

Zwarte Gat

Onzichtbaar zwart gat toch te zien door opvallende materie, bijvoorbeeld van passerende ster: er vormt een schijf



John Heise

SRON-Ruimteonderzoek Nederland, Leiden

Zwarte Gat, nadruk op waarnemingen



1. Als iets dat zeer heet kan worden
 2. Als iets dat draait om niets
 3. Te zien via zwaartkrachtsstraling
- I. **Eerste foto van een Zwart Gat, april 2019**
 - II. **zwaartekrachtstraling** ontdekt op 14 sept 2015

Zwarte Gaten, de belangrijkste eigenschap

object (ster) met grote zwaartekracht

Er kan iets invallen, maar niets uitkomen:

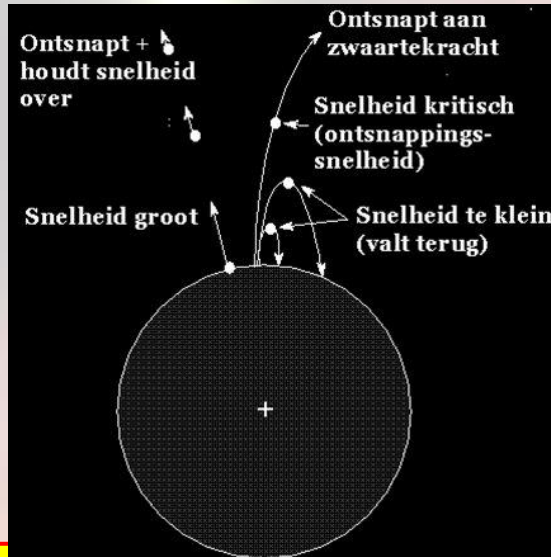
Eénrichtingsverkeer: Informatie verdwijnt

Kan eigenlijk niet:

op fundamenteel niveau in de natuurkunde
(kwantummechanika) is alles omkeerbaar
Er is een wet van behoud van informatie

Wat is een Zwart Gat?

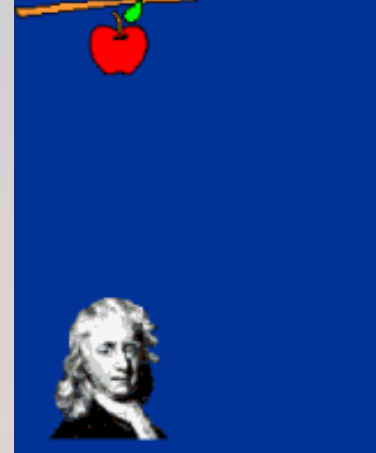
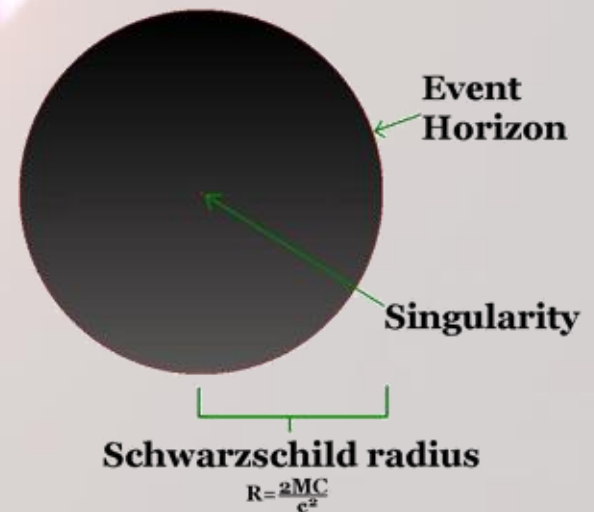
- een object waar de zwaartekracht heel groot is, bv groter dan de zgn. ontsnappingsnelheid die groter is dan de lichtsnelheid



- als ontsnappingsnelheid=lichtsneid

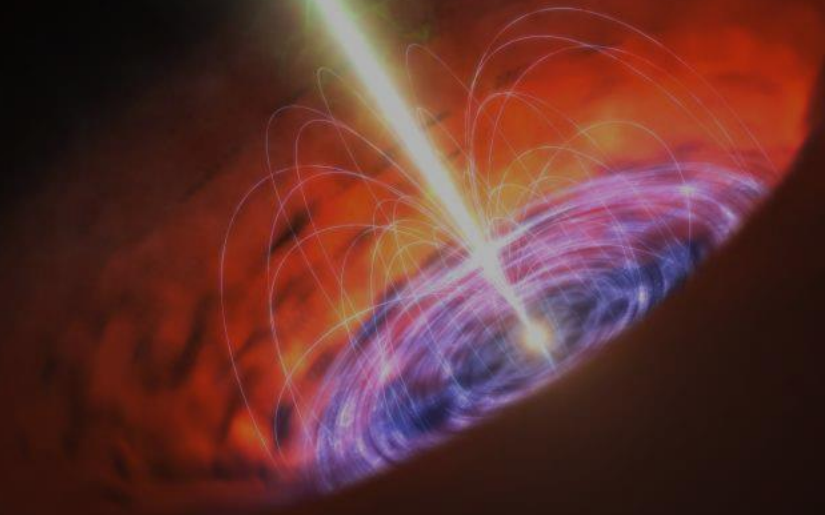
→ dan kan er niets uitkomen

- bij een massa van 1x die van de zon is dat slechts 3km, de zgn. horizon van een zwart gat



Zwarte Gat,

te detecteren via het hete opvallende gas
of door: iets draait om niets (het zwarte gat)



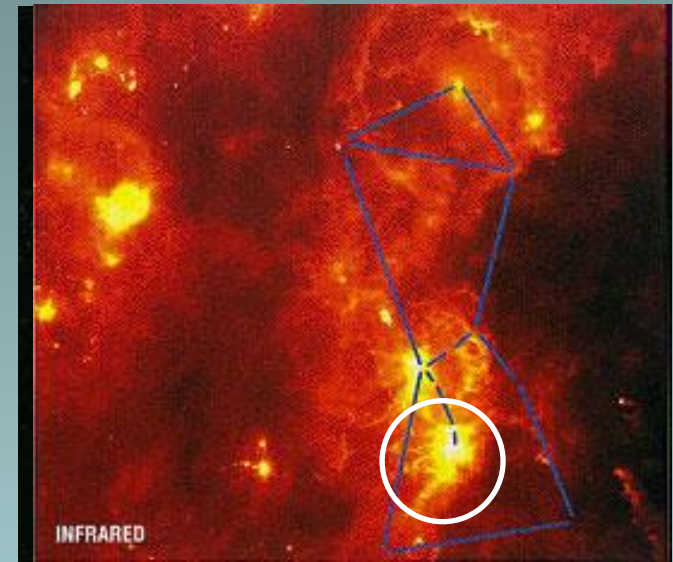
Kijken naar de sterren: sterrenbeeld Orion (blauwe sterren zijn hete sterren)



Behalve sterren, ook koel gas en stof te zien



Infrarood, nog koeler



Koel gas tussen de sterren
waaruit sterren gevormd
worden

**kraamkamer
van sterren**

naar een kraamkamer, de Paardekop-nivel



orion nevel
kraamkamer van
sterren



Maroun Mahfoud

Hoe ziet de sterrenhemel er in totaal uit?

de melkweg, ons sterrenstelsel van 200 miljard sterren



Alle sterren die we zien (tot duizenden lichtjaren afstand) behoren bij de melkweg

Andere melkwegen (sterrenstelsels, niet met blote oog) staan op miljoenen tot miljarden lichtjaren

Vgl.: de rand van het zichtbare heelal is op 45 miljard lichtjaar

Van een afstand:

sterrenstelsel, platte dunne schijf

Zon/aarde

Stof en gas
geboorteplaats van sterren

ieder lichtpuntje is een ster

1 Super Zwaar
Zwart Gat
In centrum

de melkweg van boven (reconstruktie)

1 Super Zwaar
Zwart Gat
In centrum

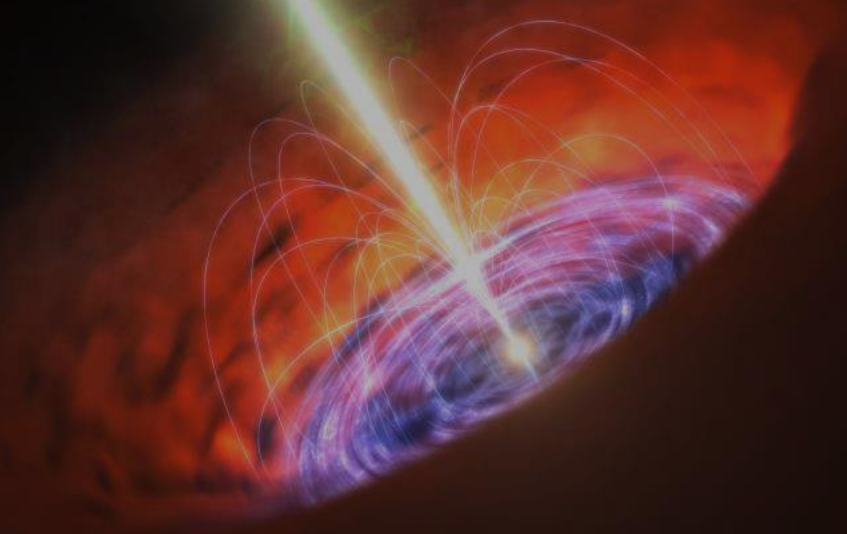
Veel zwarte gaten
tussen de
sterren van
6-50 keer de
massa van de zon:
Stellaire zwarte gaten

je bent hier in Amersfoort
op 26000 lichtjaar van
centrum van de melkweg

een groot sterrenstelsel
(de onze)
met 200 miljard sterren

© Mark A. Garlick / space-art.co.uk

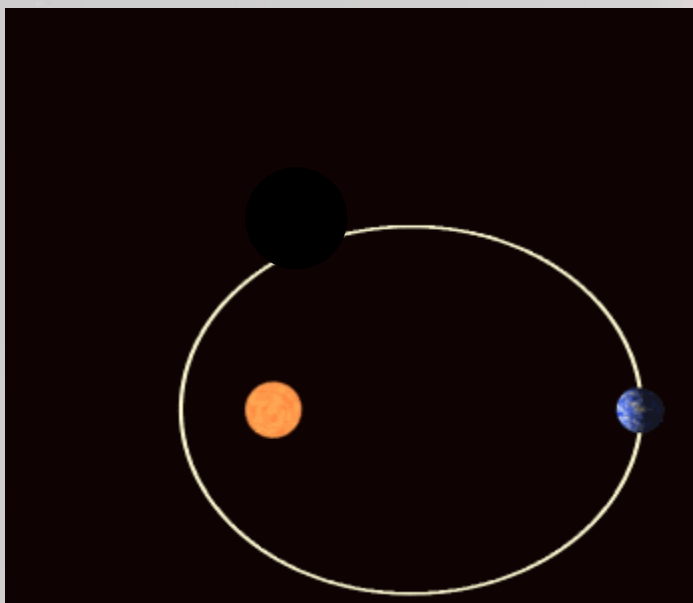
**Zwarte Gaten,
te detecteren (2) bijvoorbeeld doordat
iets draait om niets**



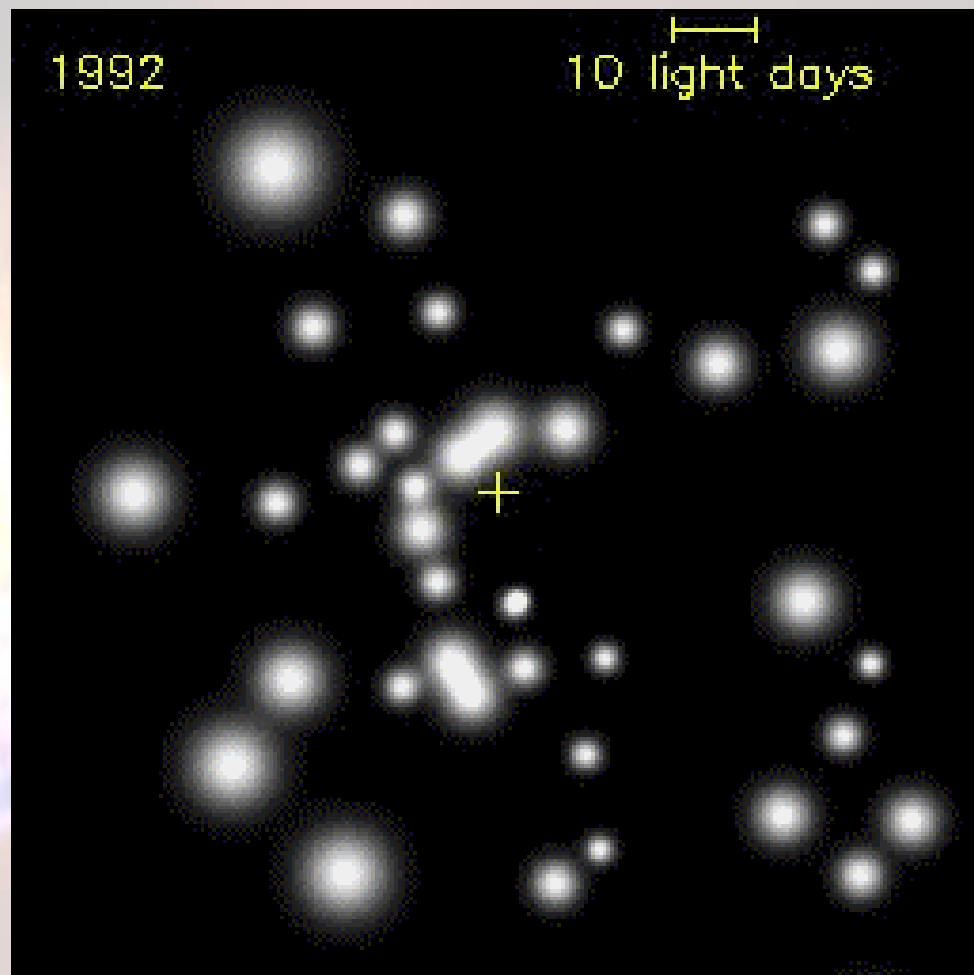
iets draait om niets? via zwaartekrachtveld er buiten

