

Reis naar het binnenste van een Zwart Gat

cursus Zwarte Gat

Onzichtbaar zwart gat is pas te zien door opvallende materie, bijvoorbeeld van passerende ster



John Heise
SRON-Ruimteonderzoek, Nederland



John Heise, HOVO-Utrecht

9 juli 2021

Zwarte Gat in 4 colleges

Deze reeks beoogt een uitleg bij twee recente ontwikkelingen:

- Observaties • **zwaarte krachtstraling** ontdekt op 14 sept 2015
- Theoretisch • de binnenkant van zwarte gaten, "gaten in de tijdruimte", theorie van G. 't Hooft, Nederlandse Nobelprijswinnaar

- Zwarte gaten en de Relativiteitstheorie
- Eigenschappen van Zwarte Gat
- Waarnemingen ook door zwaarte krachtstraling
- De binnenkant van Zwarte Gat




Hoe begon 't allemaal? (1)

- 1687, **Zwaarte kracht** van Newton, daaruit volgt o.m.: ieder hemellichaam kent een "ontsnappingsnelheid"

PHILOSOPHIE
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

NEWTONI
1687





- 1783, **heel grote zwaarte kracht** John Michel, LaPlace gedachte-experiment: heldere sterren zijn zwaar, wat als ze zo zwaar zijn dat licht terugvalt door zwaarte kracht? **de ellerhelderste sterren zouden dan donker zijn!**

1. men wist nog niets van sterren en sterbouw -opeenstapeling van material met gegeven dichtheid? dan massa = dichtheid x volume ~ dichtheid x R³ (R is de straal)
zwaarte kracht ~ $\frac{M}{R^2} \sim \text{dichtheid} \times \frac{R^3}{R^2} \sim R$

m.a.w. dan inderdaad: hoe groter des te groter de zwaarte kracht

2. men wist niet hoe licht zich gedraagt in een zwaarte krachtveld

Hoe begon 't allemaal? (2)

- 1905 **Speciale relativiteitstheorie van Einstein; een algemene theorie** geldig voor alle natuurkunde, beschreven in referentiestelsels waarop geen krachten werken (zgn. inertiaal systemen)

→ **Maximum snelheid**, materie kan niet sneller dan licht: Newton's zwaarte kracht moet aangepast worden

- 1915 **Algemene Relativiteitstheorie van Einstein** een theorie die de Zwaarte kracht beschrijft (speciaal stukje natuurkunde) geldig in alle referentiestelsels
Einstein stelde de vergelijking op die hijzelf niet exact kon oplossen

- 1916 **nieuwe "Wet van Newton"**, Karl Schwarzschild exacte oplossing van Einstein-vergelijkingen voor een puntmassa M; dan gekke dingen als ontsnappingsnelheid=lichtsnelheid bij de Schwarzschildstraal $R = \frac{2G}{c^2} M$ (3M km voor M in zonsmassa's)

houding in die tijd; negeren, zulke sterren bestaan niet; de Schwarzschildstraal zou onfysisch zijn (Einstein)




De klassieke zwaarte kracht

- 1638 Galileo: alles valt met zelfde versnelling
- 1687 **Wetten van Newton**
- baanbrekend:
 - bevestiging van Copernicaanse wereldbeeld (heliocentrisme)
 - het **aardse** (de appel) is toch niet zo verschillend van het **hemelse** (de Maan)

gedachte-experiment



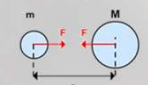

zwaarte kracht iets universeels, niet afhankelijk van de voorwerpen



kanonskogel (aards)
baan om de aarde (hemels)
baan kanonskogel eigenlijk een ellips onderbroken door het aardoppervlak.

Zwaarte kracht volgens Newton


- Zwaarte kracht F tussen twee massa m en M op afstand r



$$F = G \frac{m M}{r^2}$$

een vektor met richting en grootte

- Hoe wordt die kracht overgebracht? Newton geeft geen verklaring, alleen beschrijving
- **met zijn problemen:**
 - geen tijdsvariabele: alles gaat "instantaan"=oneindig snel
 - vrije val-snelheid kan groter worden dan de lichtsnelheid
 - hoe beweegt licht in een zwaarte krachtveld?
 - onverklaarde afwijking baan Mercurius (perihelium precessie)



Zwaartekracht is eigenlijk doodsimpel: in vrije val is het er niet, astronauten zweven

