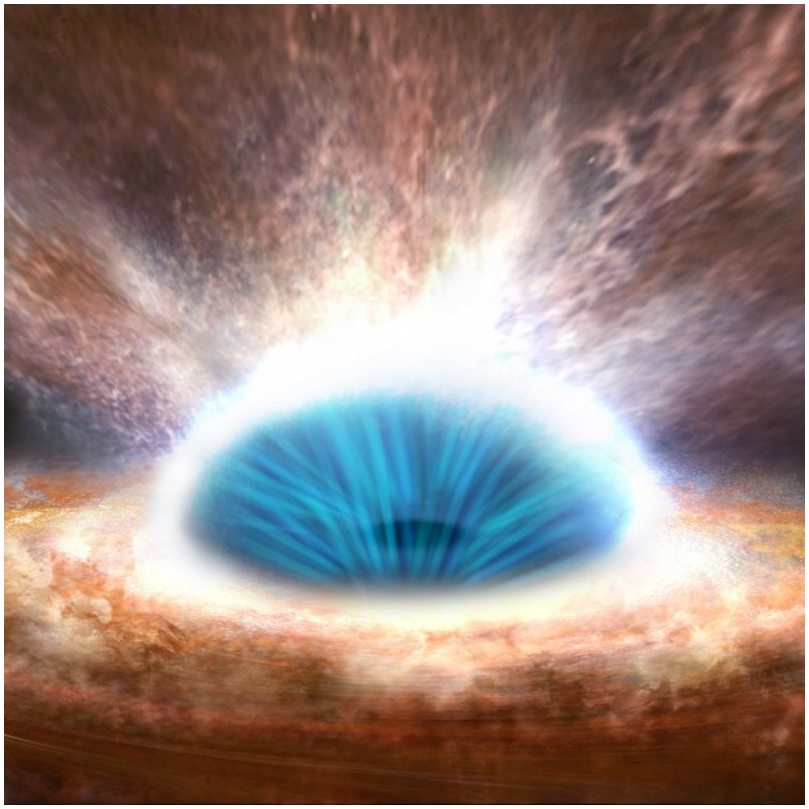
Zwarte gaten (1): Inleiding

In de afgelopen maanden zijn op deze website dossiers over relativiteitstheorie en quantumfysica verschenen. Deze fundamentele theorieën spelen beide een belangrijke rol in een van de interessantste en meest mysterieuze verschijnselen in het heelal: zwarte gaten. Daarom verschijnen vanaf vandaag wekelijks artikelen in een nieuw dossier over dat onderwerp op Quantum Universe. In dit eerste artikel beschrijven we kort wat zwarte gaten zijn, en wat de lezer in de rest van dit dossier kan verwachten.

In dit artikel:

- De lichtsnelheid
- Ontsnappingssnelheid
- Zwarte gaten
- Vooruitblik



Afbeelding 1. Een zwart gat.Een artist impression van een zwart gat in het midden van een sterrenstelsel. Het zwarte gat zelf is zoals de naam al zegt zwart, maar eromheen en erin spelen zich allerlei interessante processen af. Afbeelding: NASA.

De lichtsnelheid

Zwarte gaten zijn zwart. Dat wil zeggen: het zijn objecten waaraan geen licht kan ontsnappen. Dat licht überhaupt iets is dat kan “ontsnappen” ligt echter niet direct voor de hand. Als iemand een lamp aandoet, zien we het onmiddellijk in de hele kamer licht worden. Dat licht met een bepaalde snelheid van de lamp vertrekt, tegen voorwerpen weerkaatst, en uiteindelijk in onze ogen belandt, nemen we dus niet direct waar.

De vraag of licht een snelheid heeft of zich instantaan verplaatst, hield de oude Grieken al bezig. De meningen van de natuurfilosofen waren verdeeld. Aristoteles was van mening dat licht niet bewoog, maar Empedocles, Euclides en Ptolemaeus dachten dat dat wel het geval was – al werd er algemeen aangenomen dat het zicht vanuit het oog werkte, en er dus iets vanuit het oog bewoog naar de voorwerpen die we zien, in plaats van andersom.