2^e manier om zwarte gaten te zien

iets draait om niets



- 2020 Nobelprijs voor ontdekking zwart gat in centrum melkweg door Reinhard Genzel & Andrea Ghez



Zwart gat kan ook groot aan de hemel zijn



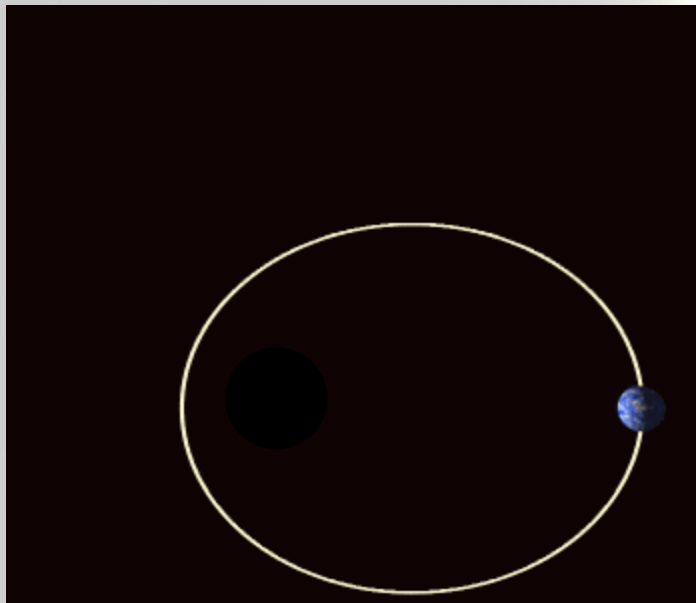
“straalstromen”, groot te zien a.d. hemel

- telescopen en de maan tonen de grootte van het stuk hemel
- met 2 relativistische "straalstromen", miljoenen lichtjaar groot

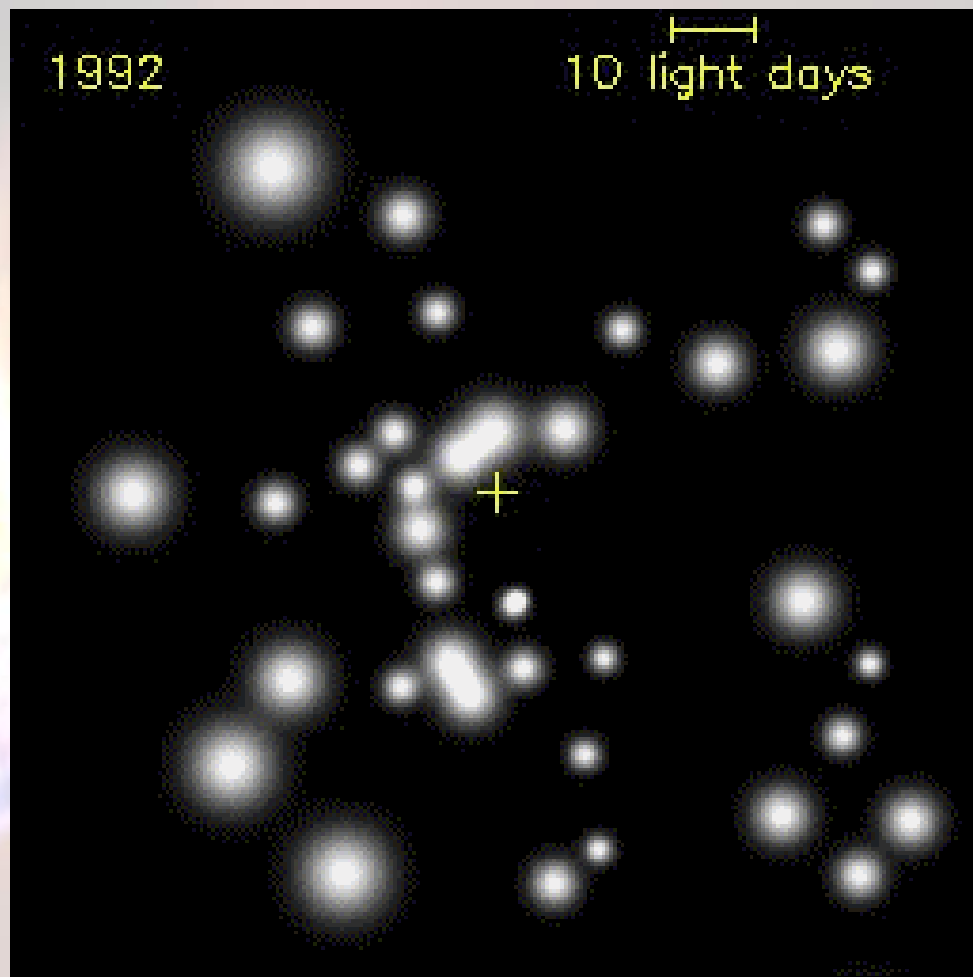


iets draait om niets? via zwaartekrachtveld er buiten

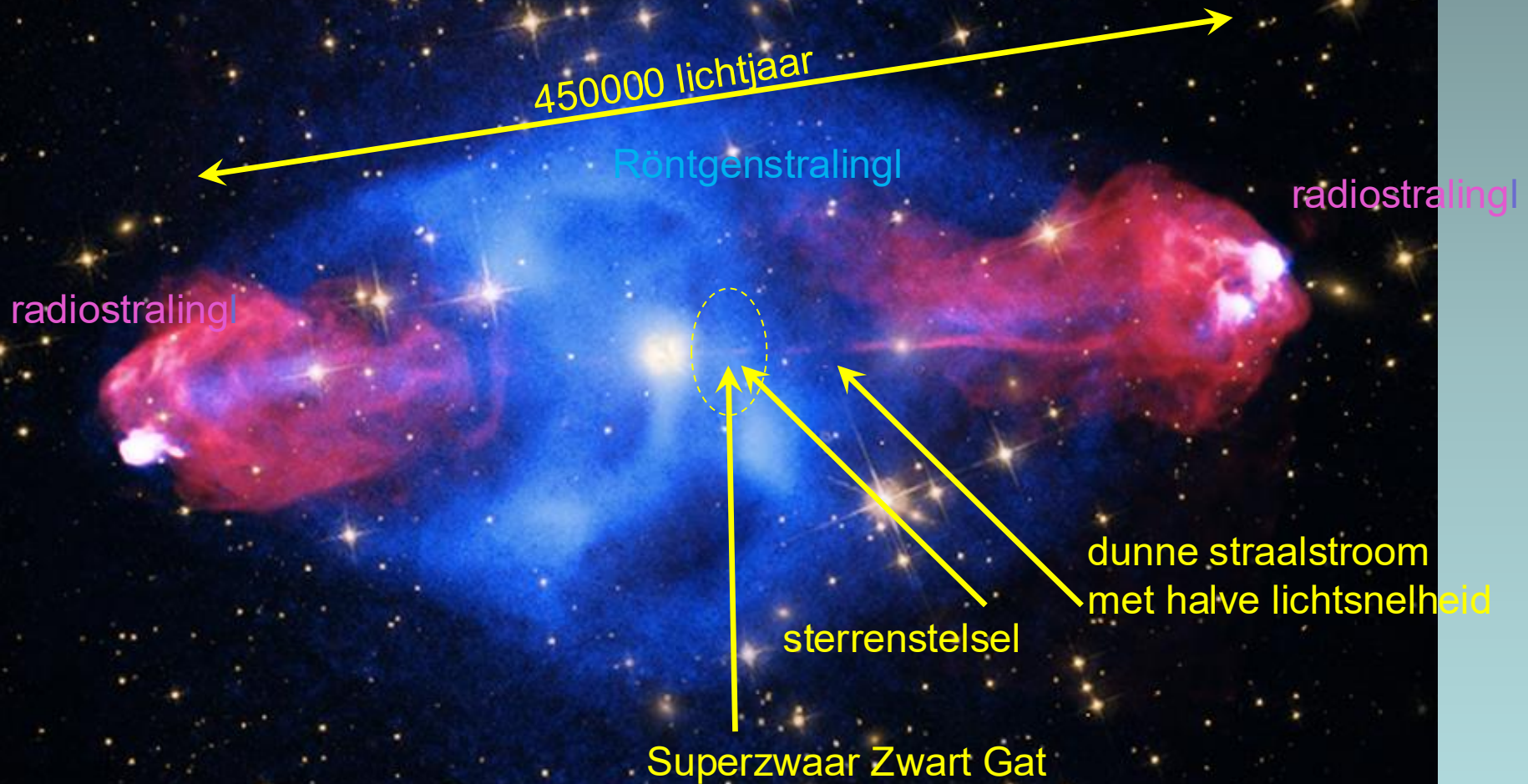
2^e manier **iets draait om niets**



- 2020 Nobelprijs voor ontdekking zwart gat in centrum melkweg door Reinhard Genzel & Andrea Ghez



Sommige superzware Zwarte Gat en (zoals Cygnus-A) niet te missen



Zwaartekracht volgens Newton

17e eeuw)

- Altijd aantrekkende Kracht, op afstand uitgeoefend door Massa (Materie)
 - Materie (Aarde, Maan, Zon, planeten)
grotere Kracht bij meer massa
kleinere Kracht op grotere afstand
 - **grote zwaartekracht** gekenmerkt door **ontsnappingsnelheid aan oppervlak**
Aarde 11.4 km/sec



Compakte objecten in het heelal

Planeten, zoals Jupiter

sterinwendige van zon en gewone sterren

Witte dwergsterren, eindstadium vd Zon

Neutronensterren, eindstadium zware sterren

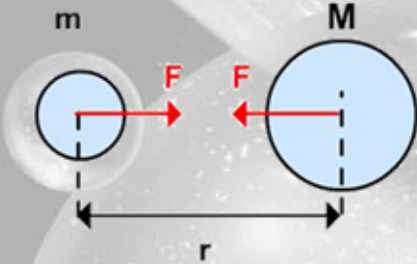
Zwarte Gaten als geen tegendruk kan

Zwaartekracht volgens Newton, 1768



moet fout zijn volgens Einstein, 1915

- Zwaartekracht F tussen twee massa m en M op afstand r



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

een grootheid (vektor) met richting en grootte

- Hoe wordt die kracht overgebracht? Newton geeft geen verklaring, alleen beschrijving

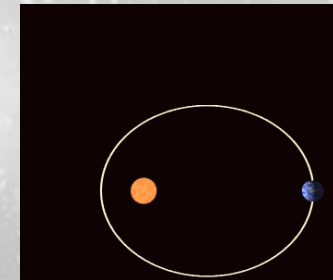
- geen tijdsvariabele: alles gaat “instantaan”=oneindig snel

- vrije val-snelheid kan groter worden dan de lichtsnelheid

- hoe beweegt licht in een zwaartekrachtveld?

- onverklaarde afwijking baan Mercurius

(perihelium precessie)



Wat is een Zwart Gat, eerst gedachten: John Michel 1795, LaPlace 1799



John Michell
1783 → 'dark star'



- een ster waar de zwaartekracht zo groot is dat er geen licht uit kan ontsnappen de helderste sterren zouden dan onzichtbaar zijn

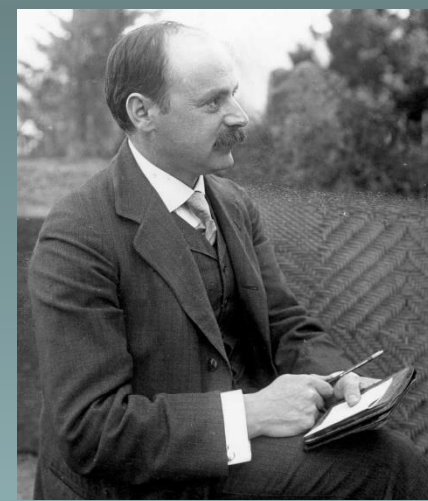
Einstein 1915, Algemene Relativiteitstheorie
de Einstein Veldvergelijking voor een massa verdeling

Carl Schwarzschild 1916
1e oplossing van de Einstein Veldvergelijking
voor een puntmassa

1916 Schwarzschild oplossing

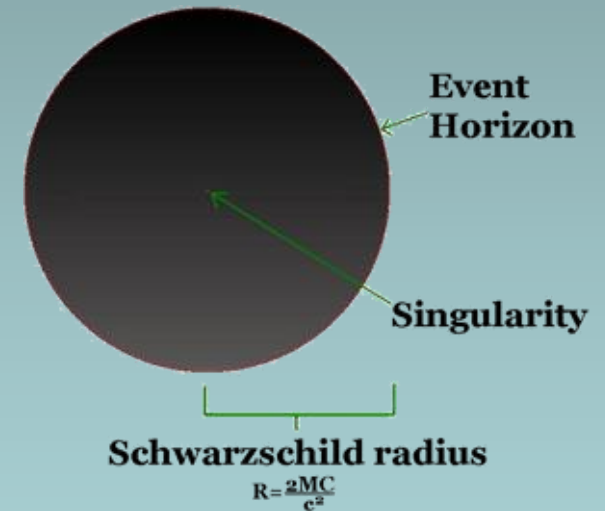
Carl Schwarzschild 1916

1e oplossing van de Einstein Veldvergelijking
voor een puntmassa



Er is een grens, de horizon voor
een puntmassa,
de straal van een Zwart Gat

Alles wordt “oneindig groot” in het
Centrum, net als bij “Newton”
Maar daar dan in de singulariteit $r=0$



Over zwaartekracht: vrije val



In vrije val
geen zwaartekracht

Tennisbal maakt
geen boogjes maar
gaat recht door.

Einstein-wat is zwaartekracht?