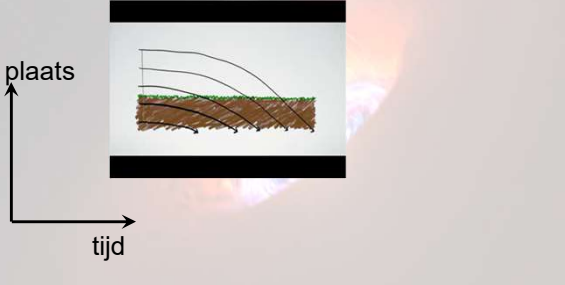


Satelliet/Aarde/Zon etc volgt een natuurlijk pad in vrije val: geodeten je merkt alleen wat

- als je daarvan afwijkt (harde aardoppervlak)
- als je twee nabije paden (geodeten) met elkaar vergelijkt, en je van elkaar wegdrijft

Newton: veroorzaakt door getijdenkrachten
Einstein: veroorzaakt door kromming van de ruimte

Zwaartekracht in vrije val is het er niet en op Aarde voelen we de kracht van het harde oppervlak (elektromagnetische krachten)




plaats

tijd

Vrije val, geen externe krachten

- inertiaal systeem (je zweeft en voelt geen zwaartekracht)
- tennisballen maken geen boogjes, maar gaan recht door



met zwaartekracht

zonder zwaartekracht

alle massa dezelfde versnelling

Zwaartekracht van Newton (2)

verklaart planetenbanen, bv Keplers 3^{de} Wet

- hoe kleiner de afstand, des te groter de snelheid.
- kan theoretisch groter dan de lichtsnelheid worden
- grote zwaartekracht gekenmerkt door ontsnappingssnelheid



afstand waarbij de ontsnappings-snelheid groter dan de lichtsnelheid heet:

Schwarzschildstraal of Gravitatiestraal of Gebeurtenishorizon

wat is een zwart gat?

object binnen zijn eigen gravitatiestraal

- dus omgeven met een grens (de horizon) waaruit niets (ook geen licht) kan ontsnappen
- bij iedere massa M is er zo'n straal ($R=3 \text{ km} \times M$) (M in zonsmassa's)

Kan theoretisch bestaan!
Kan het ooit gevormd worden?
Aanvankelijk gedacht dat iets dat zo compact is, nooit kan ontstaan (o.a. Einstein)

- 1965 Roger Penrose bewees dat Zwarte Gaten moeten ontstaan bij voldoende grote materiedichtheid
- Zwaartekracht domineert alle andere krachten die een tegendruk kunnen geven
- 2020 Nobelprijs voor dit werk van Roger Penrose



Theorie voor sterke zwaartekracht

Niet meer Newtonse zwaartekracht (=klassieke zwaartekracht)


maar een nieuwe theorie voor de zwaartekracht, de **Algemene Relativiteitstheorie** uit 1915 van Einstein, gegeven door de zgn. Einstein zwaartekrachtsveldvergelijkingen

- Zwarte Gaten kunnen volgens de Relativiteitstheorie bestaan en worden beschreven met de zgn. **Schwarzschild-oplossing voor een puntmassa** van de Einstein-veldvergelijkingen.

Belangrijk gevolg: op kleine afstand is zwaartekracht sterker dan die volgens Newton zou zijn

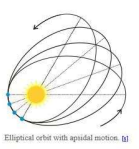


Schwarzschildoplossing voor een puntmassa (1) (en bolvormig symmetrische massa's)

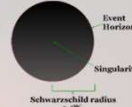


- op grote afstand: als Newton $\sim 1/r^2$
- op korte afstand: kracht is sterker $+1/r^3$

- kenmerkende afstand, $r_s = 3.0 \times M$ km met M in zonsmassa's, de Schwarzschildstraal, de horizon,




Schwarzschildoplossing voor een puntmassa (2) (en bolvormig symmetrische massa's)



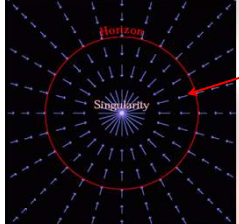
- minimale cirkelbaan op afstand $r = 3 r_s$ (daarbinnen is zwaartekracht te groot of: omloopsnelheid zou groter worden dan de lichtsnelheid)
- foton cirkelbaan op afstand $r = 1.5 r_s$ (daarbinnen: foton valt naar binnen) op die afstand zie je je eigen achterhoofd)

- voor $r < r_s$ geen uitredende fotonen (ontsnappingsnelheid > lichtsnelheid)


- vandaar de naam Zwart Gat: er komt geen licht vandaan



Waterval-analogie van een zwart gat

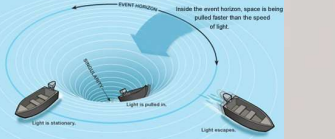


voorbij de horizon merk je lokaal niets, maar het water gaat sneller dan dat je terug kunt varen



deze vis kan niet meer ontsnappen

deze vis wel




inside the event horizon, space is being pulled faster than the speed of light.

