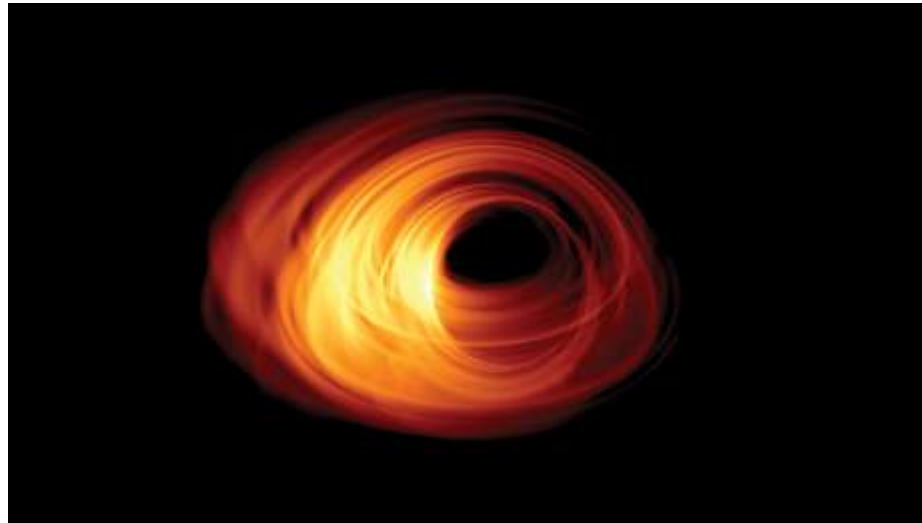


Hoe fotografeer je een zwart gat?



Marcel Vonk (Universiteit van Amsterdam)

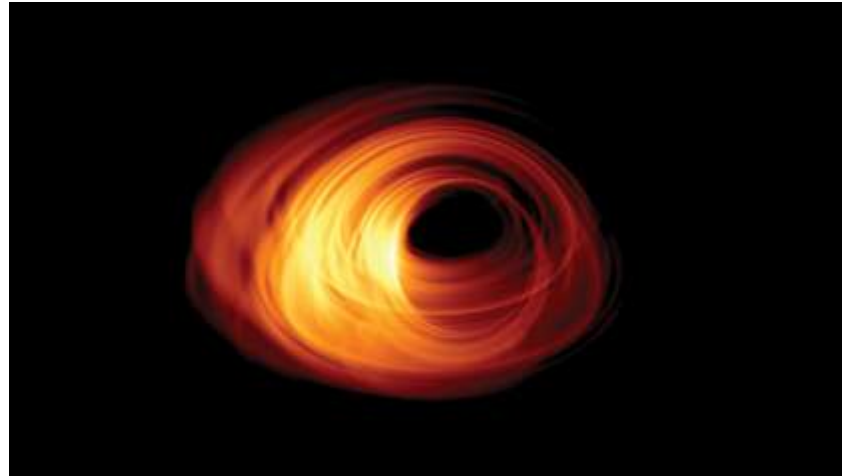
Astrofotografiedag Oss

31 maart 2018

Inhoud

1. Zwaartekracht
2. Zwarte gaten
3. De informatieparadox en verder
4. Zwaartekrachtgolven
5. De Event Horizon Telescope

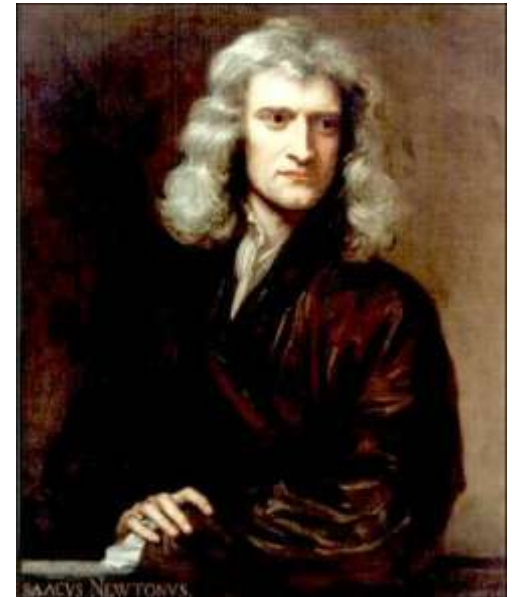




1. Zwaartekracht

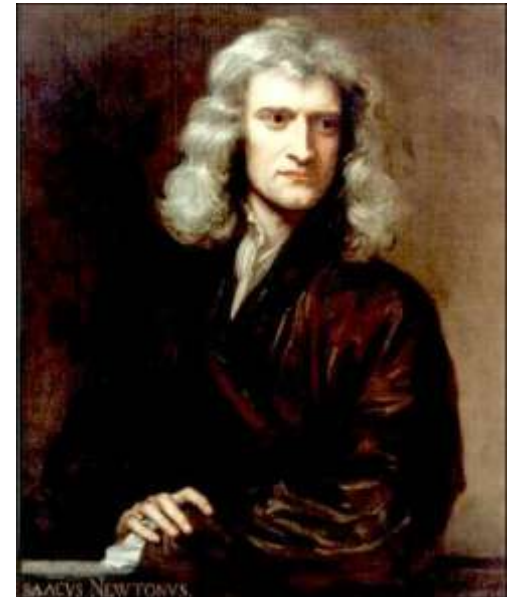
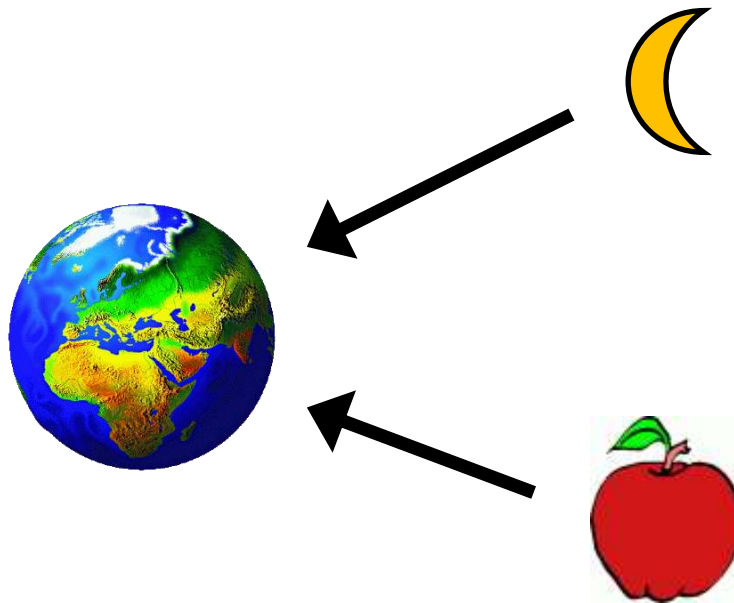
Zwaartekracht

Isaac Newton (1642-1727):



Zwaartekracht

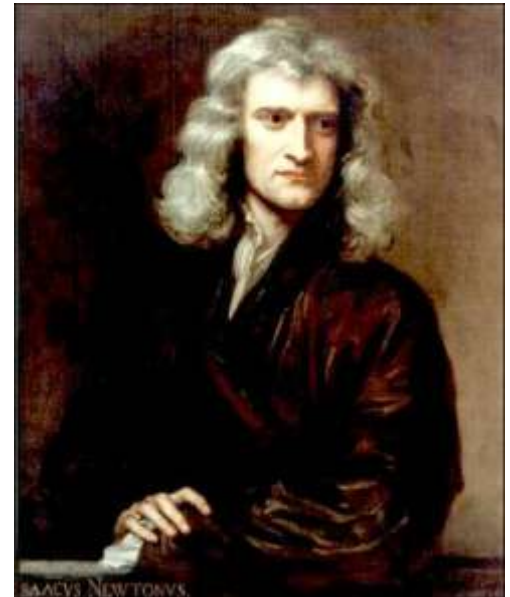
Isaac Newton (1642-1727):



Zwaartekracht

Isaac Newton (1642-1727):

Universele kracht!

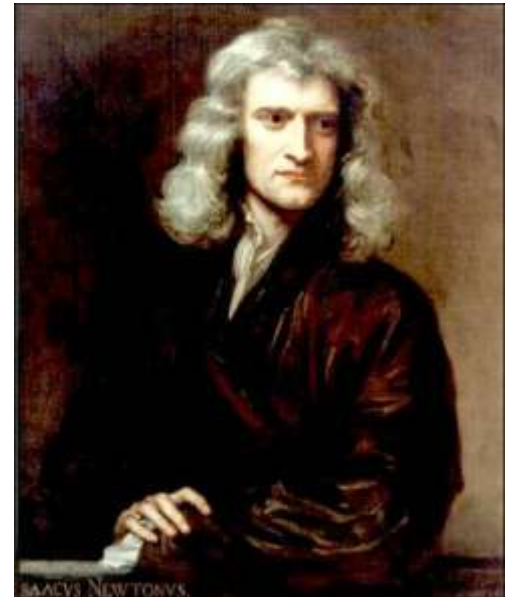


Zwaartekracht

Isaac Newton (1642-1727):

Universele kracht!