Equivalentieprincipe

文A 45 talen ▾

Artikel [Overleg](#)

Lezen

[Bewerken](#)

[Brontekst bewerken](#)

[Geschiedenis](#)

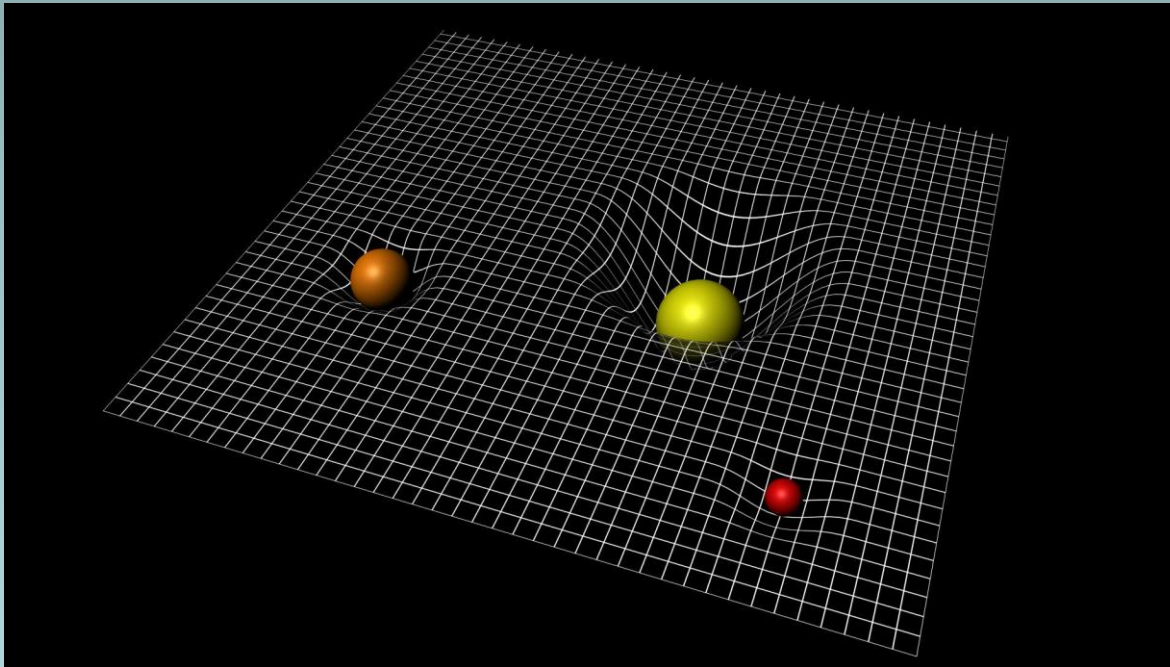
[Hulpmiddelen](#) ▾

Uit Wikipedia, de vrije encyclopedie

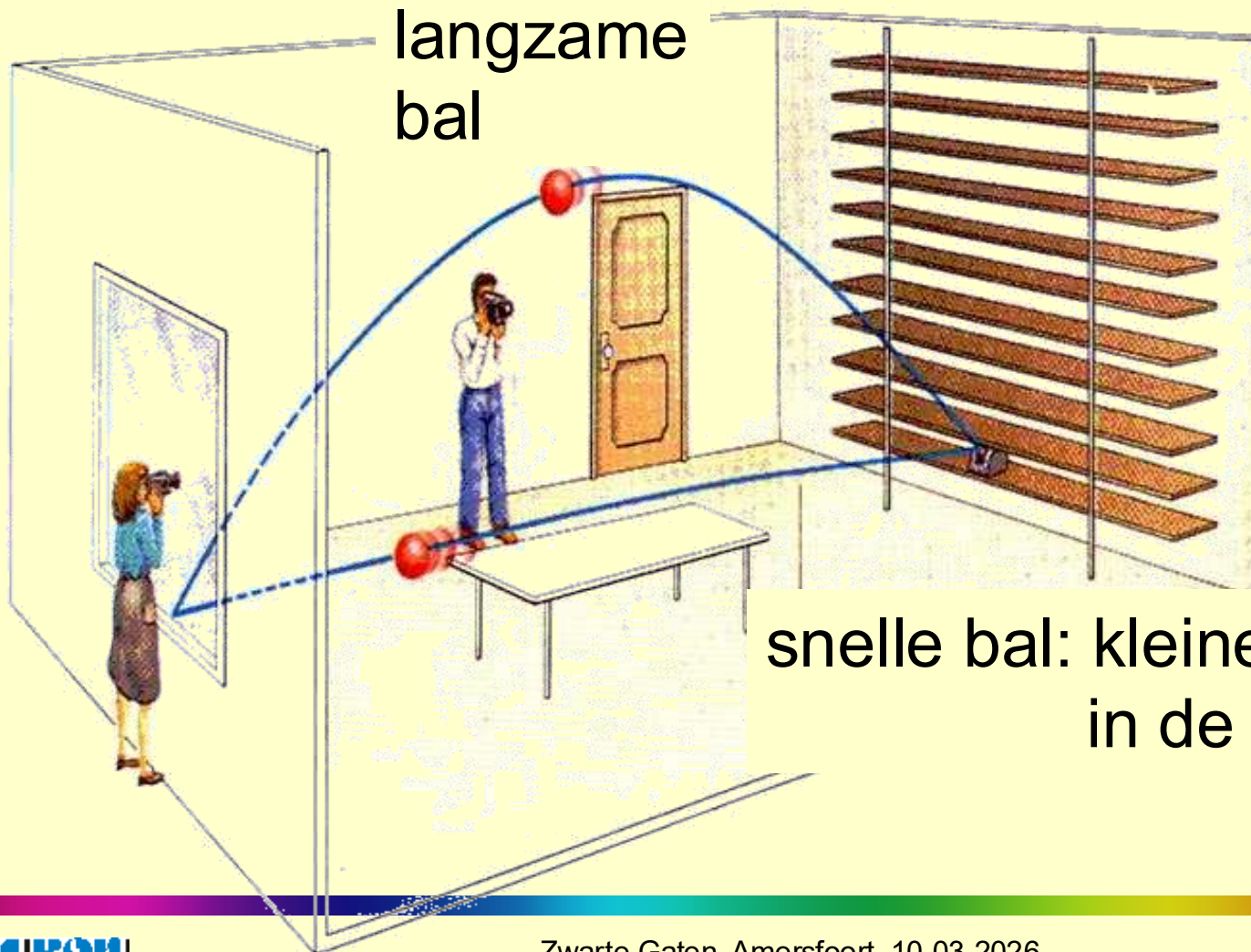
In de [natuurkunde](#) wordt met het equivalentieprincipe het idee van [Albert Einstein](#) bedoeld dat de **traagheidsmassa** uit de [tweede wet van Newton](#) equivalent is aan de **gravitatiemassa** uit de [gravitatiewet van Newton](#). Hij stelde dat er voor een waarnemer geen manier bestaat om een verschil te meten tussen een gravitatiekracht in een stilstaand stelsel en een traagheidskracht in een versnellend stelsel, en dat dit onderscheid dus niet terecht is. Het meer algemene principe dat natuurwetten voor verschillende waarnemers in verschillende stelsels identiek moeten zijn wordt meestal het *relativiteitsprincipe* genoemd.

Einstein-zwaartekracht samenvatting:

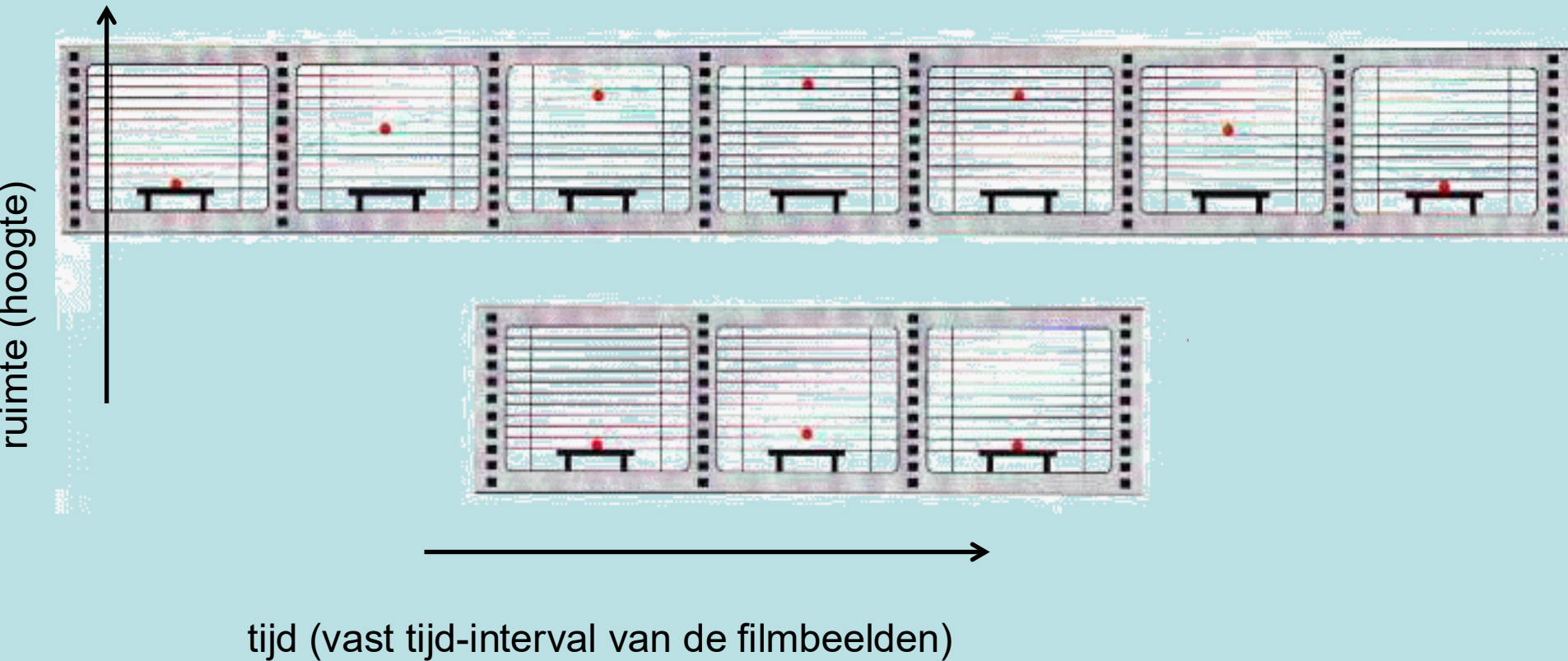
1. zwaartekracht van sterren geeft kromming in de tijdruimte
2. Objecten (planeten) volgen de kortste weg in die kromme ruimte



Niet kromming in de ruimte, maar tijdruimte



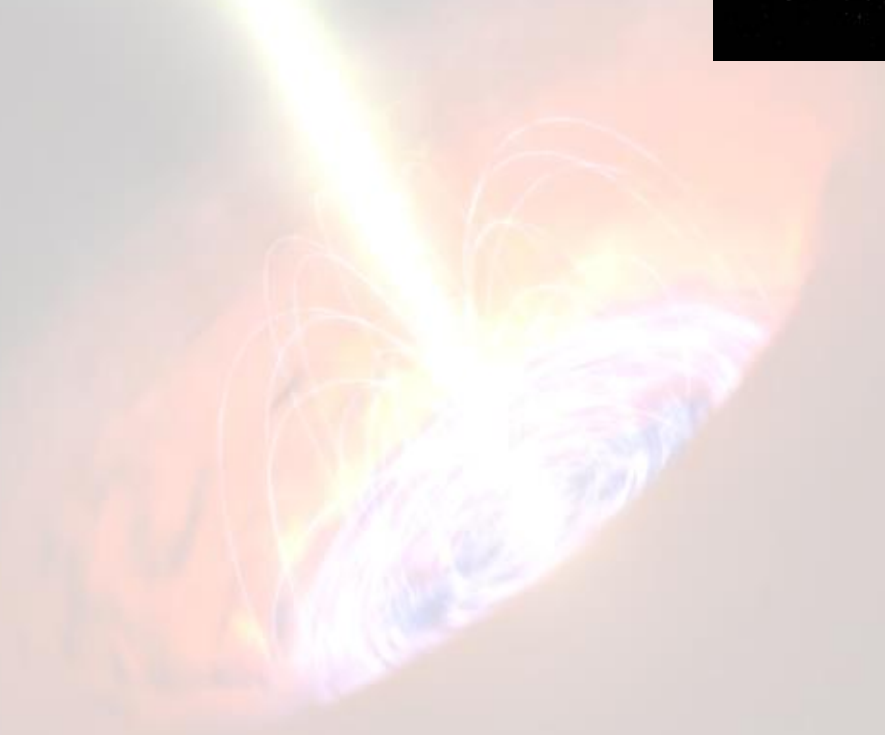
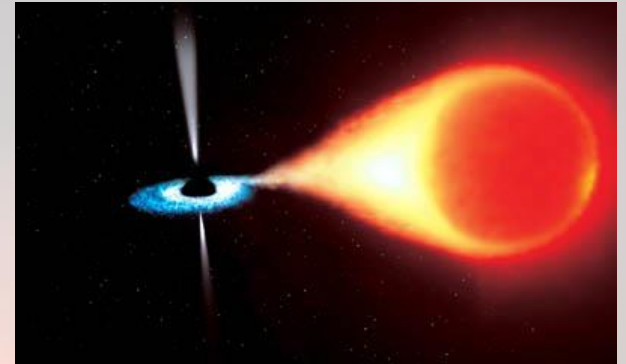
filmbeelden: kromming in de tijdruimte