Light is stationary. Light is pushed in. Light escapes.

Waterval-analogie van een zwart gat



buiten de horizon kan je ontsnappen, maar vlak er buiten kost dat veel moeite kracht naar oneindig, vlak bij de horizon



binnen de horizon is geen enkele kracht groot genoeg om je op constante afstand te houden

Een ster kan daar niet bestaan en moet verder instorten tot een "singulariteit" op $r=0$ waar we niet weten wat er gebeurt

Hoe zie je een zwart gat?

Methode 1: iets draait om niets

waarneembaar door zwaartekrachtveld er buiten

bijv. iets draait om schijnbaar niets dat grote massa blijkt te hebben

- we kunnen niet iets anders bedenken dan dat dit een Zwart Gat moet zijn

- hypothetisch alternatief Boson-ster maar dat soort bosonen kennen we (nog) niet

- 2020 Nobelprijs voor ontdekking van een zwart gat in centrum van de melkweg voor Reinhard Genzel & Andrea Ghez




Hoe zie je een zwart gat? Methode 2: wat er naar toe valt, wordt heet: Röntgengloeiend

ook weer waarneembaar door zwaartekrachtveld er buiten

uitdijende gewone ster

Zwart Gat



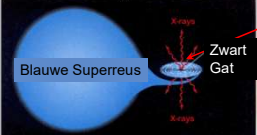
- Probleem: compacte sterren (zoals Neutronensterren) geven hetzelfde resultaat Dan weer, als het te zwaar is kan het alleen een Zwart Gat zijn

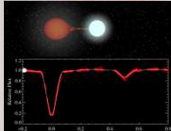
bekende effecten in zwaartekrachtsveld Accretieschijf

- Accretie-schijf, zoals de ringen van Saturnus
 

binnenste draait sneller dan buitenste
- Accretie-schijf, protoplanetaire schijf (ontstaan planetenstelsel)
 

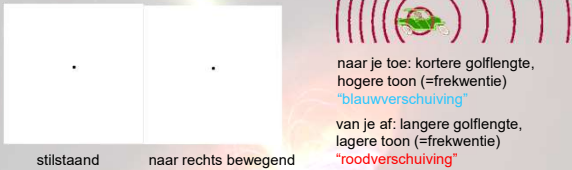
Zwarte Gaten te zien als Röntgenbron in nauwe dubbelsterren

- Accretie-schijf in nauwe dubbelsterren
 

Accretieschijf wordt Röntgengloeiend > 10 miljoen K
- bijvoorbeeld: periodiek verduisterd
 

plus snelheidsmeting via Doppler-effect

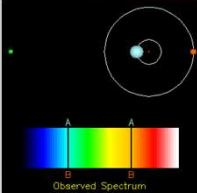
belangrijk meetinstrument in de sterrenkunde: snelheid uit Doppler-effect



naar je toe: kortere golflengte, hogere toon (=frequentie) "blauverschuiving"
 van je af: langere golflengte, lagere toon (=frequentie) "roodverschuiving"

stilstaand naar rechts bewegend

Zo is de rotatiesnelheid te meten. Grote snelheid → grote massa op die manier ontdek je **Stellaire Zwarte Gaten** 6 tot 30 zonsmassa's



Observed Spectrum

Doppler-effect, geluid

"muurformules" in Utrecht, Burg. Reigerstraat




$$f_o = f_s \left(\frac{v + v_{wind}}{v - v_s} \right)$$

op je af rijden: scheelde een halve toon


natk4all

De nieuwe zwaartekracht



- 1905 Einstein's Speciale RelativiteitsTheorie
- 1907 Einstein's gelukkigste gedacht: equivalentie principe
- 1913 Afbuiging van licht
- verandering golflengte van licht: **Gravitatie-roodverschuiving**
- **Kromming van de ruimte**
- 1915 De Einstein veldvergelijking