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



Zwaartekracht

Zwaarte-
kracht



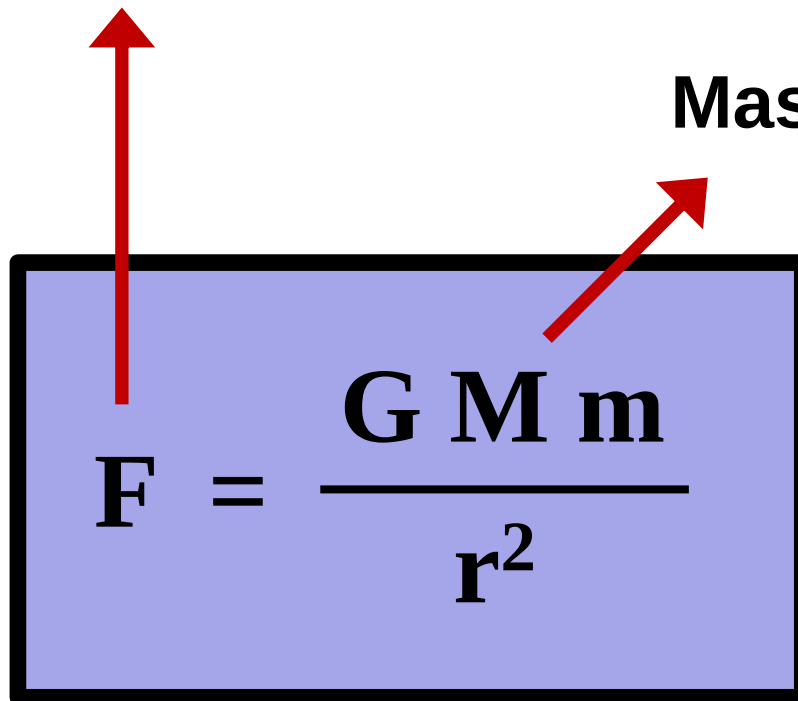
$$F = \frac{G M m}{r^2}$$

Zwaartekracht

Zwaarte-
kracht

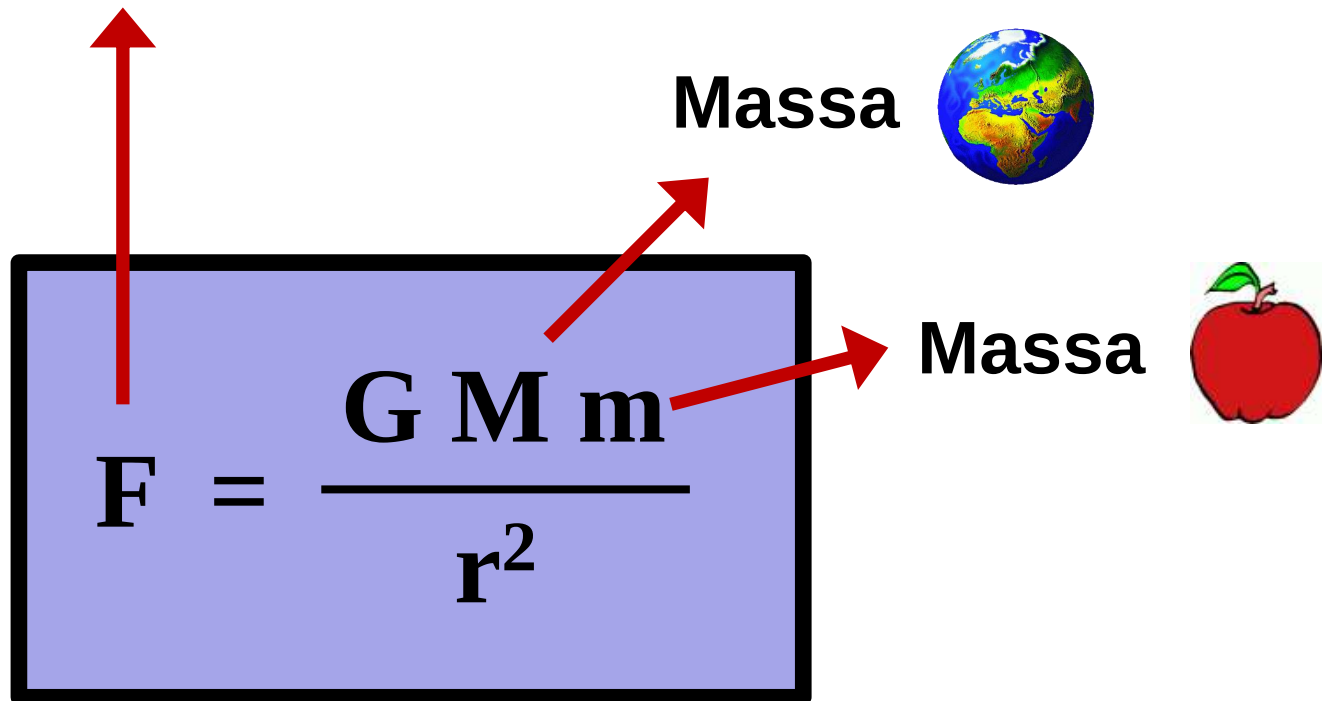
Massa




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

Zwaartekracht

Zwaarte-
kracht



Massa 

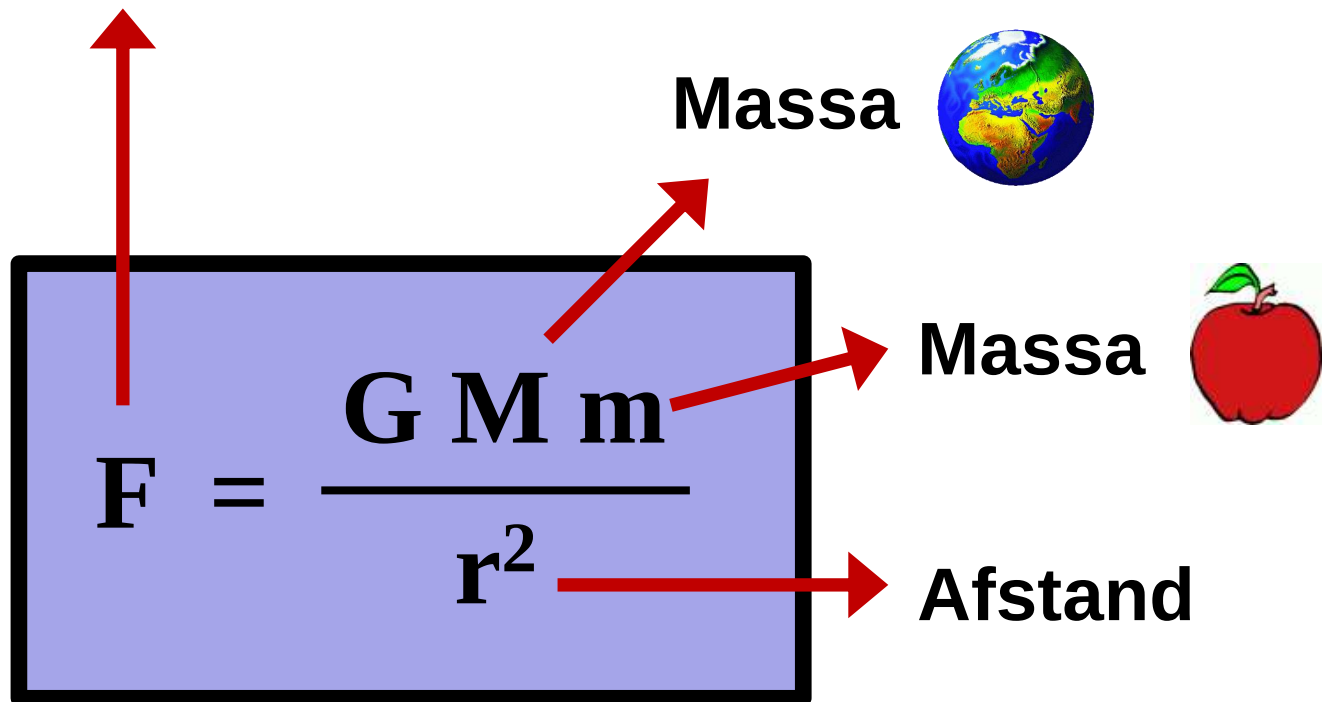
Massa 

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

The diagram illustrates the variables in Newton's law of universal gravitation. A red arrow points from the 'F' in the formula to the text 'Zwaarte-kracht'. Another red arrow points from the 'M' to the text 'Massa' next to a globe icon. A third red arrow points from the 'm' to the text 'Massa' next to an apple icon. The formula is enclosed in a light blue rectangular box with a black border.

Zwaartekracht

Zwaarte-
kracht



Massa 

Massa 

Afstand

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

Zwaartekracht

Zwaarte-
kracht

Constante van Newton
($6,67385 \times 10^{-11}$)

Massa



Massa



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

Afstand

Zwaartekracht

Belangrijk voor ons verhaal: zwaartekracht wordt groter als

- 1) De aantrekkende **massa** groter wordt,
- 2) De **afstand** tot die massa kleiner wordt

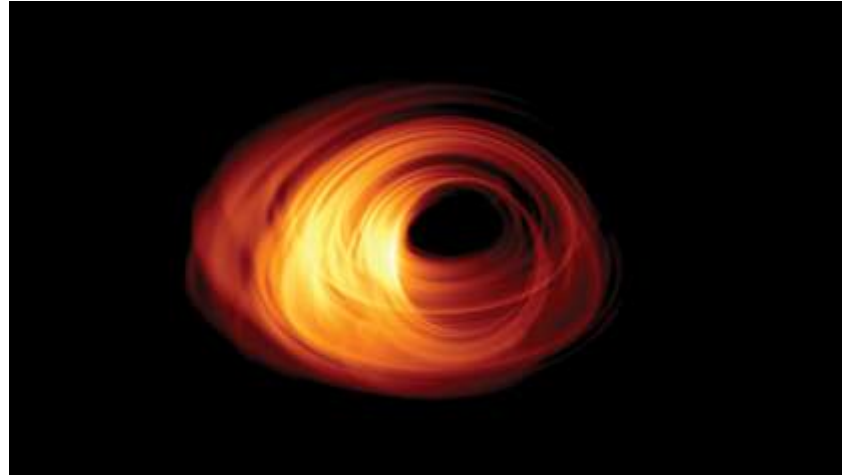
$$F = \frac{G \mathbf{M} m}{r^2}$$

Zwaartekracht

Een hemellichaam heeft dus een heel sterke zwaartekracht als het

- 1) Heel **zwaar** is, en/of
- 2) Heel **klein** is.