In de tijdruimte een vaste kromming, dezelfde voor beide ballen

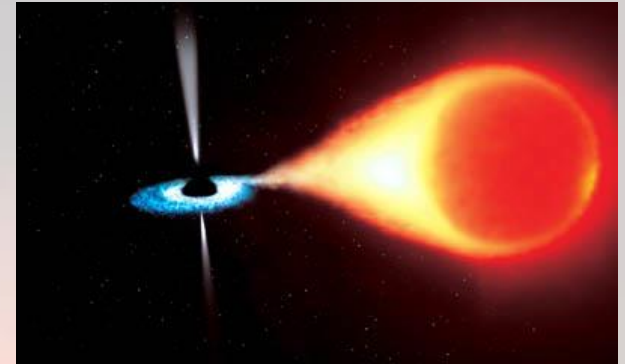
Soorten Zwarte Gaten

Stellaire Zwarte gaten, 3-100 zonmassa's



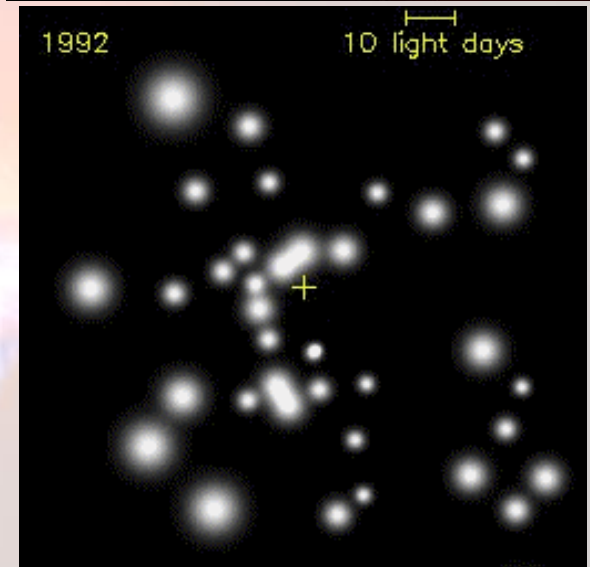
Soorten Zwarte Gaten

Stellaire Zwarte gaten, 3-100 zonmassa's



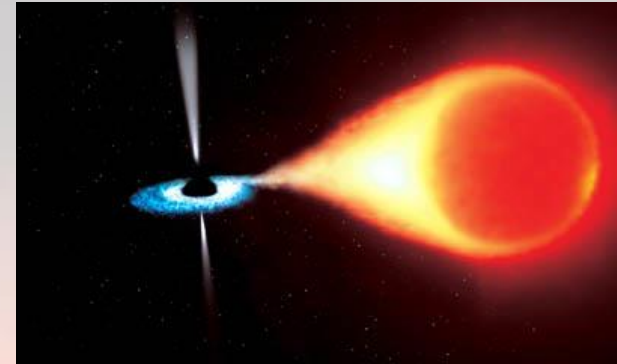
3 miljoen Zonmassa's baanperiode 15 jaar

centrum melkweg



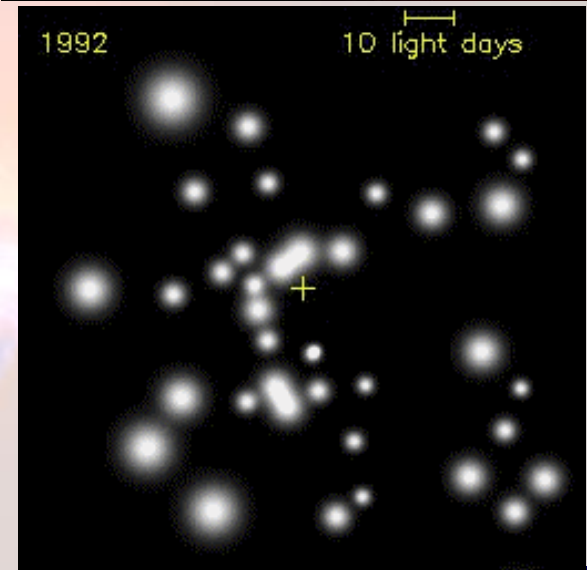
Soorten Zwarte Gat

Stellaire Zwarte gaten, 3-100 zonmassa's



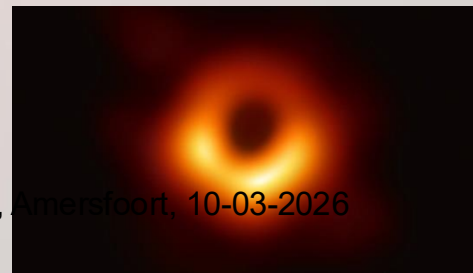
3 miljoen Zonmassa's

baanperiode 15 jaar
in centrum melkweg



Superzware Zwarte Gat,

3 miljard Zonmassa's
in centra van melkwekstelsels



Theoretisch: zwarte gaten van iedere massa (anders dan sterren!)

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

voor massa M
 G zwaartekrachtconstante
 c de lichtsnelheid

• baby zwarte gaten

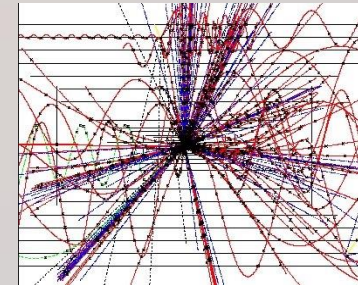
minder dan een Aardmassa (nog nooit gezien)
 kleiner dan ~ 1 cm
 vereisen extreme dichtheden ρ bij de vorming

$$\rho \sim \frac{1}{M^2}$$

• micro zwarte gaten

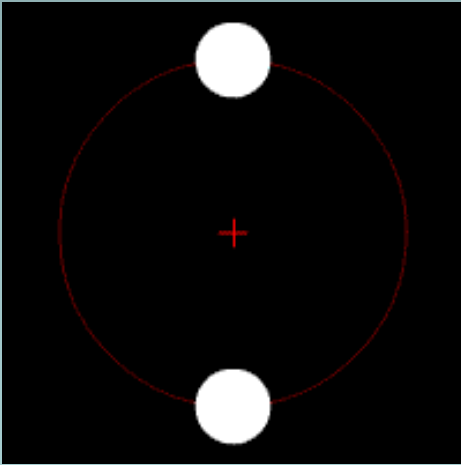
massa van een zandkorrel (nog nooit gezien)
 kleiner dan een atoomkern
 vereisen extreme dichtheden bij de vorming
 (verdampen heel snel);
 praktisch elementaire deeltjes

$$\rho \sim \frac{1}{M^2}$$

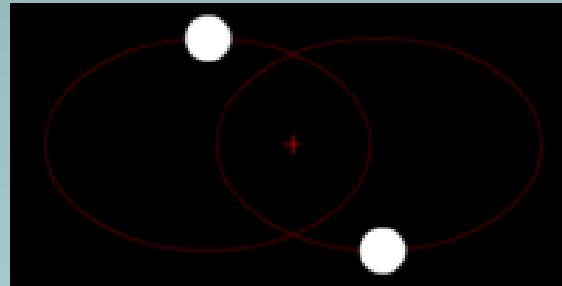


veranderend zwaartekrachtveld:
dubbelsterren
versnelde beweging

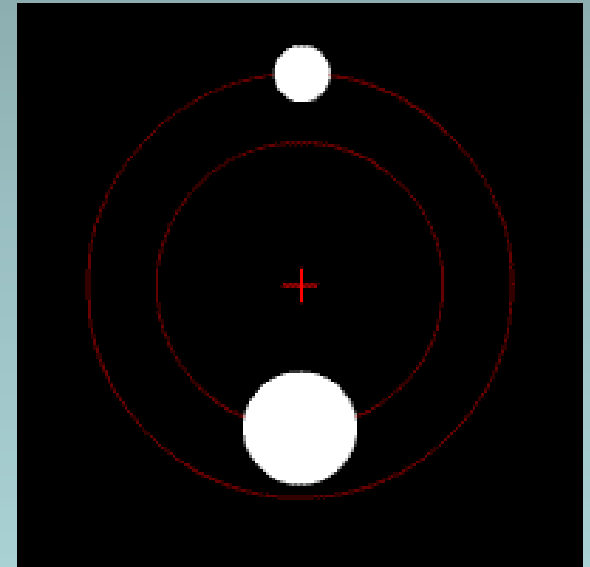
Rotatie rond zwaartepunt +, bijvoorbeeld:



Twee gelijke massa's
In cirkelbaan



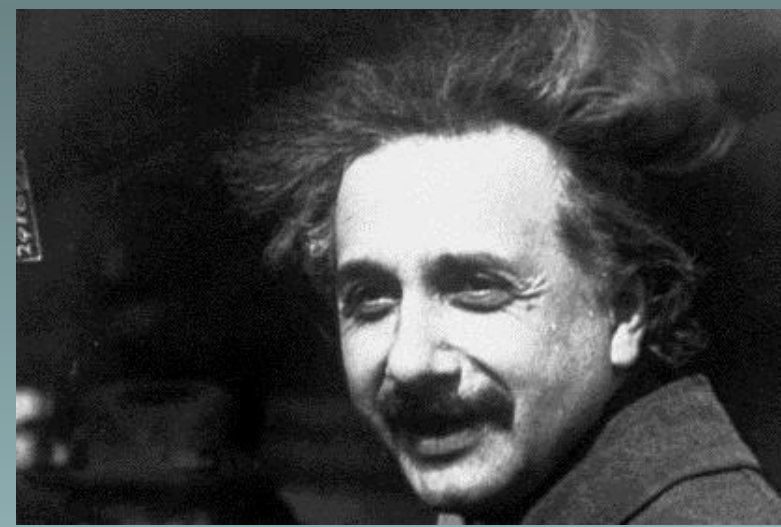
Twee gelijke massa's
In ellipsebaan



Twee ongelijke massa's
In cirkelbaan

Einstein, 1916

zwaartekracht-straling voorspeld
als rimpelingen in de ruimte



Ruimte als het ware "elastisch":
waardoor verstoringen (verandering in de zwaartekracht)
zich voortplanten

reactie van elektrische lading
op een elektromagnetische golf

reactie van een rij test massa's
op een zwaartekracht-golf

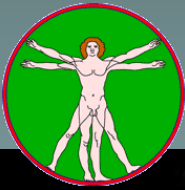


lading



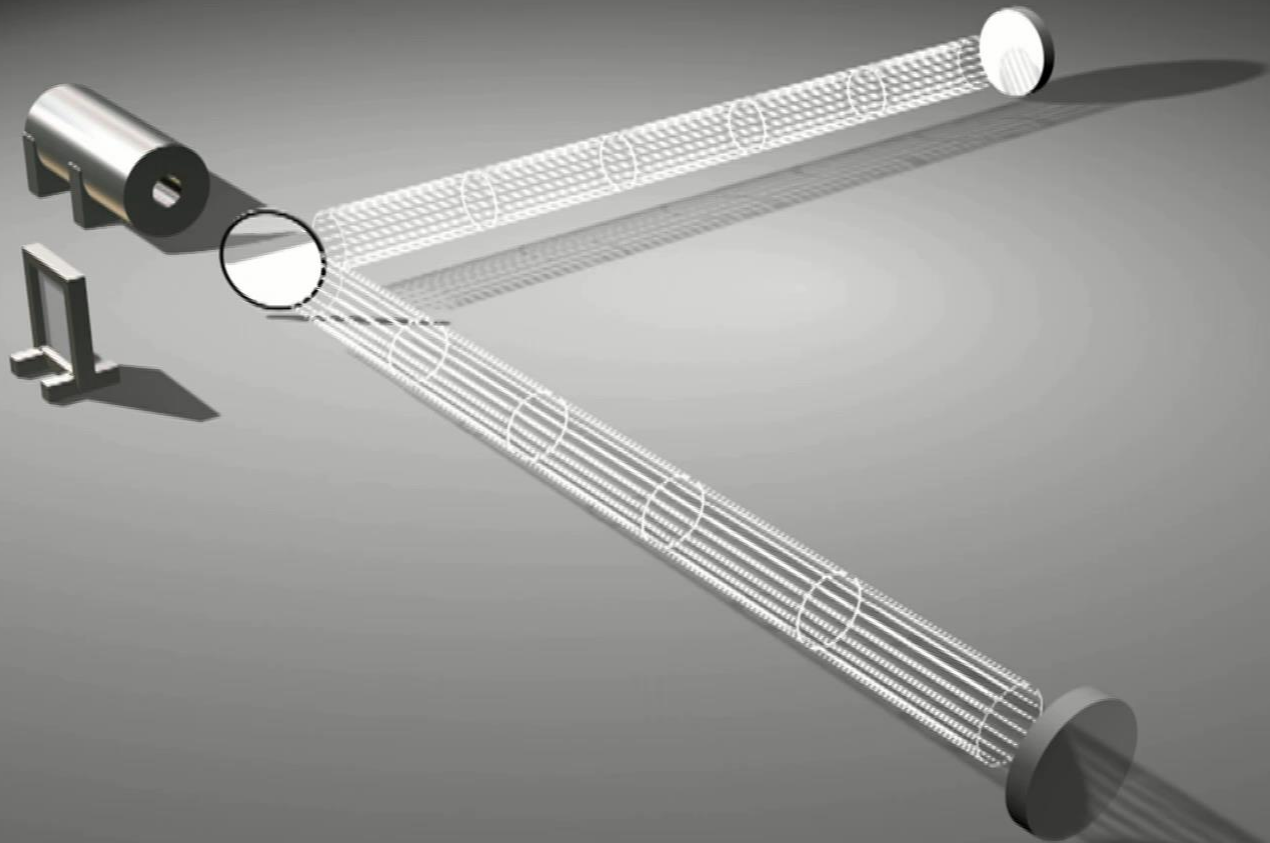
massa

Einstein-vervorming



Hoe neem je de vervorming waar?(film)

(klik de film)