1905 Einstein's Speciale RelativiteitsTheorie

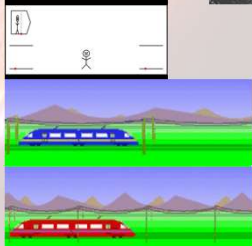


Maxwell, 19e eeuw: uitgerekende lichtsnelheid altijd dezelfde
 Michelson-Morley: geen verschil in lichtsnelheid Aarde rond de Zon
 Einstein: **poneer gewoon dat dat zo moet zijn:**

1. Natuurkunde onafhankelijk (invariant) voor referentiesysteem geen onderscheid in verschillende (speciale) inertiaalstelsels; alleen **relatieve** snelheid telt)
2. Lichtsnelheid is een natuurconstante
 Zelfde (invariant) in verschillende inertiaalstelsels

- Tijddilatatie
- Lorentzcontractie
- Geen informatie sneller licht

Introdutie van de waarnemer in de fysica



Consequenties Speciale Relativiteit voor zwaartekracht (2)

relatie met geometrie van de ruimte

Kirkebeweging bij hoge snelheid (bv rotatie planeet)

meetlatjes langs een cirkel: $\text{Omtrek} = 2\pi \times \text{straal}$

Lorentz-verkorting meetlat langs de omtrek en niet langs de straal:

omtrek $> 2\pi \times \text{straal}$
de meetkunde verandert! **Niet meer Euclidische meetkunde**
dichter bij de zon (bij grotere baansnelheid) grotere afwijking

We tekenen wél $\text{omtrek} = 2\pi \times \text{straal}$
maar op een gekromd oppervlak
waarover de straal groter is dan
in een plat vlak

Inbedding van niet-Euclidisch 2-dim. vlak
in 3-d als gekromde 2-d ruimte

deze 3^e hulp-dimensie is niet fysisch

1907 Einstein's "gelukkigste gedachte"

- **Equivalentie principe, "lift-experiment"**

lokaal geen verschil tussen versnelde lift en versnelling vd zwaartekracht

Lift

op de aarde

Lift versneld omhoog

in de ruimte

Het equivalentie-principe leidt tot nieuwe effecten van zwaartekracht

- **Licht wordt afgebogen**
- **Licht verschuift in golflengte Gravitatie-roodverschuiving**
- **Gravitatie-tijdilatatie de tijd tikt langzamer in zwaartekrachtsveld**

begrijp ik niet begrijp ik wel

Al deze effecten treden extreem op in Zwarte Gat

Licht en zwaartekracht (1)

pas equivalentie principe toe

• **Licht wordt afgebogen**

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

Licht en zwaartekracht (1)

pas equivalentie principe toe

1. **Licht wordt afgebogen in zwaartekrachtsveld**

Versnelde waarnemer \equiv zwaartekracht

Apparent Actueel Sun

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

1919 bevestiging Sir Eddington bij zonsverduistering

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.

New York Times 10 nov 1919:

een triomf voor de theorie van Einstein

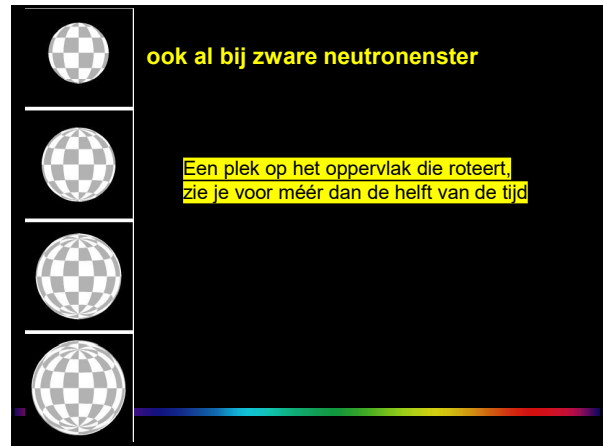
"Alle sterren scheef aan de hemel"

"sterren staan niet waar ze behoren te staan maar niemand hoeft zich zorgen te maken"

Afbuiging licht door zwaartekracht

nu standaard in de sterrenkunde: Gravitatie-lenzen

Afbuiging van licht van een ver object aan de zwaartekracht van een voorgrondstelsel (sterrenstelsel of hele cluster) geeft een lenswerking met meervoudige beelden



Wat zie je op de eerste foto van een Zwart Gat?
de accretieschijf rond het gat
met achterkant en onderkant door afbuiging