2. Zwarte Gaten

Zwarte gaten

Ole Rømer (1644-1710) toonde in 1676 als eerste aan dat licht niet oneindig snel beweegt.



Zwarte gaten

Ole Rømer (1644-1710) toonde in 1676 als eerste aan dat licht niet oneindig snel beweegt.

220.000 km/s



Zwarte gaten

Ole Rømer (1644-1710) toonde in 1676 als eerste aan dat licht niet oneindig snel beweegt.

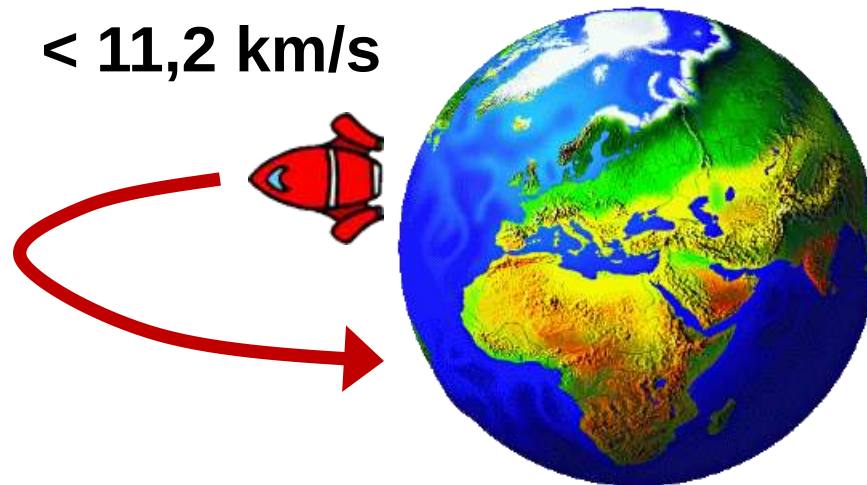
~~220.000 km/s~~

300.000 km/s



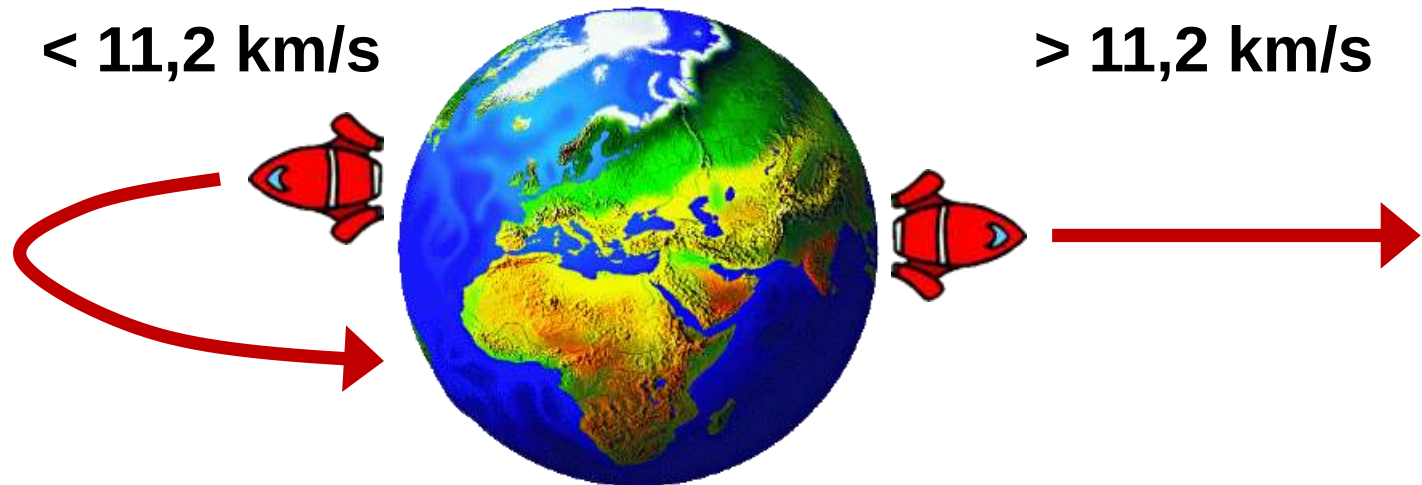
Zwarte gaten

Sterren en planeten hebben een
ontsnappingsnelheid:



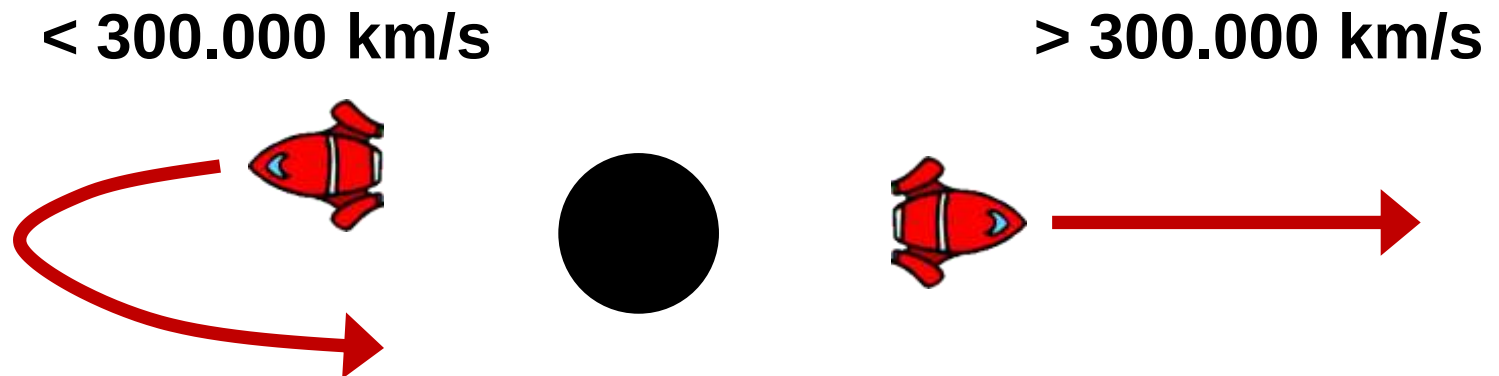
Zwarte gaten

Sterren en planeten hebben een
ontsnappingsnelheid:



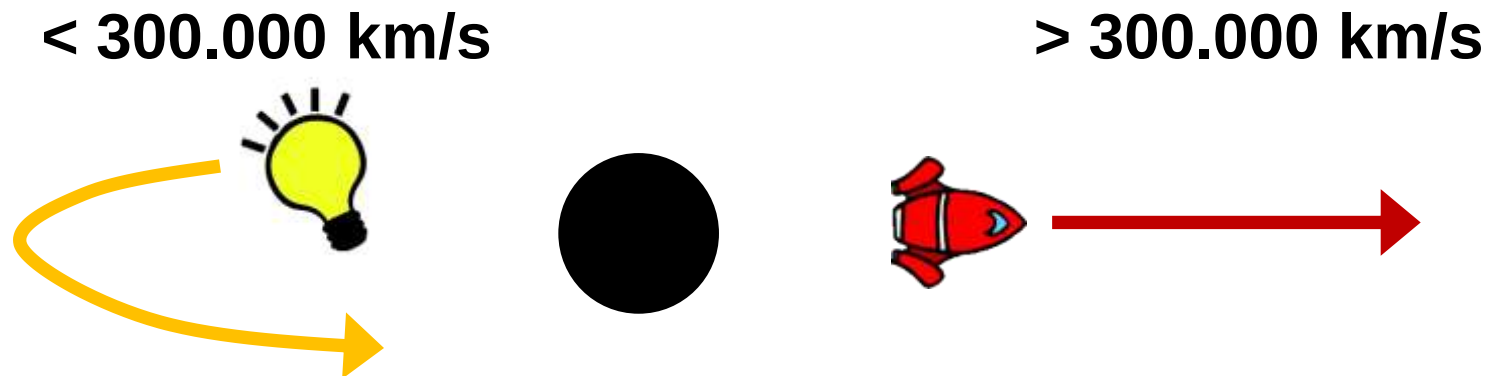
Zwarte gaten

Kunnen we een object maken dat zo **klein** en **zwaar** is dat licht niet kan ontsnappen?



Zwarte gaten

Kunnen we een object maken dat zo **klein** en **zwaar** is dat licht niet kan ontsnappen?



Zwarte gaten

Het idee van zo'n "zwarte ster" werd al in 1783 door John Michell geopperd, en in 1796 door Pierre-Simon Laplace uitgewerkt.



Zwarte gaten

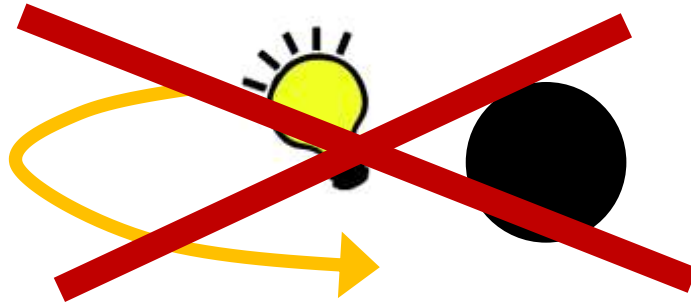
Maar... heeft licht wel een massa?

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



Zwarte gaten

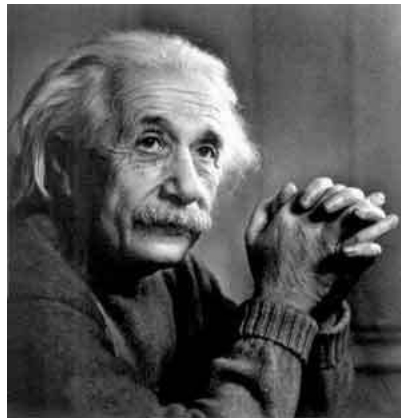
Laplace verwijderde zijn idee voor de zekerheid uit de latere drukken van zijn boek.