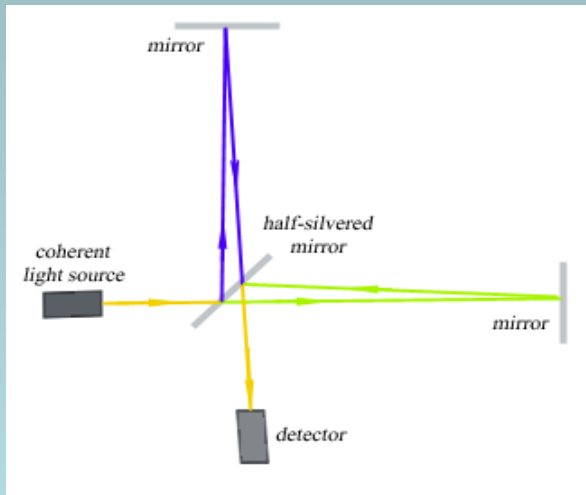


Michelson Interferometer



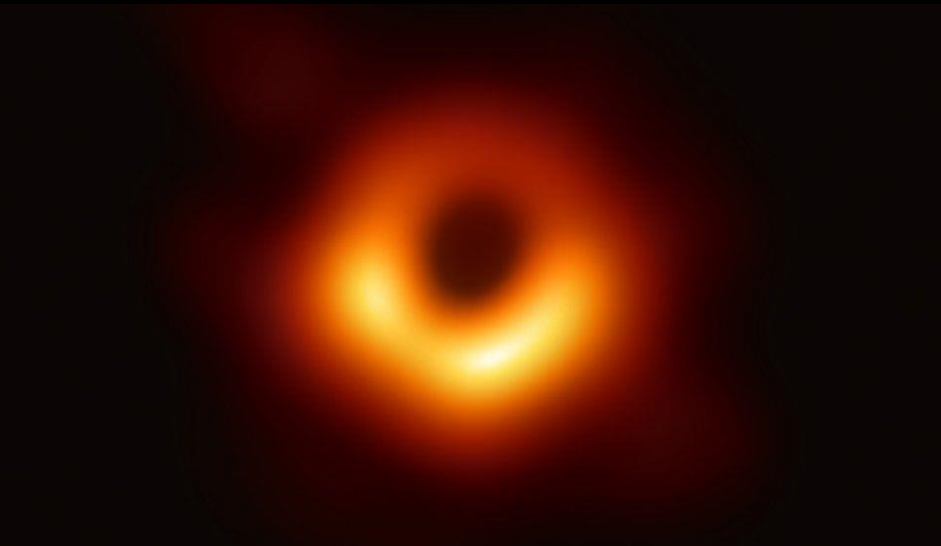
te meten nauwkeurigheid

$$\frac{4km}{10^{21}} = 4 \times 10^{-18} m$$

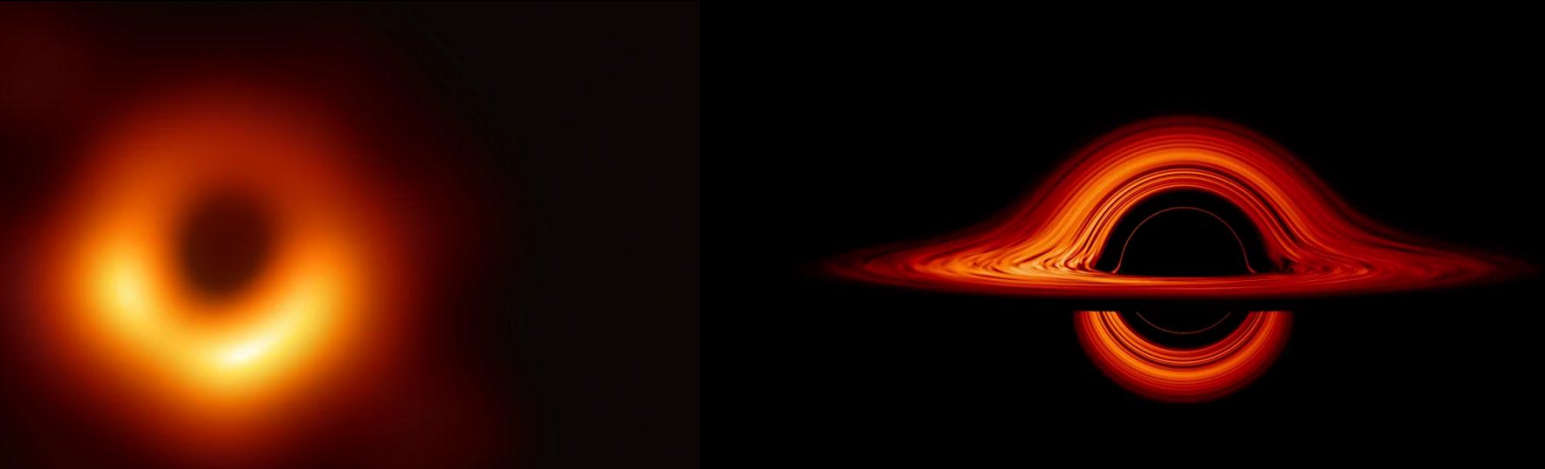


10 april 2019 de eerste foto van een Zwart Gat

10 april 2019 de eerste foto van een Zwart Gat



10 april 2019 de eerste foto van een Zwart Gat



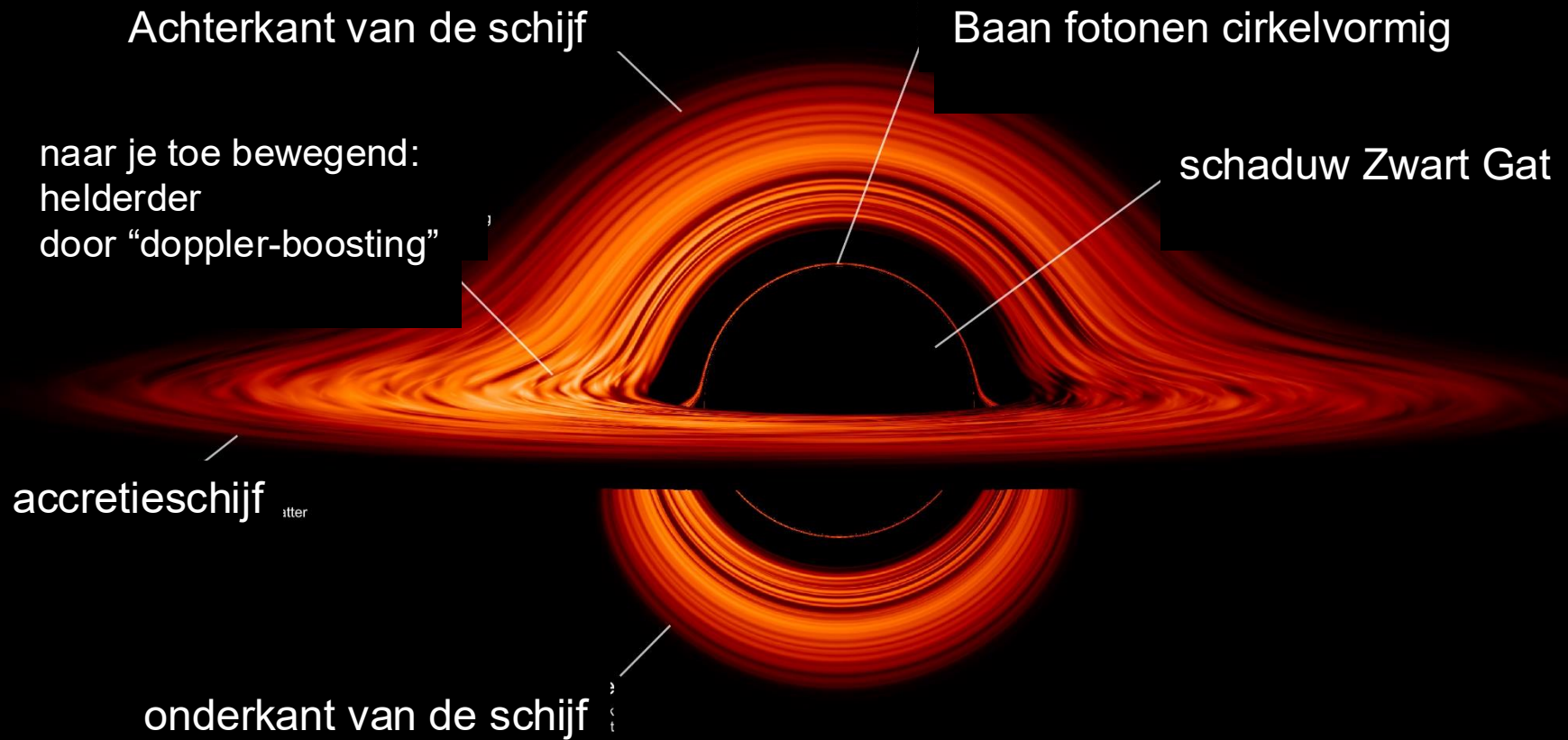
Via materie rond het zwarte gat, maar buiten de horizon: de accretieschijf

Photon ring

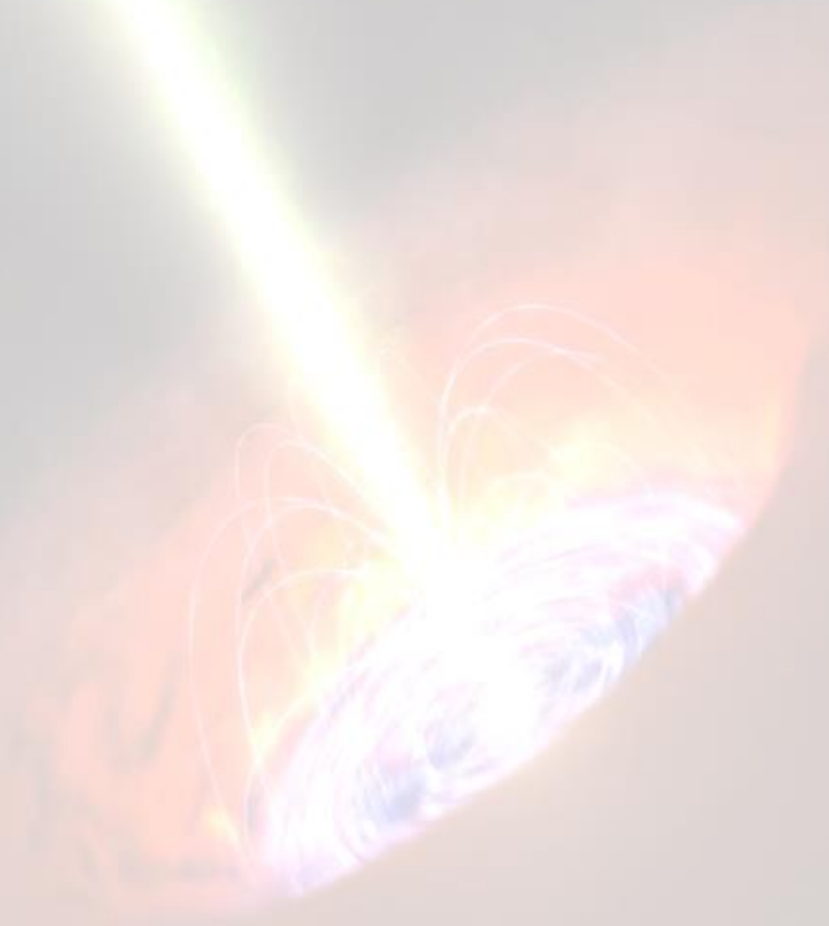
accretieschijf



Via materie rond het zwarte gat, maar buiten de horizon: de accretieschijf

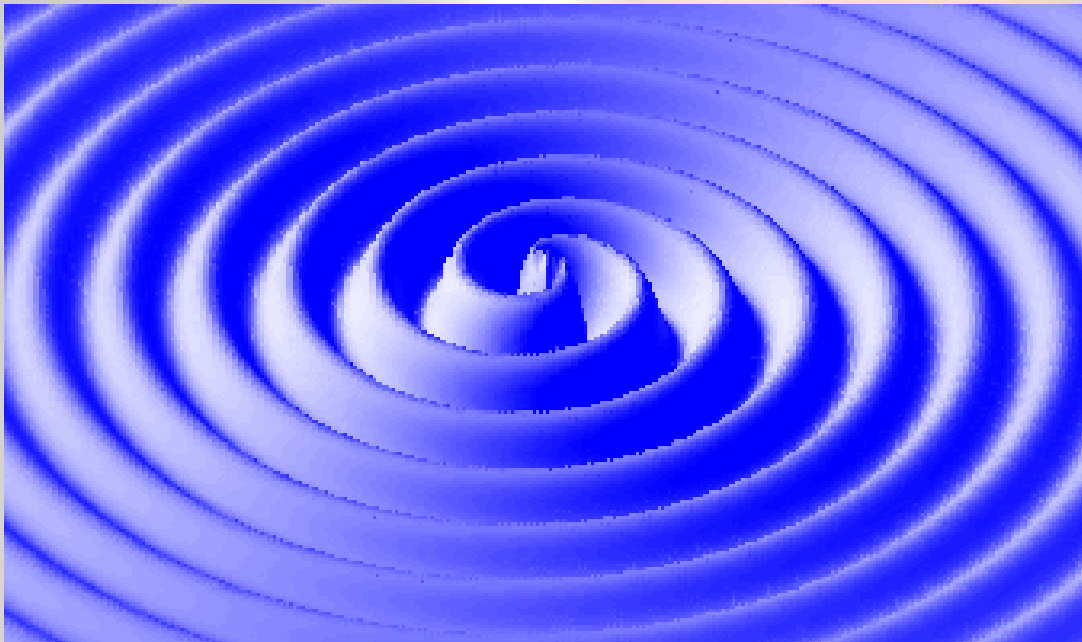


**Nieuwe sterrenkunde, een nieuwe waarneemmethode:
zwaartekrachtstraling ontdekt op 14 sep 2015**



Nieuwe sterrenkunde, een nieuwe waarneemmethode: zwaartekrachtstraling ontdekt op 14 sep 2015