Zoals vaak in de natuurkunde het geval is, werd het vraagstuk pas echt beantwoord toen er

duidelijke experimentele resultaten kwamen. Dat dat heel lang duurde is niet zo verwonderlijk als we beseffen hoe enorm groot de snelheid van het licht is. Pas in de 17e eeuw werden de eerste kansrijke experimenten gedaan om de lichtsnelheid te meten. Galileo Galilei was een van de eersten die, in 1638, een experiment voorstelde. Daarbij moesten lantarens op grote afstand van elkaar afgedekt en weer zichtbaar gemaakt worden, om te zien of er een tijdsverschil was tussen het zichtbaar maken van de lantarens en de waarneming daarvan op grote afstand. Men slaagde er echter niet in met dergelijke experimenten de snelheid van het licht te meten.



Afbeelding 2. Ole Rømer (1644-1710).Rømer was de eerste die erin slaagde om de snelheid van het licht met redelijke nauwkeurigheid te meten. (Schilderij van Jacob Coning, te zien in het Frederiksborg Museum in Hillerød, Denemarken.)

De eerste die daar wel in slaagde was de Deense astronoom Ole Rømer, in 1676. Hij gebruikte daarvoor geen metingen op grote afstanden op aarde, maar keek het heelal in, naar de manen van de planeet Jupiter. Die manen bewegen in regelmatige banen om de planeet heen, en gaan dus ook zo nu en dan voor of achter de planeet langs. Er kon goed voorspeld worden wanneer deze overgangen zouden plaatsvinden, maar het viel Rømer op dat de overgangen in het algemeen iets eerder gebeurden dan voorspeld als de aarde en

Jupiter aan dezelfde kant van de zon stonden, en iets later dan voorspeld als de aarde en Jupiter aan tegenovergestelde kanten van de zon stonden.

De reden hiervoor lag voor de hand. Het licht heeft een bepaalde snelheid, en het beeld van de overgang doet er dus langer over naarmate de afstand tussen de aarde en Jupiter groter is. Bij de kleinst mogelijke afstand tussen de twee planeten verschijnt het beeld enkele minuten eerder dan gemiddeld; bij de grootst mogelijke afstand enkele minuten later.

Omdat de afstanden van de planeten tot de zon in die tijd nog niet heel nauwkeurig bekend waren, moest Rømer nog wat extra trucs uithalen om ook die afstanden te schatten. Hij gebruikte daarvoor soortgelijke metingen aan de tijdstippen van zonsverduisteringen. Met het nodige rekenwerk kwam hij zo uiteindelijk op de eerste schatting van de lichtsnelheid: zo'n 220.000 km/s.

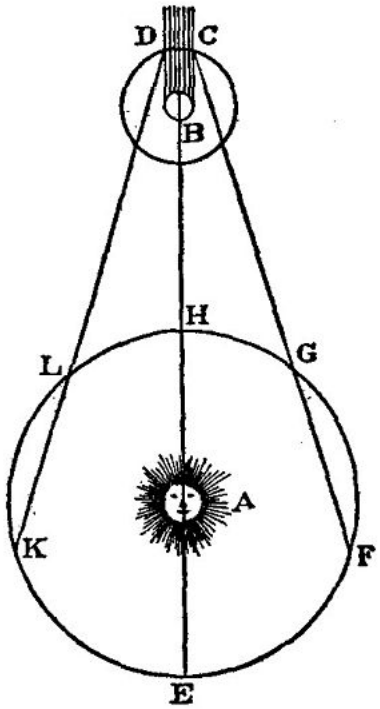


FIG. 70.

Afbeelding 3. De eerste meting van de lichtsnelheid.De schets die Ole Rømer gebruikte in het artikel over zijn metingen van de lichtsnelheid. Onderin zien we de zon en de baan die de aarde om de zon maakt; bovenin Jupiter en de baan van een van de manen.

Inmiddels, drieëneenhalve eeuw en vele metingen verder, weten we dat zijn uitkomst heel

redelijk in de buurt zat: de lichtsnelheid is bijna 300.000 km/s. Inderdaad een gigantische snelheid: het licht kan in 1 seconde ruim zeven keer rond de aarde bewegen, en in iets meer dan een seconde van hier naar de maan!