Zwarte gaten

Pas in 1905 ontdekte Albert Einstein twee cruciale dingen:

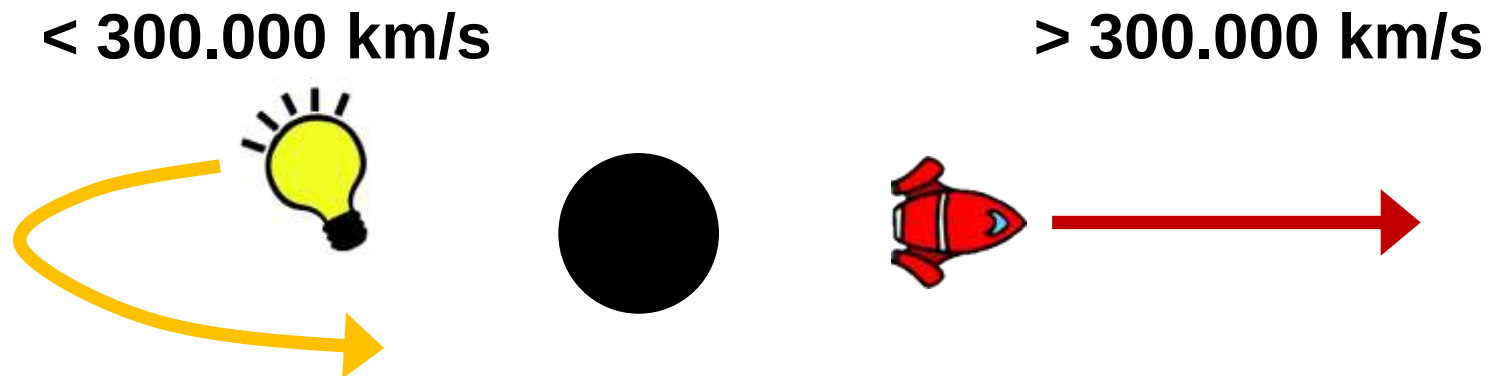
- 1) Licht heeft wel degelijk een “massa”,
- 2) Niets beweegt sneller dan het licht!



$$E = mc^2$$

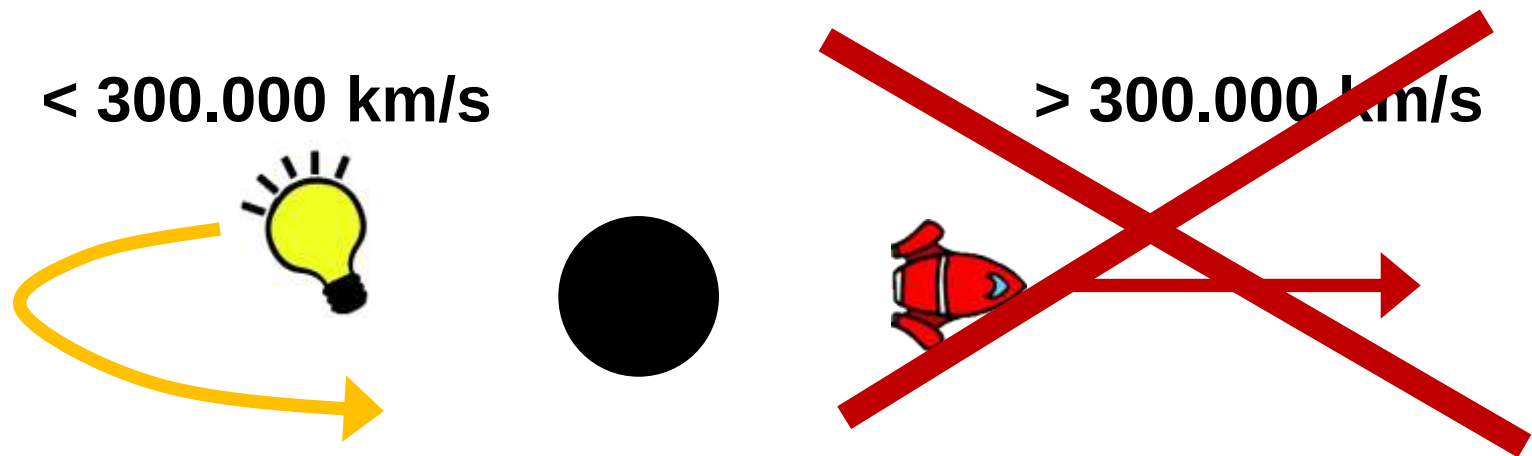
Zwarte gaten

Zwarte gaten kunnen dus niet alleen bestaan...



Zwarte gaten

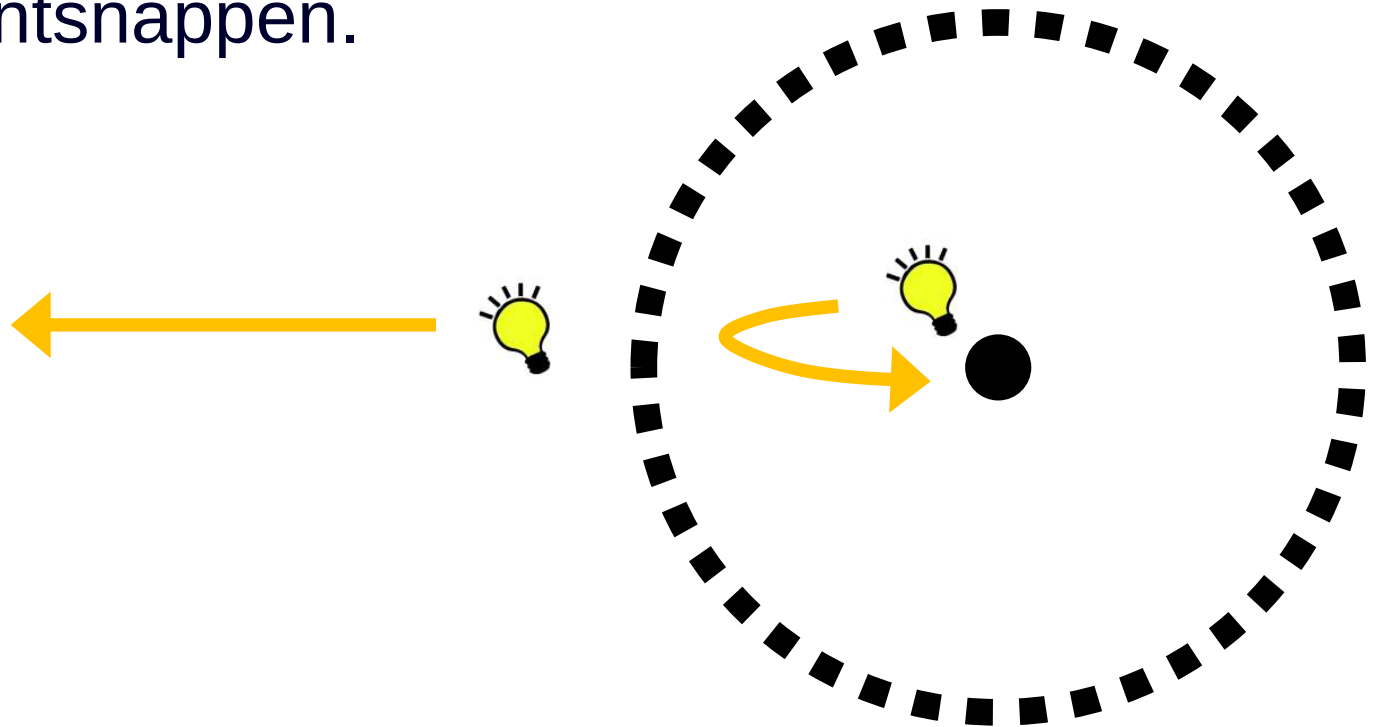
Zwarte gaten kunnen dus niet alleen bestaan...



...er kan ook helemaal **niets** aan ontsnappen!

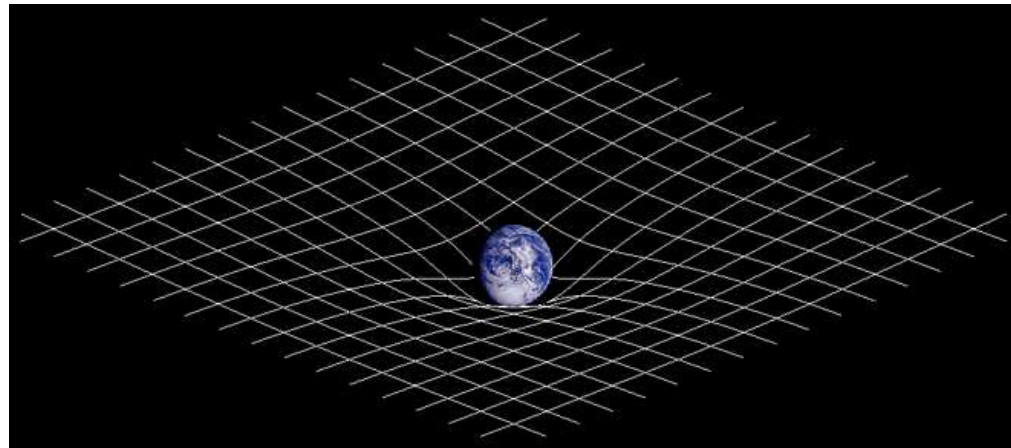
Zwarte gaten

Iets preciezer: elk zwart gat heeft een **horizon**, van waarachter niets kan ontsnappen.



Zwarte gaten

Aan de hand van Einsteins relativiteitstheorie verfijnde Karl Schwarzschild het begrip van een **zwart gat** en een **horizon** nog iets verder.