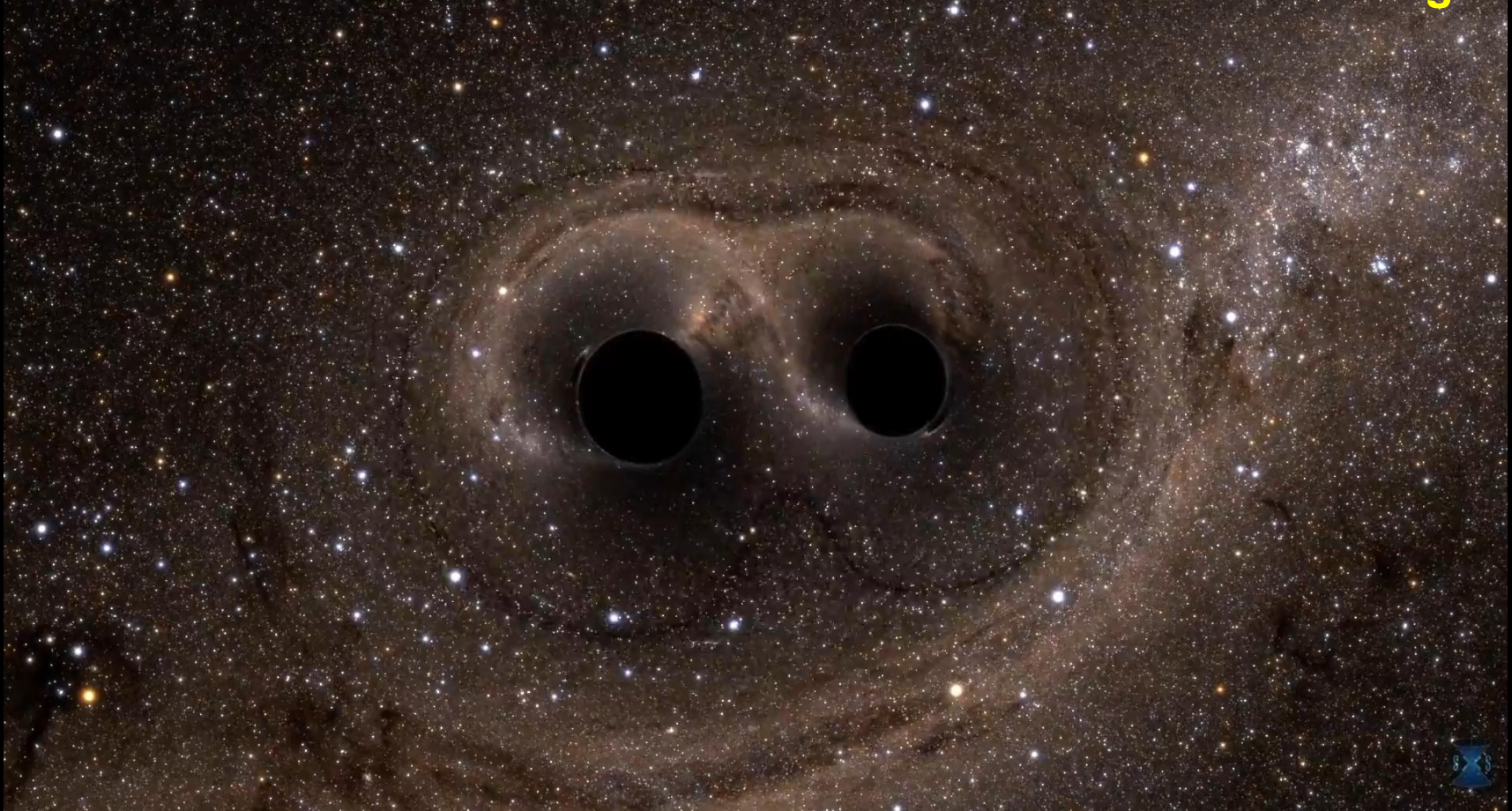
Twee sterren die rond elkaar draaien, geven een wisselend zwaartekrachtveld op afstand en dat plant zich voort met de lichtsnelheid als zwaartekrachtstraling



nauwkeurige numerieke simulatie

vorming groot zwart gat

uit twee om elkaar heen draaiende en daarna botsende zwarte gaten



Twee cruciale gebieden van een zwart gat

1. de **singulariteit**

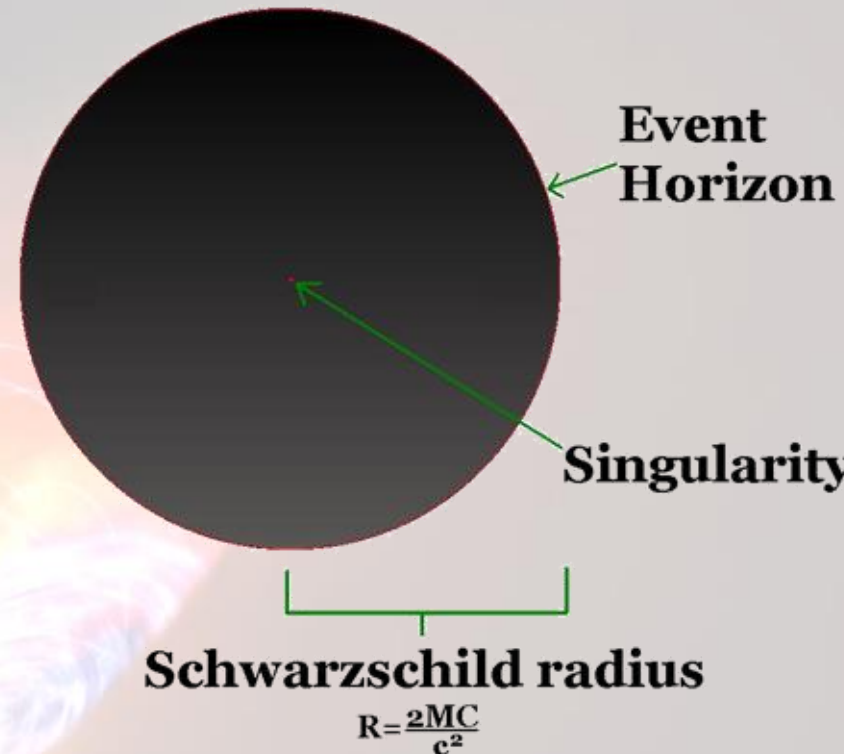
Het onbegrepen centrum waar alles naar toe valt en waar de materie-dichtheid /zwaartekracht/kromming dus oneindig groot wordt

waar de huidige theorieën niet meer geldig zijn

2. de **horizon van een Zwart Gat**

op de Schwarzschildstraal (ook gravitatiestraal)

dat alle waarneming van gebeurtenissen binnenin uitsluit



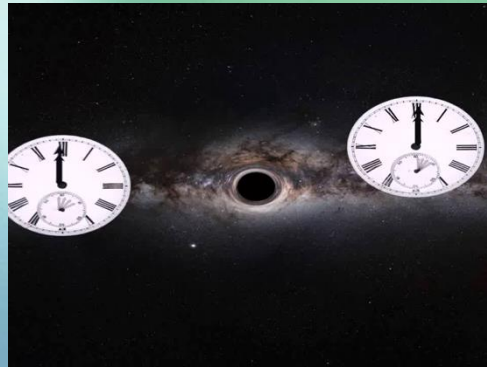
Bijzondere eigenschap
van zwart gat

Zwarte Gat, Amersfoort, 10-03-2026

Verschillende waarnemers ervaren de tijd verschillend

zoals gezien op afstand

steeds langzamer:
tijd staat stil op de
horizon
(bereikt nooit de
horizon en wordt
steeds zwakker)



Het lijkt wel alsof er niets is
achter de horizon

zoals gezien
door astronaut

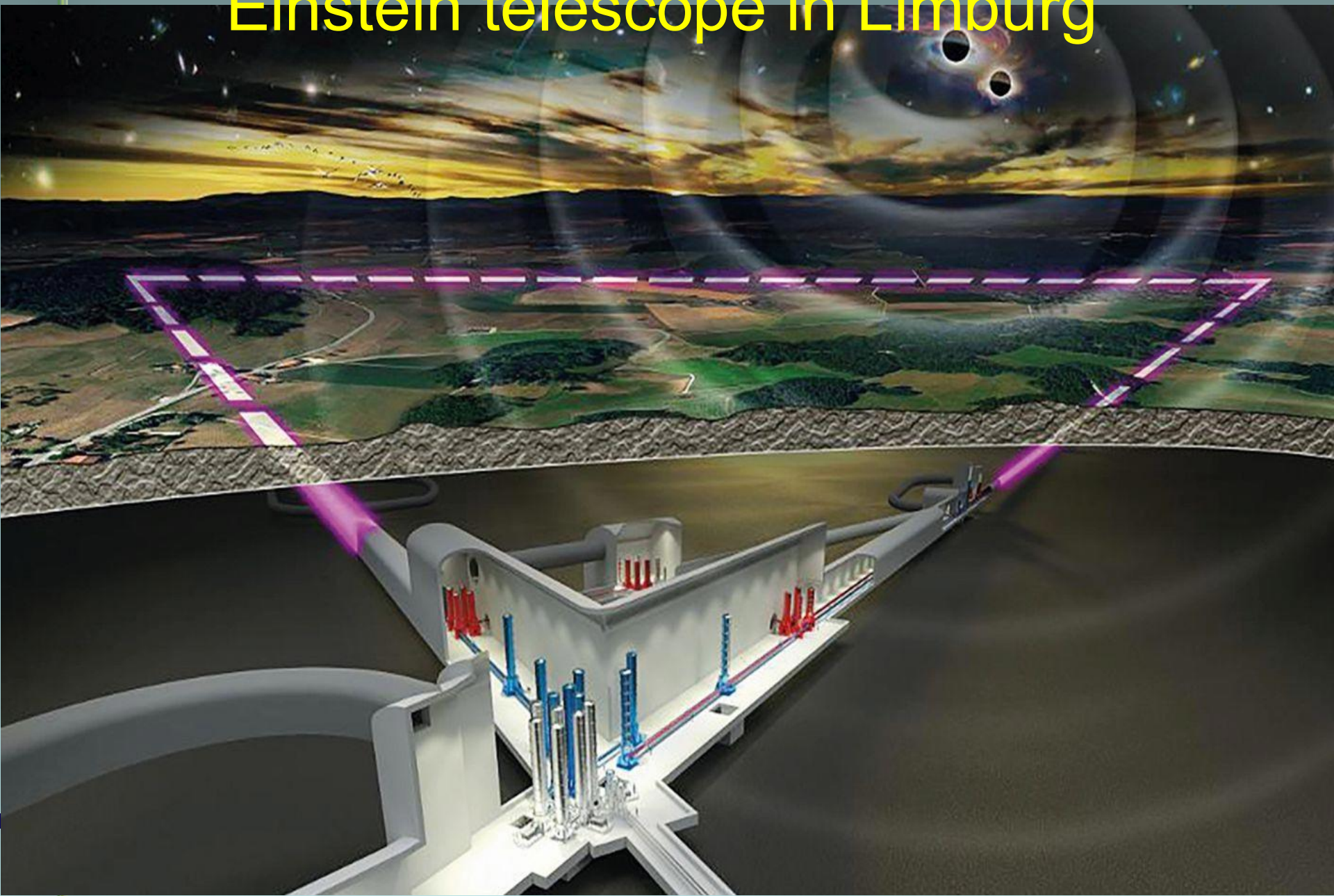
steeds sneller:
passeert de
horizon
en eindigt
in centrum
(singulariteit)



Verschillende waarnemers ervaren de tijd verschillend

Zwarte Gat, Amersfoort, 10-03-2026

Einstein telescope in Limburg



THE END

Val in Zwart Gat: wat zien we van verre?

de visie van Bob op afstand



- binnen de Horizon zien we niets

- buiten de horizon:
 - vrije val snelheid nadert tot de lichtsnelheid
 - naarmate je dichterbij de horizon komt
- astronaut Alice valt naar binnen
 - tijd-dilatatie
haar klok zien we steeds langzamer lopen, bij nadering tot de horizon
 - roodverschuiving
alle ontvangen straling wordt steeds sterker roodverschoven bij nadering tot de horizon

Bob kijkt vanaf de Aarde (of op vaste afstand) naar Alice die in een Zwart Gat valt

- Alice verdwijnt net voor de horizon waar de tijd lijkt stil te staan

- op zeker moment is het laatste foton uitgezonden, Alice is volledig verdwenen en kan nooit meer terug

De horizon van een Zwart gat



dus bijzonderheid Zwart Gat

- **NIET dat er niets uit kan komen,**
maar het tempo-verschil
 - **snel naar binnen:** Alles valt met bijna de lichtsnelheid naar binnen,
vorming Zwart Gat van 1 zonsmassa in 20 microseconden
 - **extreem langzaam naar buiten:** verdamping duurt extreem lang,
 10^{67} jaar voor een Zwart Gat van 1 zonsmassa
- stel ik draai de snelheid van invallend deeltje om vlak voor de horizon:
dan duurt het heel lang voordat het er weer uitkomt,
dat verklaart precies het verschil in tijdschaal

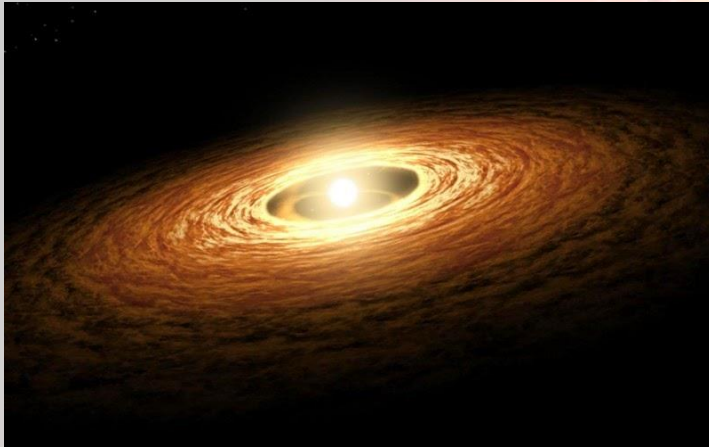
Materie nabij een sterke aantrekker: Accretieschijven