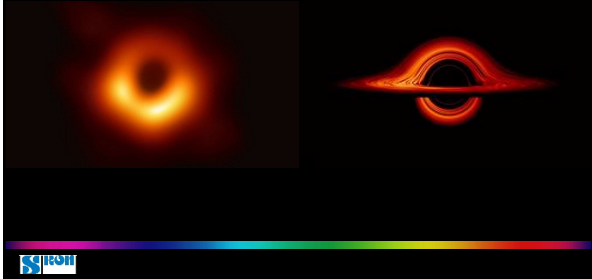
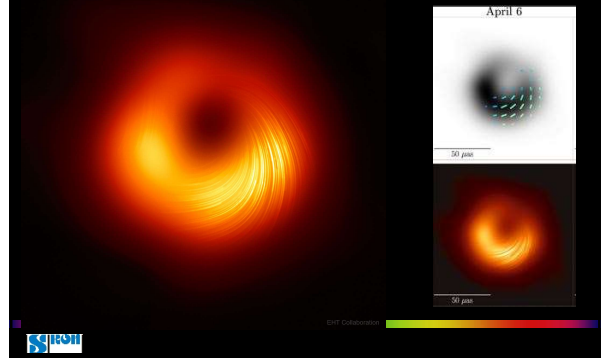


foto inclusief polarizatie M87 door magneetvelden



Licht en zwaartekracht (2)
pas equivalentie principe toe



Licht en zwaartekracht (2)
pas equivalentie principe toe

2 Licht uit zwaartekrachtveld heeft minder energie=lager frequentie $E=h \cdot f$.
a.Gravitatie-roodverschuiving; b. langere periode=tijdsdilatie

foton bovenaan wordt waargenomen met doppleroordverschuiving als gevolg van snelheid v

Versnelde waarnemer \equiv zwaartekracht

lift heeft extra snelheid v gekregen in de tijd dat foton van beneden naar boven gaat

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

gravitatie-roodverschuiving

Instorting van een ster tot de horizon
gravitatie-roodverschuiving \rightarrow oneindig



Licht en zwaartekracht (3)

• Gravitatie-tijdsdilatie
de tijd tikt langzamer in zwaartekrachtveld

relatie tussen golflengte en de tijd van 1 periode:

$snelheid = \frac{afstand}{tijd} = \frac{golflengte}{periode}$

hoe langer de golflengte (gravitatie-roodverschuiving) des te langer is het tijdsinterval van 1 periode, tijd wordt opgerekt

• de tijd tikt langzamer in zwaartekrachtveld
Gravitatie-tijdsdilatie

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

Licht en zwaartekracht (3)

- de tijd tikt langzamer in zwaartekravtsveld
Gravitatie-tijddilatatie



boven in de flat wordt je sneller ouder dan onder in

GPS-satellieten moeten hun tijd corrigeren met gravitatietijddilatatie om in de pas te lopen met de Aardse tijd

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

Tijd-dilatatie

naarmate je dichterbij de horizon komt, gaat de tijd langzamer



gezien van een afstand

Tijd staat stil op de horizon



zoals ervaren door de astronaut zelf

valt gewoon door de horizon

Zij ervaren *de tijd* verschillend.
(uit de wiskunde volgt dat zij daardoor ook *deeltjes* verschillend ervaren)

eigenschappen Zwarte Gat tot nu

- Horizon bij de Schwarzschildstraal als eenrichtingsverkeer
 - je kan er alleen in maar niet uit
 - eenmaal binnen, kan je nooit meer gezien worden
- binnenvallend object (vrije val) valt steeds sneller
- horizon lokaal niet merkbaar voor binnenvallend object (vrije val; equivalentie-principe) (niets fysieks op die plek)
- van een afstand zie je het object door tijdsdilataie steeds dicht naderen tot de horizon maar nooit passeren.
- een Zwart Gat op afstand bekeken gedraagt zich dus alsof er niets is voorbij de horizon

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

Verband zwaartekracht-kromming

- versnelde beweging ↔ zwaartekracht
- versnelde beweging ↔ kromming

Newton: invloed van zware massa via "kracht op afstand", zonder te weten hoe

Einstein: er is alleen maar lege ruimte tussen de massa's dus moet de invloed gaan via **eigenschappen van de ruimte**



Einstein: zwaartekracht bepaald door de **metrische eigenschappen** van de tijdruimte

1. Massa bepaald de **metrische eigenschappen** van de tijdruimte
2. Een testmassa beweegt volgens de meest rechte lijn in de kromme tijdruimte

Einde

Volgende keer verder met het verband zwaartekracht-kromming van de ruimte
Hawkingstraling
soorten Zwarte Gat
ontstaan en evolutie van Zwarte gaten

Dia 48

JH1

John Heise; 21-3-2021