Zwarte gaten

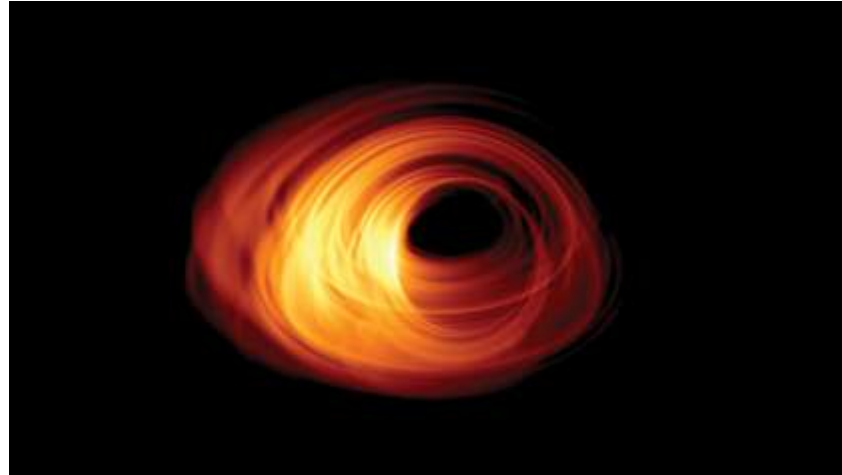
Een zwart gat is een soort stofzuiger, die de ruimte heel snel naar binnen zuigt.



Zwarte gaten

Op een gegeven moment kun je daar niet meer tegenop rennen, zelfs niet als je met de lichtsnelheid beweegt.

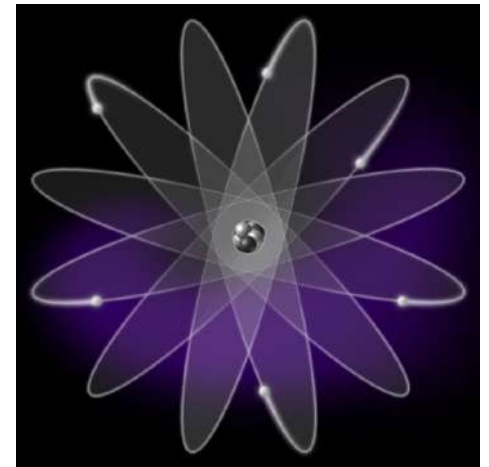
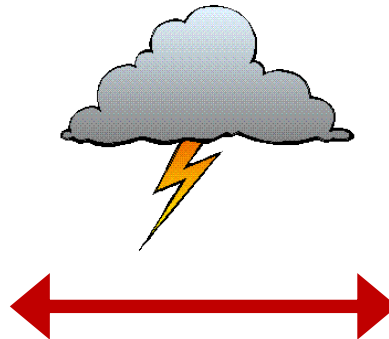
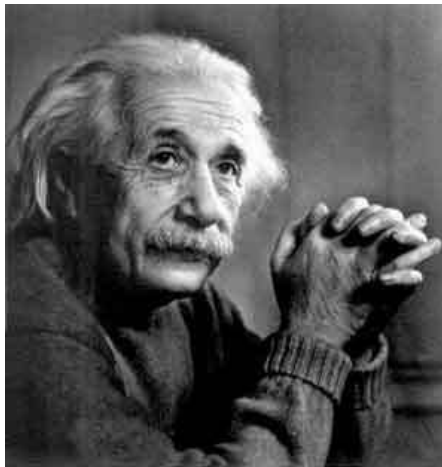




3. De informatieparadox en verder

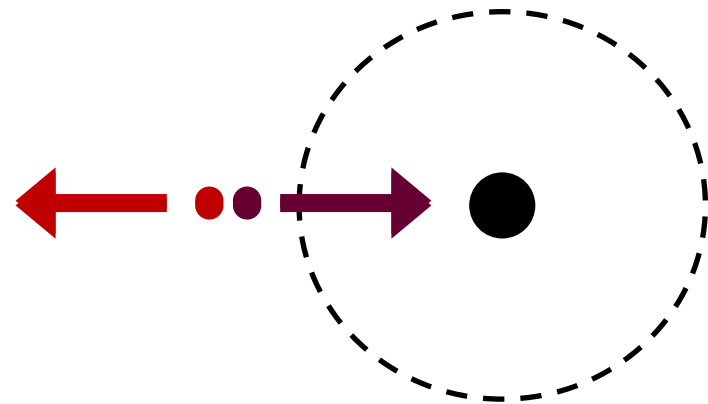
De informatieparadox

Zwarte gaten leiden tot een beroemde paradox als we proberen Einsteins beeld te combineren met de **quantummechanica**.



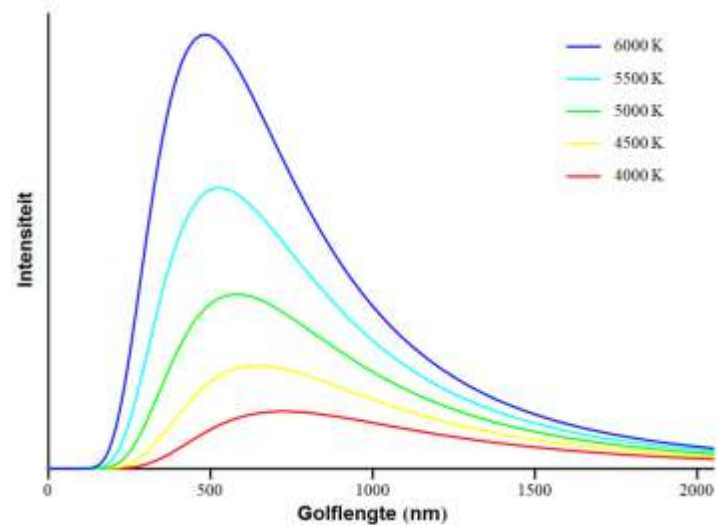
De informatieparadox

In 1974 toonde Stephen Hawking aan dat zwarte gaten toch straling kunnen uitzenden.



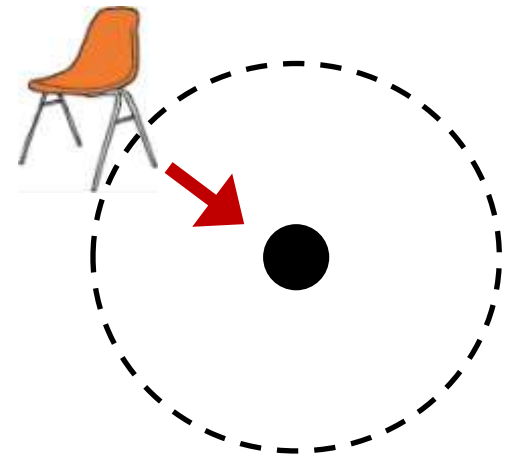
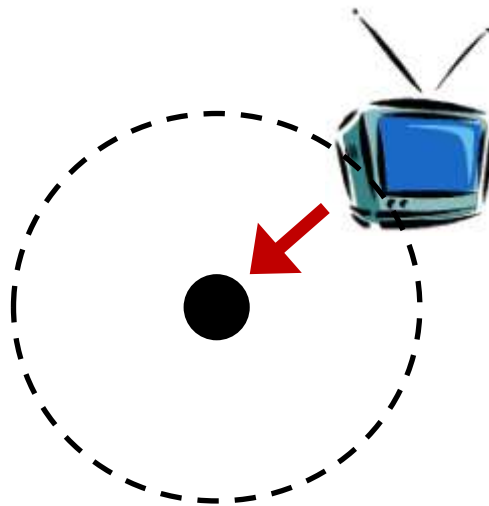
De informatieparadox

Deze straling ontstaat door random-effecten, en is daardoor **thermisch**.



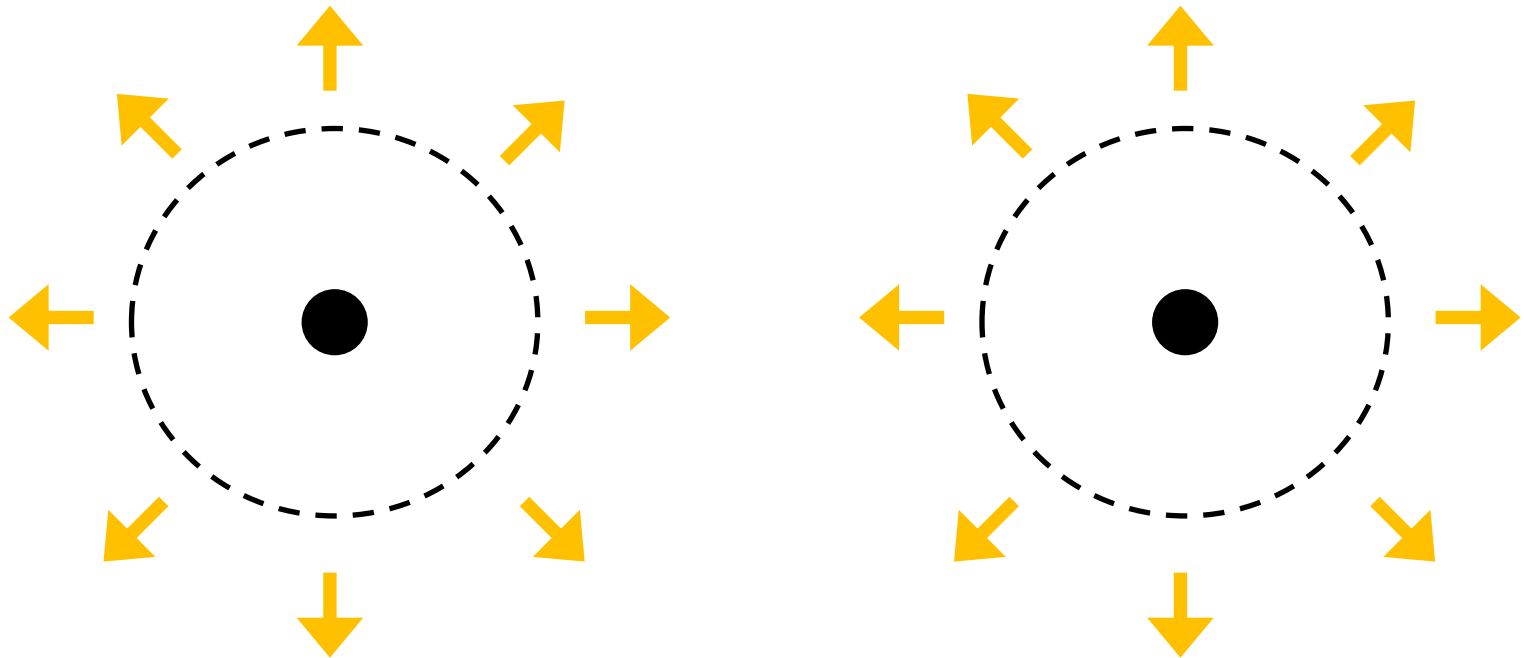
De informatieparadox

Als een zwart gat ontstaat en weer verdampt lijkt er dus **informatie** verloren te gaan.