- Accretie-schijf, zoals de ringen van Saturnus



binnenste draait sneller
dan buitenste

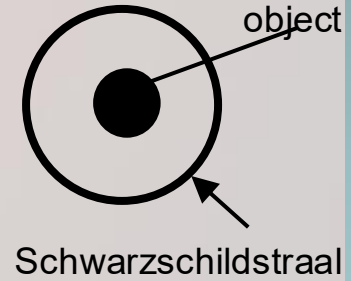
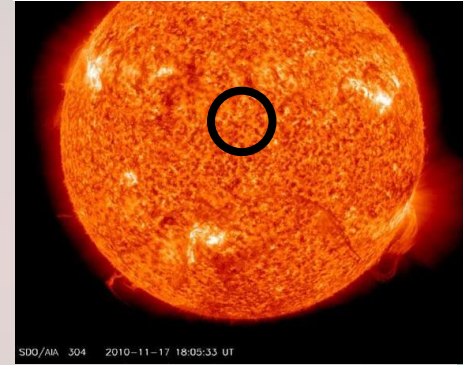
- Accretie-schijf, protoplanetaire schijf
(ontstaan planetenstelsel)



Als de Zon een Zwart Gat wordt

- dan verandert de zwaartekracht op afstand van de Aardbaan niet!
(de Aarde wordt niet opgezwolgen!)
- alleen dicht bij het Zwarte Gat wordt de zwaartekracht groot

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



buiten de Schwarzschildstraal: kleinste cirkelbaan

Uit de Algemene RelativiteitsTheorie (zie verder)
geen cirkelbaan mogelijk binnen
3x Schwarzschildstraal!
daarbinnen valt planeet/satelliet/astronaut
naar het centrum!

kleinste stabiele cirkelbaan
blijkt 3x straal van de horizon



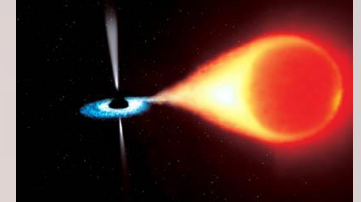
Twee uitersten in Zwarte Gat

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Stellaire Zwarte Gat van 1 of een paar Zonsmassa's:

Zwart Gat gevormd door extreem hoge materiedichtheid

bv de Zon samen te persen tot extreem hoge dichtheid
een bolletje van 3 km (Schwarzschildstraal voor 1 Zonsmassa)
Aan het eind van het leven van een ster, als die zijn eigen gewicht
niet meer overeind kan houden



Superzware Zwarte Gat van miljoen tot miljard keer een Zonsmassa's:

Zwart Gat gevormd door heel veel massa bij 'gewone' dichtheid

a.h.w. door miljoenen zonnen tegen elkaar aan te leggen
(Schwarzschildstraal miljoenen tot miljarden km,
afmetingen ter grootte van ons planetenstelsel)
Bv in het centrum van de melkweg waar voldoende sterren
op elkaar botsen

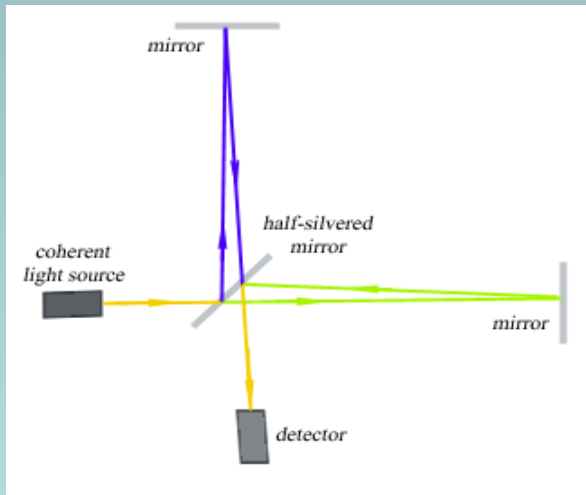


Michelson Interferometer



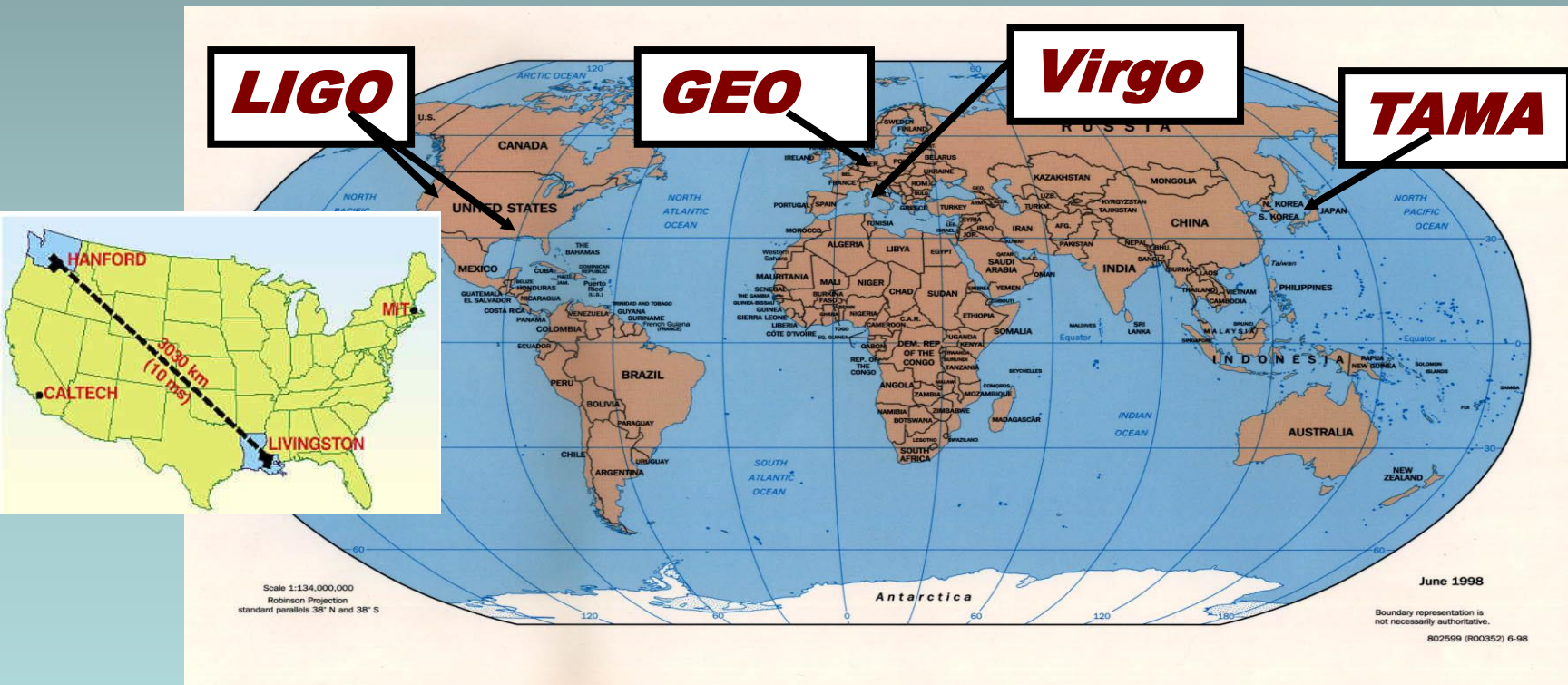
te meten nauwkeurigheid

$$\frac{4km}{10^{21}} = 4 \times 10^{-18} m$$

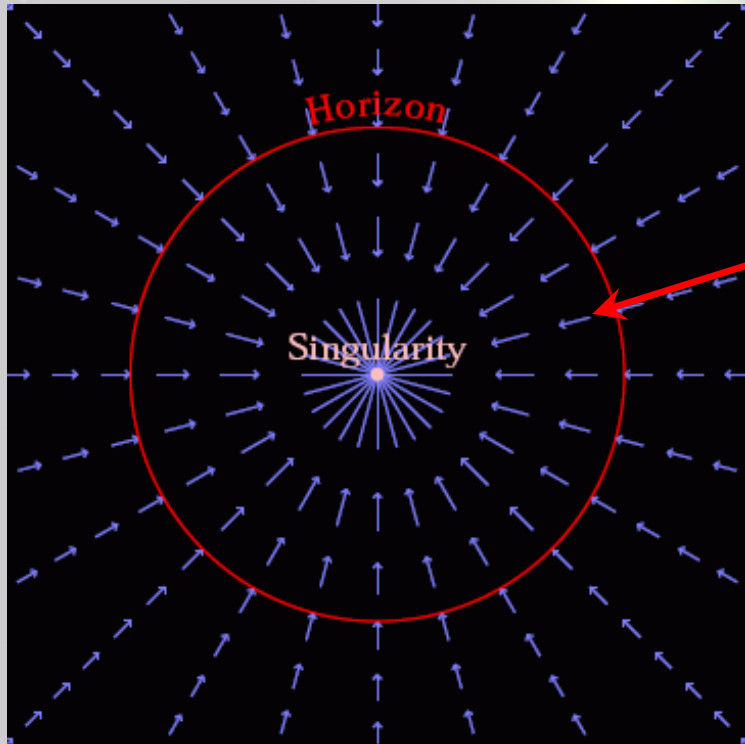


Waar staan de zwaartekracht-detectoren op Aarde?

- US, Europa (Italië, Duitsland, Nederland), Japan:
gevoeligheid van frequenties $f \sim 40\text{-}1000\text{ Hz}$



Waterval-analogie van een zwart gat

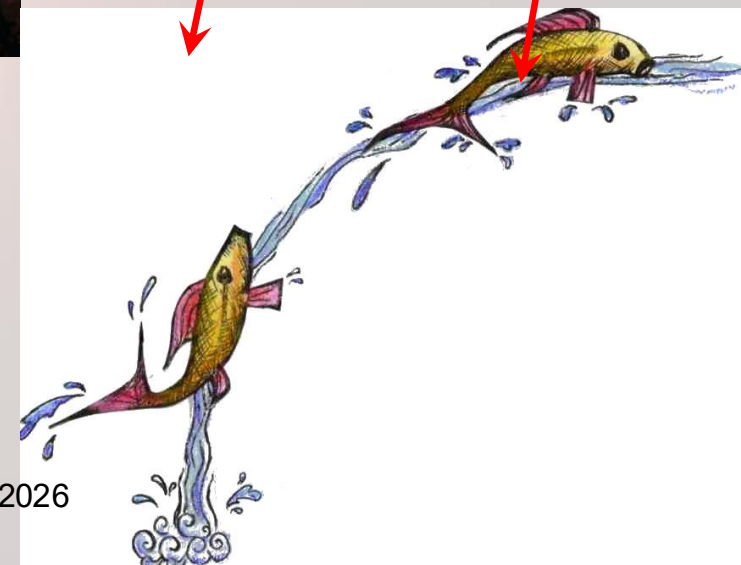


voorbij de horizon
merk je lokaal niets,
maar het water gaat
sneller dan dat je terug kunt varen



deze vis
kan niet meer
ontsnappen

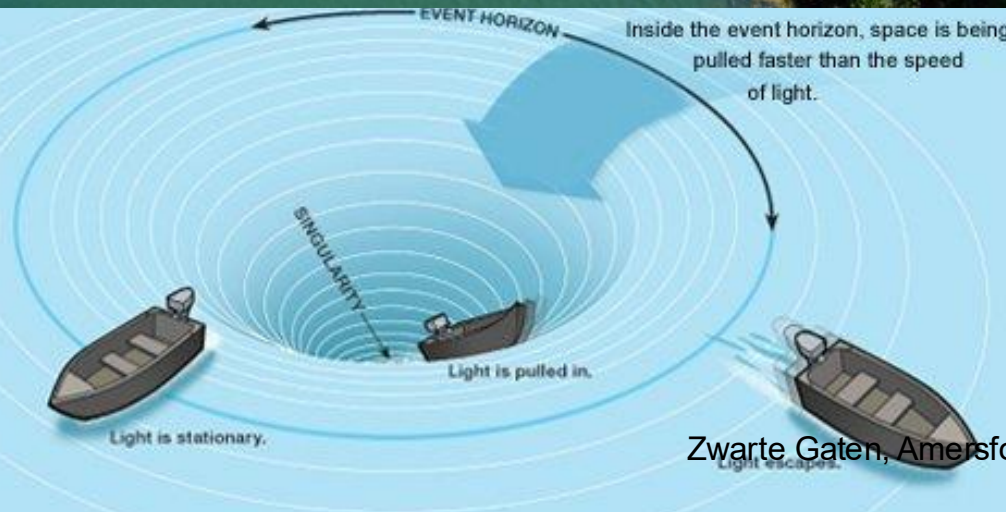
deze vis wel



Waterval-analogie van een zwart gat



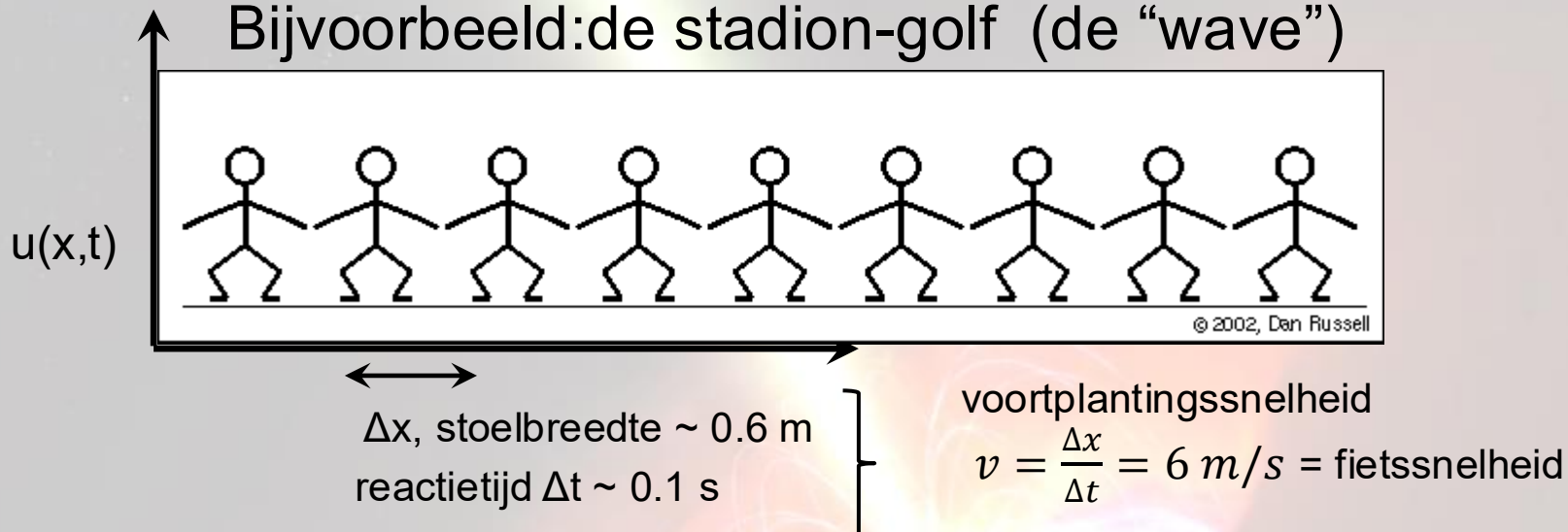
Roterend Zwart Gat



binnen de cirkel
a.h.w.: de "ruimte" gaat sneller
dan de lichtsnelheid

Golfvorming door vertraagde reactie

Bijvoorbeeld: de stadion-golf (de “wave”)