Naar boven

Ontsnappingssnelheid

Wat heeft dat alles met “ontsnapping” te maken? Dat wordt duidelijk als we de zwaartekracht in ons verhaal betrekken. De aarde trekt alles om ons heen met een bepaalde zwaartekracht naar zich toe. Het gevolg is dat wij aan de aarde “vast zitten”: wie een paar keer omhoog springt merkt al snel dat het niet zal lukken om van de aarde af te springen.

De vraag is natuurlijk: kunnen we in theorie zo hard omhoog springen dat we ons *wel* losmaken uit de zwaartekracht van de aarde? Het antwoord: ja, dat kan. Eenvoudig is het echter niet. Pas als we omhoog springen met een snelheid van zo’n 11,2 kilometer *per seconde* (waarbij we zaken als luchtwrijving voor het gemak nog verwaarlozen) stijgen we zo snel op, en wordt de zwaartekracht van de aarde daarbij zo snel minder, dat het onze planeet niet meer lukt om ons terug te trekken naar het oppervlak.

Een leuk detail daarbij is dat die snelheid niet afhangt van het gewicht (of in nettere woorden: de massa) van degene die springt. Iemand van 50 kilogram moet met precies dezelfde snelheid springen als iemand van 150 kilogram. De reden daarvoor is dat de grootte van de zwaartekracht weliswaar afhangt van de massa, maar dat de vertraging die die zwaartekracht vervolgens oplevert ook afhangt van de massa: zwaardere voorwerpen zijn moeilijker af te remmen. Die twee effecten heffen elkaar precies op, en de vertraging is dus voor beide personen even groot.

De ontsnappingssnelheid verandert natuurlijk wél als we de aantrekkende planeet of ster veranderen. Op een zware planeet als Jupiter is de zwaartekracht veel sterker, en als we van Jupiter af willen springen moeten we daarvoor dan ook veel beter ons best doen. Daarvoor zouden we met een snelheid van bijna 60 km/s moeten springen. Wie zou willen proberen van de zon af te springen (gesteld dat het mogelijk zou zijn om op het oppervlak van de zon te springen, natuurlijk) zou dat met ruim 600 km/s moeten doen.

Naar boven

Zwarte gaten

Wanneer we de twee ideeën uit de voorgaande hoofdstukjes combineren, ontstaat er een interessante vraag. Bestaan er sterren of planeten die zó zwaar zijn dat de ontsnappingssnelheid groter is dan de snelheid van het licht? En als dat zo is, betekent dat dan dat het licht zelf niet van zo'n object kan ontsnappen? Als dat zo is, zou zo'n hemellichaam volkomen zwart moeten zijn, en dus beslist de naam "zwart gat" verdienen.



Afbeelding 4. Pierre-Simon Laplace (1749-1827).De wiskundige Laplace beschreef als een van de eersten zwarte gaten, maar besloot de beschrijving uit latere drukken van zijn werk weer te verwijderen. (Schilderij van Sophie Feytaud, 1841.)

Toen eenmaal duidelijk was dat licht zich met een eindige snelheid voortbeweegt, begonnen natuur- en sterrenkundigen zich het bovenstaande inderdaad af te vragen. De oudst bekende formulering van de vraag komt uit een brief die de Engelse geestelijke en natuurfilosoof John Michell in 1783 stuurde aan de bekende wetenschapper Henry Cavendish. Michell schreef:

> If the semi-diameter of a sphere of the same density as the Sun were to exceed that of the Sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it would have acquired at its surface greater velocity than that of light, and consequently supposing light to be attracted by the same force in proportion to its vis inertiae, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity.