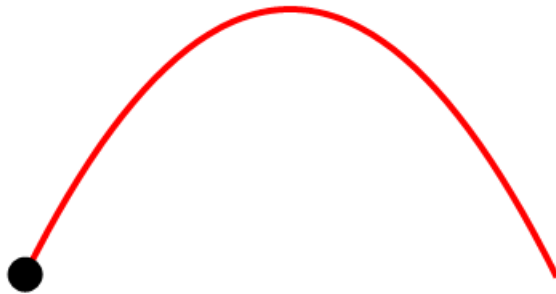
De informatieparadox

Als een zwart gat ontstaat en weer verdampt lijkt er dus **informatie** verloren te gaan.

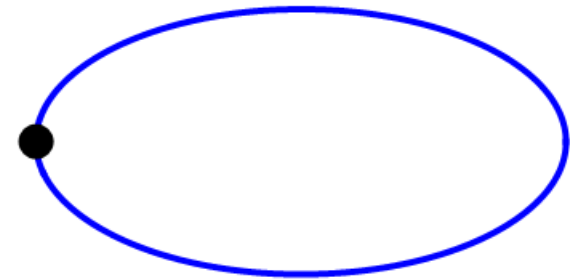


De informatieparadox

We zijn in de natuurkunde gewend dat we niet alleen vooruit kunnen rekenen...



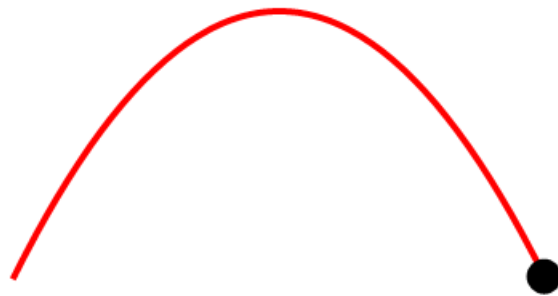
(a)



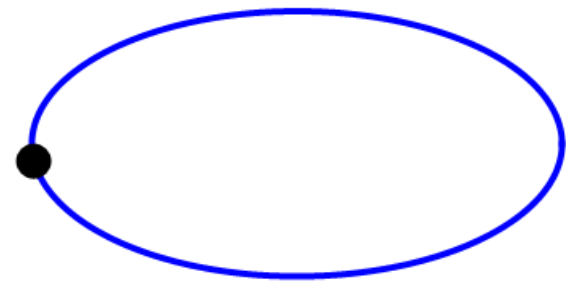
(b)

De informatieparadox

...maar ook achteruit.



(a)



(b)

De informatieparadox

Ook in de **quantummechanica** is dit een fundamenteel principe.

Hoe kunnen we voor zwarte gaten uit allerlei verschillende begintoestanden dan precies dezelfde eindtoestand krijgen?



Informatieparadox!

De informatieparadox

Drie mogelijkheden:

- 1) Informatie gaat **verloren**
- 2) De **straling** bevat toch informatie
- 3) Informatie blijft achter (“**remnants**”)

Hawking zette zijn geld op optie 1...



De informatieparadox

...maar gaf de weddenschap in 2004 op.



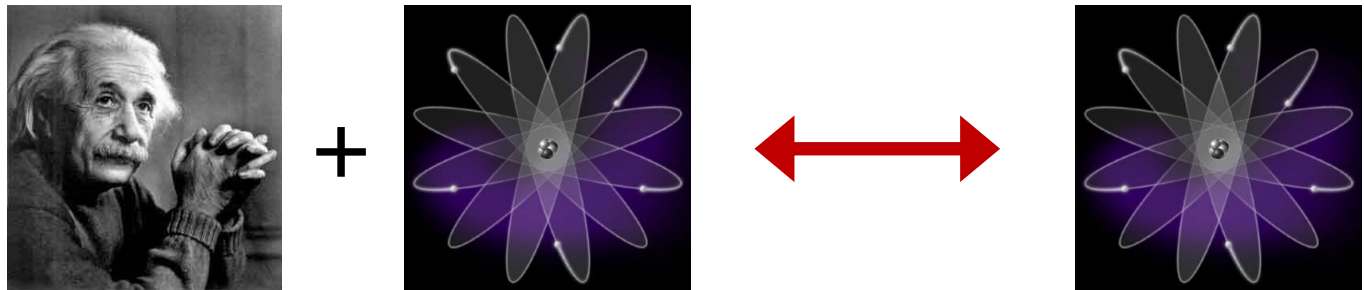
De informatieparadox

In 1998 verscheen er een baanbrekend artikel van de Argentijn Juan Maldacena.



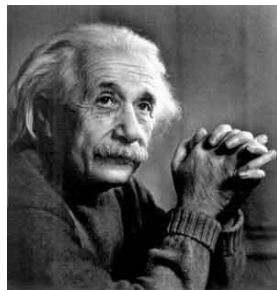
De informatieparadox

Maldacena liet zien dat er een **dualiteit** bestaat tussen zwaartekrachtstheorieën en theorieën zonder zwaartekracht.

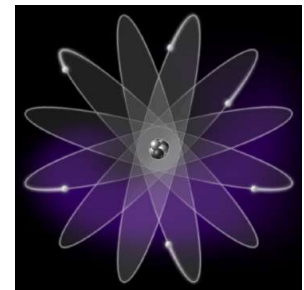
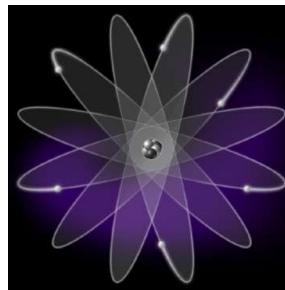


De informatieparadox

Maldacena liet zien dat er een **dualiteit** bestaat tussen zwaartekrachtstheorieën en theorieën zonder zwaartekracht.



+

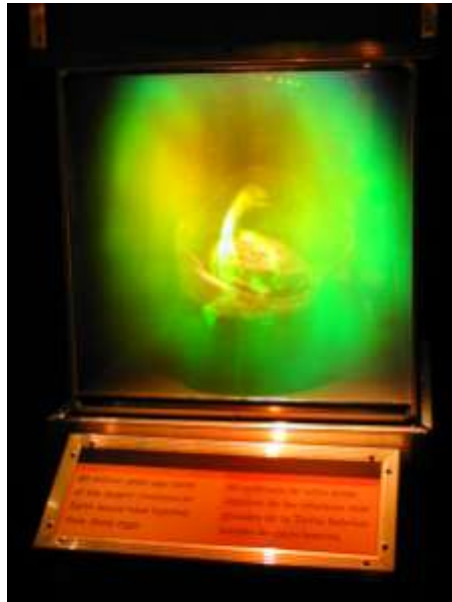


3 dimensies

2 dimensies

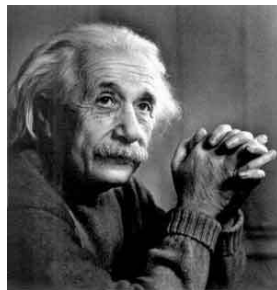
De informatieparadox

Deze dualiteit staat zoals gezegd bekend onder de naam **holografie**.

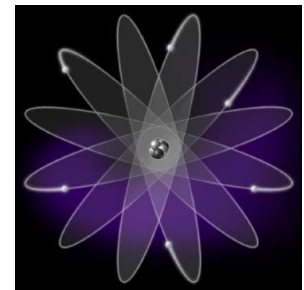
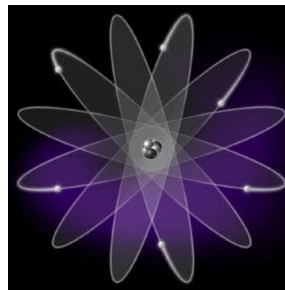


De informatieparadox

De duale theorie wordt beschreven met gewone quantummechanica – er gaat dus **geen** informatie verloren.



+



3 dimensies

2 dimensies

De informatieparadox

In 2004 was het idee van Maldacena voldoende gecontroleerd, en gaf Hawking de weddenschap op.



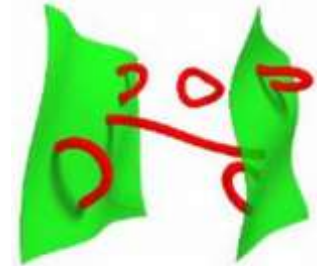
Maar **hoe** het zwarte gat informatie vernietigt is nog altijd een open vraag!