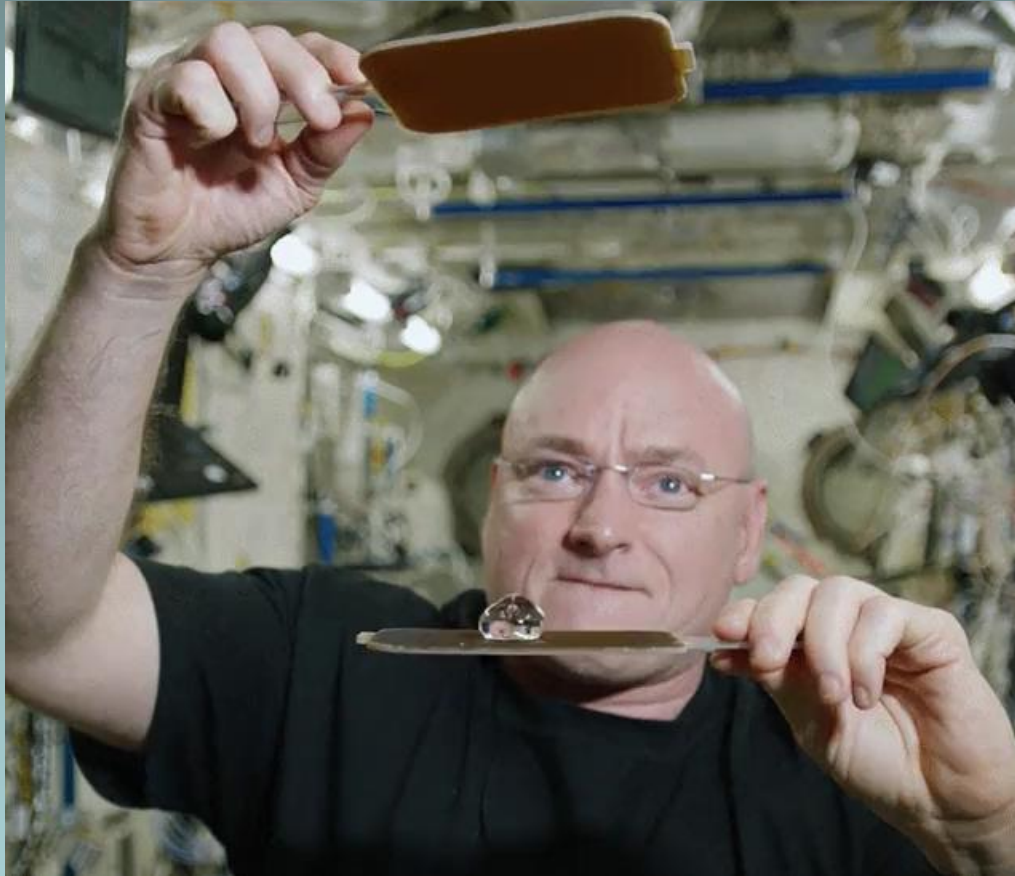
je streeft naar: zelfde doen als de buurman (op $x - \Delta x$) met vertraagde reactie Δt

$$u(x, t) = u(x - \Delta x, t - \Delta t)$$

oplossing bijvoorbeeld: $u(x, t) = A \sin(x - vt)$ met $v = \Delta x / \Delta t = \text{lopende golf}$

Zwaartekrachtsgolven. Poincaré in 1905 als reactie op de Speciale relativiteitstheorie: doordat in de natuur alles vertraagd reageert (beperkt door lichtsnelheid), ook zwaartekracht, moeten er zwaartekrachtsgolven bestaan (nog zonder dat er een theorie is) en moet **Newton onjuist** zijn

Satelliet-baan: ook vrije val



In vrije val geen zwaartekracht

Ping-pong met bolletjes water

unieke ontdekking in 2003:

tweeling Radio Pulsar:

twee neutronensterren in nauwe baan

A

pulseperiode 23 ms

$1.337 \pm 0.005 M_{\text{zon}}$

baanperiode 2.4 uur

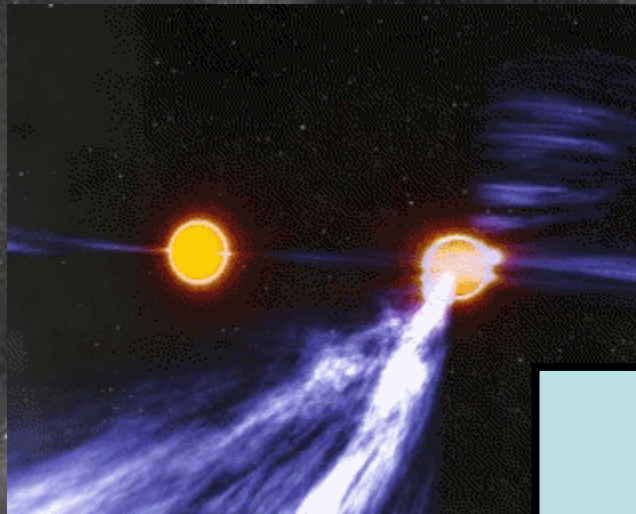
licht eccentrisch

met Aarde ~ in baanvlak

B

pulseperiode 2.8 s

$1.250 \pm 0.005 M_{\text{zon}}$



PSR J 0737-3039 A/B

afstand 20 miljoen km
neutronenster is 10 km:
dus schaalmodel:
twee knikkers op 225 m

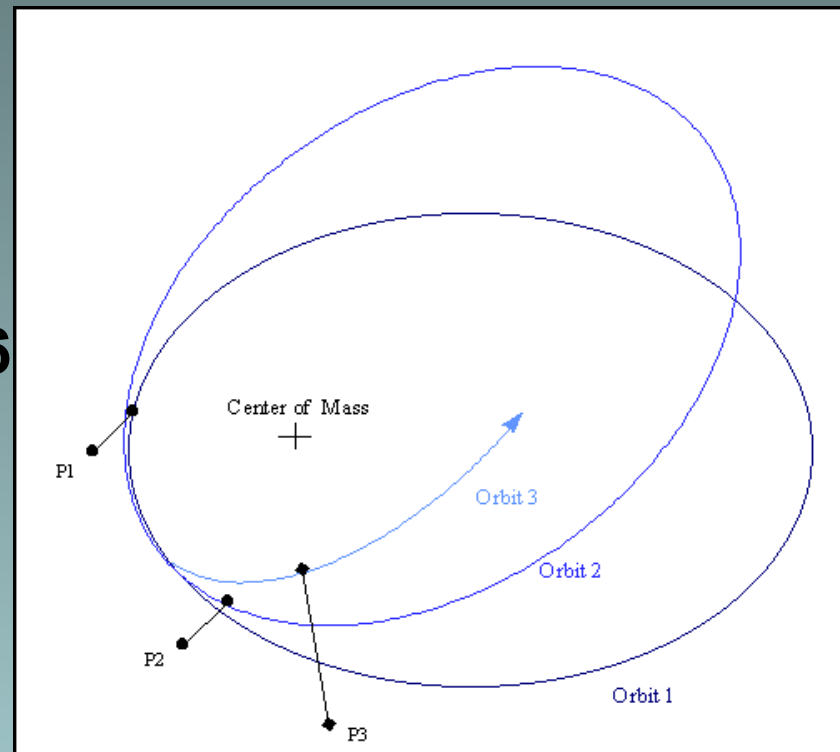
Eigenschappen Zwarte Gat tot nu toe

- gekenmerkt vanaf afstand door een horizon waar ontsnappingsnelheid groter dan de lichtsnelheid (definitie)
- geen informatie te verkrijgen uit gebied binnen de horizon
- kleinste stabiele cirkelbaan
(vlak bij is de zwaartekracht sterker dan de centripetale kracht)
- val naar Zwart Gat voor invallende waarnemer Alice
 - steeds sneller
 - geen lokale bijzonderheden bij de horizon, behalve dat zij nooit meer terug kan komen
- val naar Zwart Gat voor stationaire waarnemer Bob
 - steeds langzamer naderend tot de horizon
 - tijd daar lijkt steeds langzamer te lopen
 - lijkt nooit de horizon te passeren
 - Alice gezien door Bob steeds verder roodverschoven

Nauwe dubbelsterren

Bv de beroemd geworden
Hulse-Taylor pulsar PSR B1913+16

2 compacte neutronensterren
In een baan met periode 7.8 uur



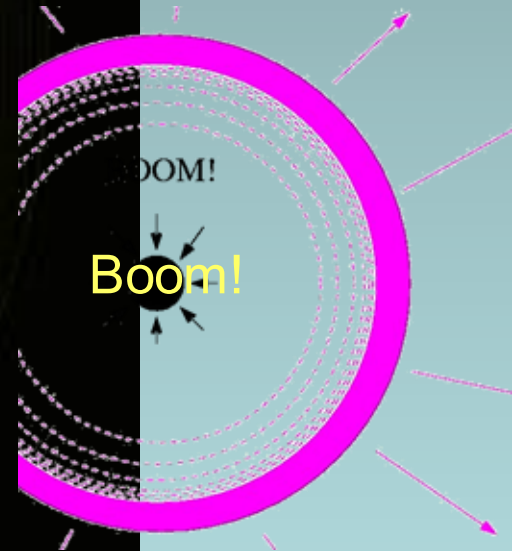
sterren worden steeds compacter

in de loop van hun evolutie

Een ster straalt en verliest dus energie

- de energievoorraad houdt een keer op
- de ster blijft stralen en krimpt

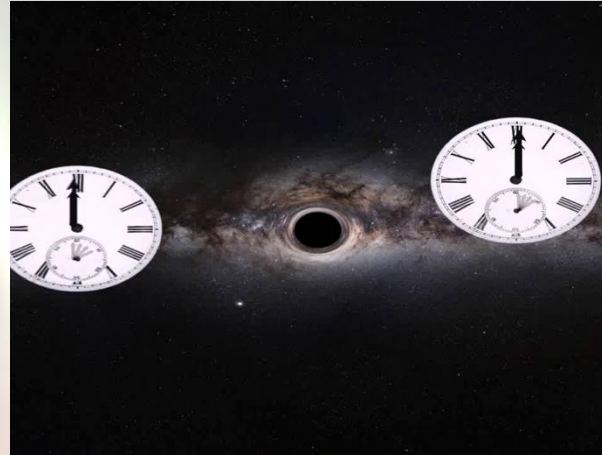
- Laatste fase gaat explosief
- te zware sterren geen tegendruk
- vorming zwart gat.



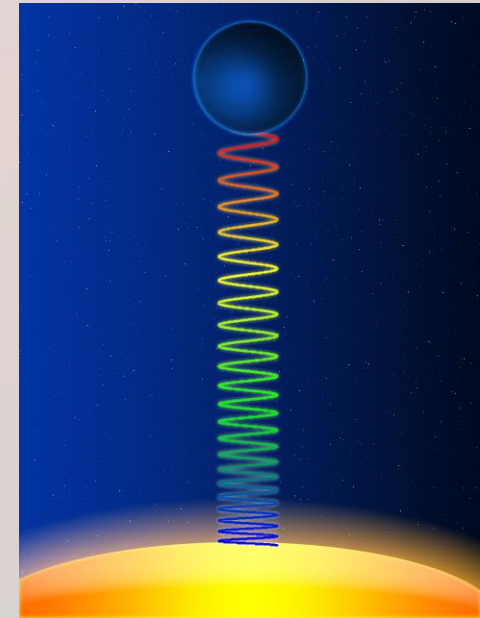
Relativistische effecten

- Klokken tikken langzamer (**gravitatie-tijd-dilatatie**)

horizon: tijd staat stil zoals gezien vanaf een afstand



- golflengte van straling neemt toe (**gravitatie-roodverschuiving**) a.d. horizon is dit oneindig hoog



- afbuiging van licht (**gravitatie-lens-effect**)

Vanaf 1.5x

gravitatiestraal:
cirkelvormige foton-
baan mogelijk
(zie je je eigen
achterhoofd)