Dit citaat bevat een heel belangrijke clausule: Michell schrijft namelijk "*supposing light to be attracted by the same force*". Daarmee stelt hij een cruciale vraag, want wordt licht wel aangetrokken door de zwaartekracht? Zwaartekracht trekt aan voorwerpen die massa hebben, maar licht heeft, in elk geval voor zover in die tijd bekend was, geen massa. Aan de andere kant komt in het uiteindelijke begrip ontsnappingssnelheid de factor massa niet meer voor. Elk voorwerp heeft dezelfde ontsnappingssnelheid, ongeacht zijn massa. Zelfs voor massaloos licht zou men dus kunnen verwachten dat het ook die ontsnappingssnelheid heeft.

De situatie was ronduit onduidelijk. Zo beschreef de Franse wiskundige Pierre-Simon Laplace in 1796 het verschijnsel van zwarte gaten in de eerste editie van zijn boek *Exposition du système du Monde*. Ook in de tweede druk kwam de beschrijving voor, maar in latere drukken verwijderde Laplace het idee toch maar weer. Het zou nog heel lang duren voor de situatie rond zwarte gaten duidelijker werd: daarvoor was namelijk de algemene relativiteitstheorie van Albert Einstein nodig, en die verscheen pas in 1915.

Naar boven

Vooruitblik

In dit dossier zullen we uitgebreid zien dat zwarte gaten inderdaad kunnen bestaan, en dat ze nog veel meer bijzondere eigenschappen hebben naast het feit dat licht er niet aan kan ontsnappen. Zo zullen we zien dat de relativiteitstheorie voorspelt dat niet alleen licht, maar *alles* gevangen wordt door een zwart gat: er kan dus helemaal niets aan ontsnappen! En dat blijkt niet het enige vreemde relativistische verschijnsel rond zwarte gaten te zijn. Diep binnen in een zwart gat houdt de beschrijving van ruimte en tijd volgens de relativiteitstheorie op, en vinden we een zogenaamde *singulariteit*. Maar ook op de rand van een zwart gat zijn er volgens diezelfde theorie al vreemde dingen met ruimte en tijd aan de

hand. Zo zien we de tijd op de rand van een zwart gat bijvoorbeeld stilstaan!



Afbeelding 5. M61.We kunnen zwarte gaten niet direct zien, maar de gevolgen van hun aanwezigheid worden tegenwoordig op veel plaatsen in het heelal waargenomen. Hier het sterrenstelsel M61, waarvan gedacht wordt dat de kern een enorm zwart gat bevat. Foto: NASA.

De situatie wordt nog interessanter als we ook de quantummechanica in het verhaal betrekken. Een quantummechanisch zwart gat blijkt namelijk tóch niet helemaal zwart. Het straalt, zoals Stephen Hawking in de jaren ’70 aantoonde, heel langzaam straling uit. Het vreemde is echter dat die straling geen enkele informatie over het zwarte gat lijkt te bevatten. Een zwart gat lijkt dus in zekere zin informatie te vernietigen. Die voorspelling is in sterke tegenspraak met een van de grondbeginselen van vrijwel alle natuurkundige theorieën, waarin we vanuit een bepaalde situatie meestal niet alleen vooruit in de tijd kunnen rekenen, maar ook terug in de tijd. Dat dit voor zwarte gaten niet lijkt te kunnen, wordt de *informatieparadox* genoemd.

Die informatieparadox staat nog maar aan het begin van een hele serie raadsels waarvoor quantummechanische zwarte gaten natuurkundigen stellen. Zwarte gaten blijken namelijk door de Hawkingstraling ook een temperatuur en daardoor allerlei thermodynamische

eigenschappen te hebben, maar het blijkt vreselijk lastig om die eigenschappen te rijmen met de informatieparadox en met een beschrijving van zwarte gaten op microscopische schaal. Recent heeft dit geleid tot nieuwe ideeën over hoe de zwaartekracht en de quantummechanica überhaupt gecombineerd moeten worden, en tot nieuwe ideeën over zwarte gaten zelf, met mooie namen als “black hole complementarity”, “cosmic censorship” en “firewalls”. Al deze onderwerpen zullen uitgebreid aan bod komen in de reis langs zwarte gaten die we in dit dossier zullen maken.

Naar boven

In het tweede artikel van het dossier over zwarte gaten bespreken we de Schwardzschildstraal en de horizon van zwarte gaten.