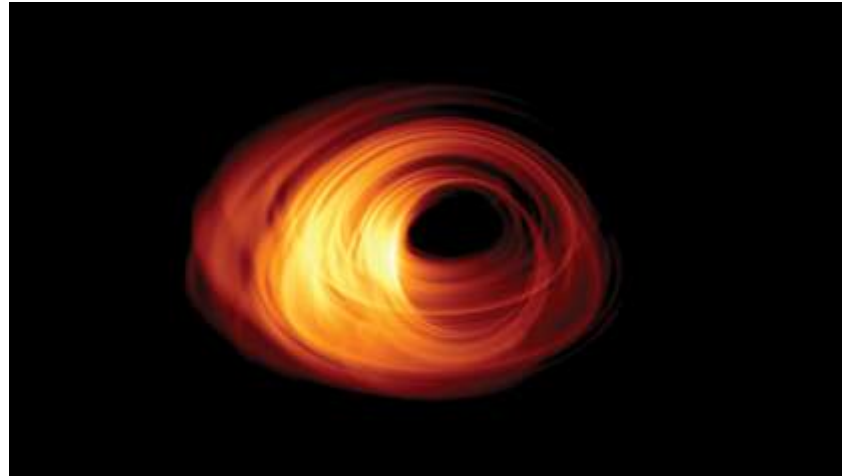
De informatieparadox

De snaartheorie opende mogelijkheden om zwarte gaten beter te bestuderen.

- Toestanden tellen
- Firewalls
- Fuzzballs

...en nog veel meer!





4. Zwaartekrachtgolven

Zwarte gaten in de praktijk

Hoe doe je een meting of waarneming aan een zwart gat?

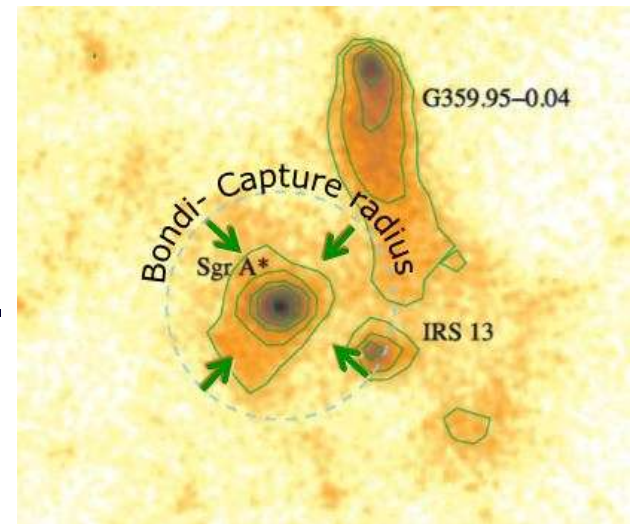


Lastig: ze zijn immers **zwart**!

Zwarte gaten in de praktijk

Idee 1: Bestudeer de **omgeving** van een zwart gat.

Dit gebeurt bijvoorbeeld met de Event Horizon Telescope (straks meer).



Nadeel: erg lastig om zo **quantumeffecten** te meten.

Zwarte gaten in de praktijk

Idee 2: Maak zelf **microscopische** zwarte gaten in een deeltjesversneller.



Nadeel 1: Enorme energieën nodig.

Nadeel 2: Gevaarlijk?

Zwarte gaten in de praktijk

Idee 2: Maak zelf **microscopische** zwarte gaten in een deeltjesversneller.

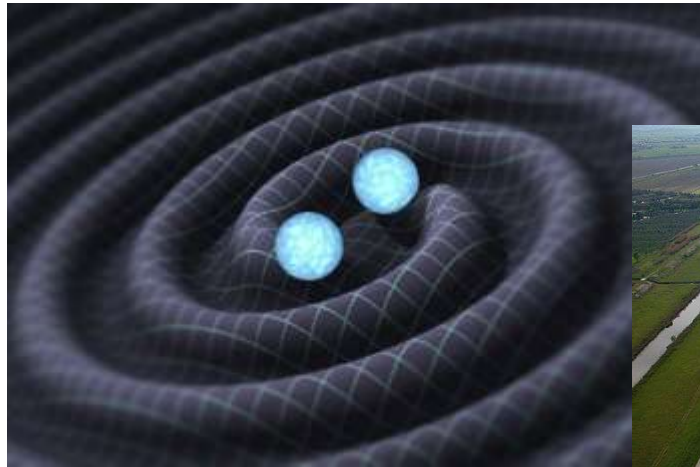


Nadeel 1: Enorme energieën nodig.

~~**Nadeel 2:**~~ Gevaarlijk? **Niet echt.**

Zwarte gaten in de praktijk

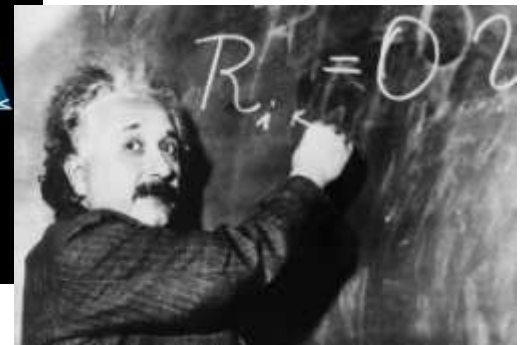
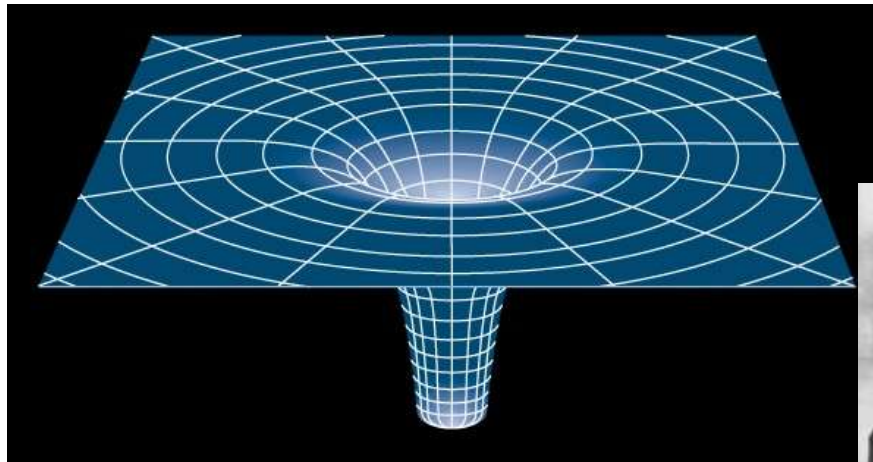
Idee 3: Zwaartekrachtgolven.



De eerste metingen zijn inmiddels gedaan. Nog beslist geen quantum-tests, maar ook niet geheel uitgesloten.

Zwaartekrachtgolven

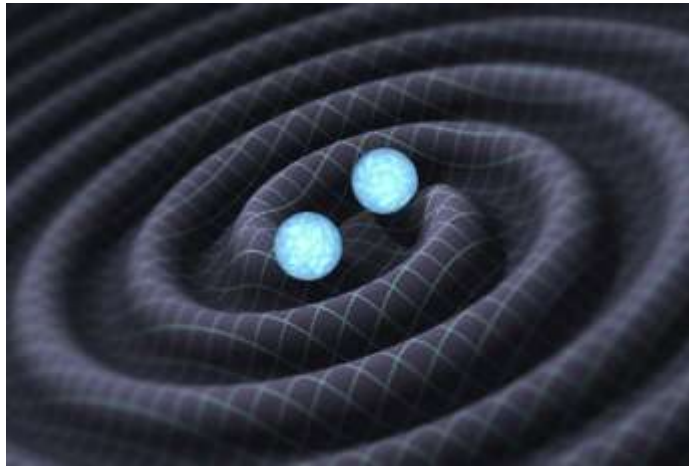
Zwarte gaten hebben het sterkste **zwaartekrachtsveld** dat er kan bestaan.



Maar hoe meet je dat op grote afstand?

Zwaartekrachtgolven

De truc: meet **variaties** in het zwaartekrachtsveld.

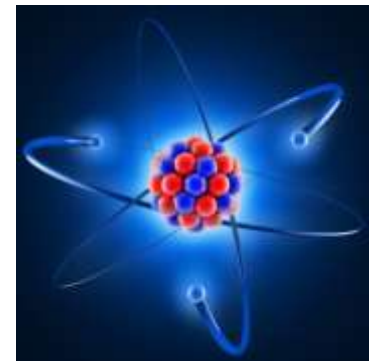


Einstein liet zien dat ook de ruimtetijd kan **golven**.

Nog steeds niet eenvoudig: als zulke golven de aarde bereiken, hebben ze relatieve vervormingen van ongeveer

0,00000000000000000000000001%

tot gevolg.



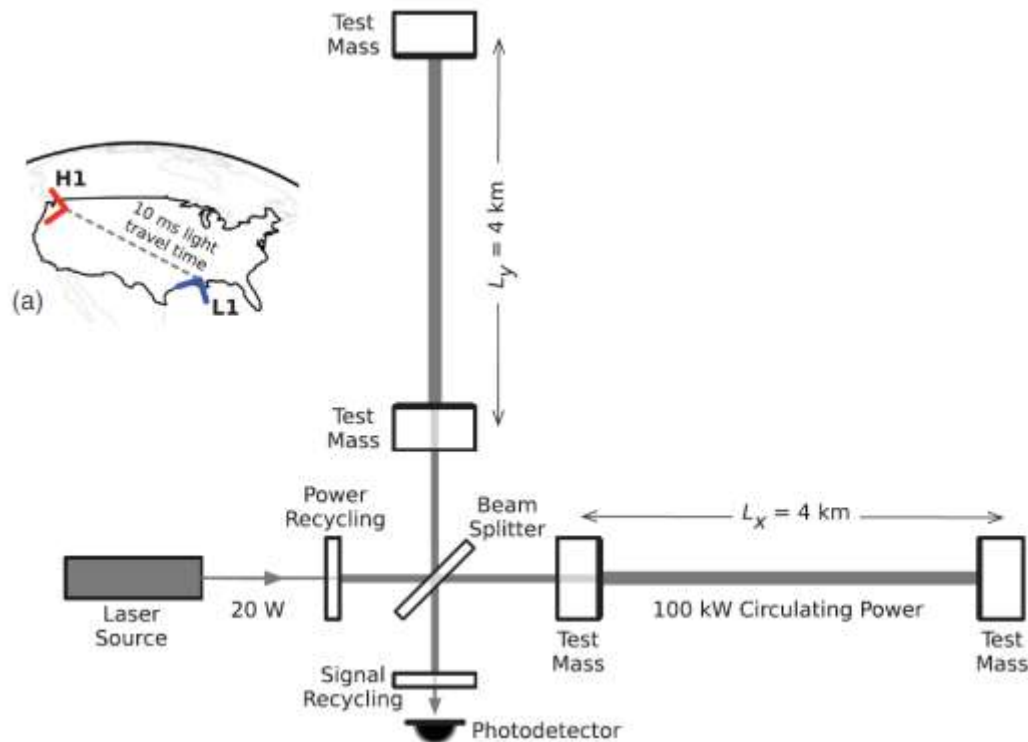
Zwaartekrachtgolven

Om dergelijke minuscule vervormingen te meten, maken onderzoekers gebruik van **interferentie**.



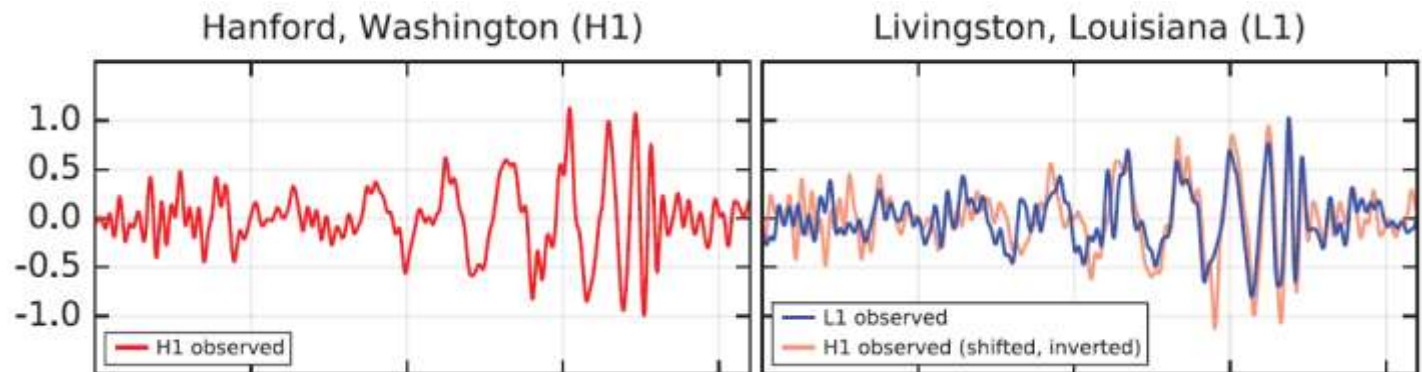
Zwaartekrachtgolven

LIGO: twee interferometers, 3000 kilometer van elkaar.



Zwaartekrachtgolven

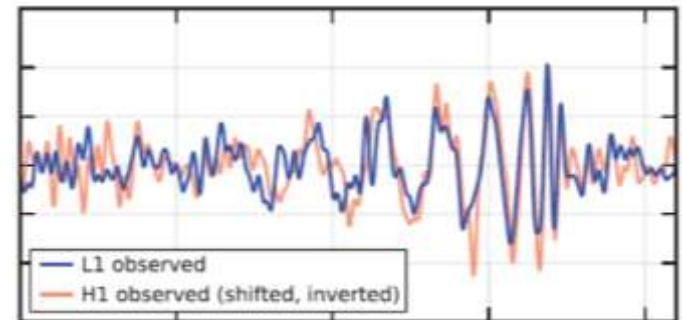
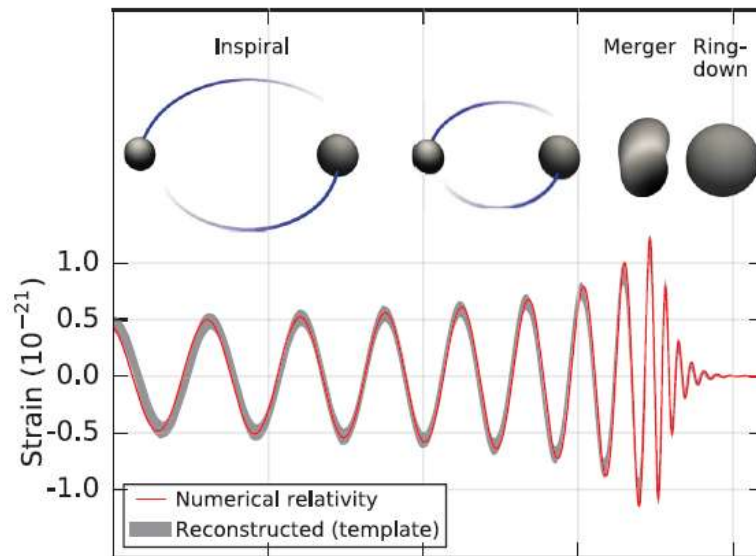
September 2015: eerste waarneming van de samensmelting van twee zwarte gaten!



Februari 2016: bekendmaking.

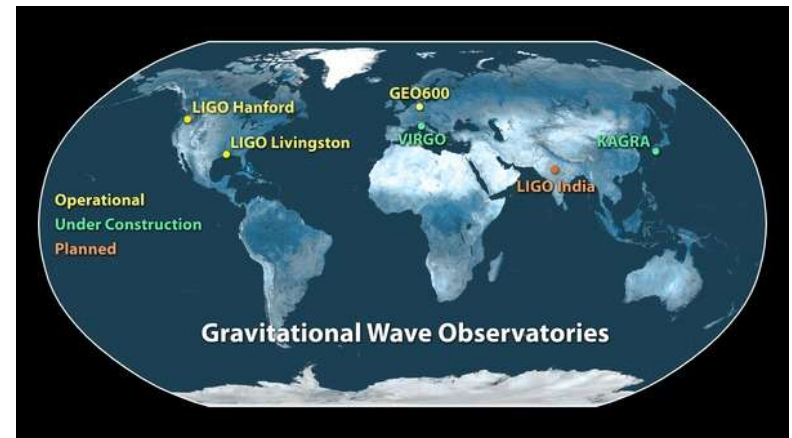
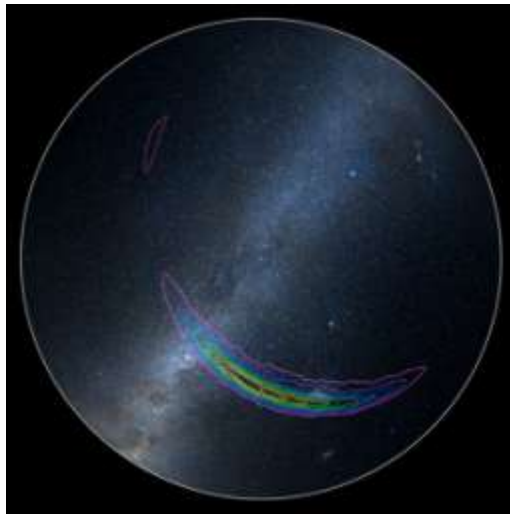
Zwaartekrachtgolven

De waarnemingen komen prachtig overeen met wat we verwachten!



Zwaartekrachtgolven

We kunnen bovendien grofweg meten waar de samensmelting heeft plaatsgevonden.



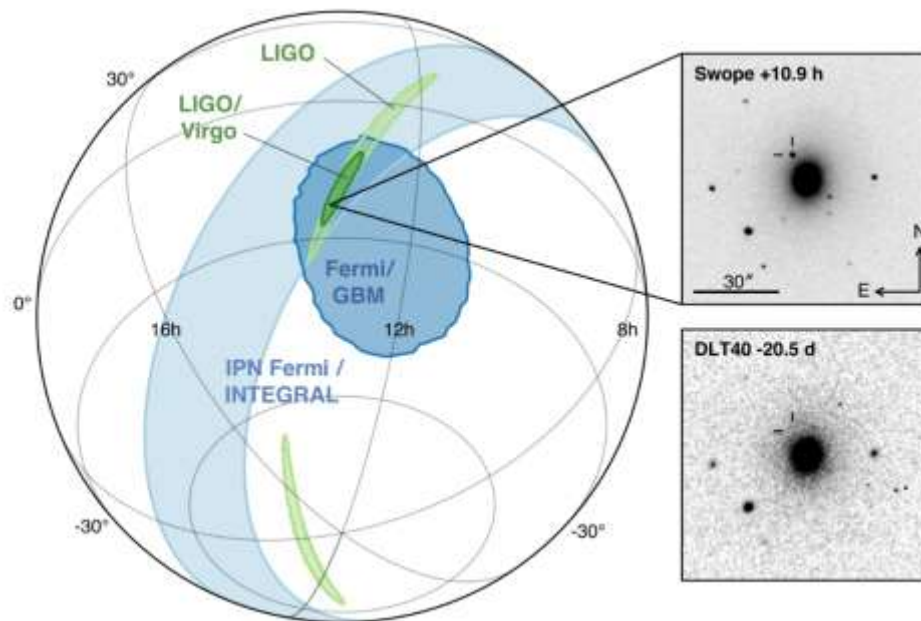
Zwaartekrachtgolven

Inmiddels is ook een derde, Europese detector operatief: Virgo.



Zwaartekrachtgolven

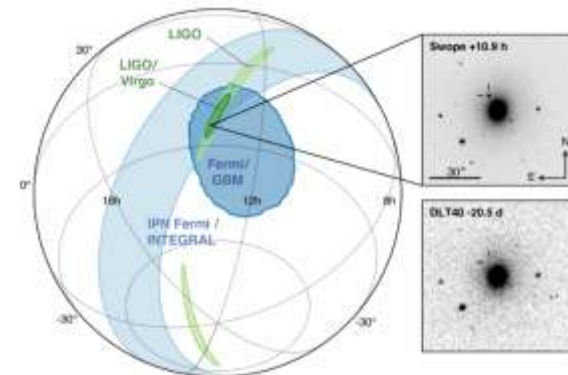
De eerste waarneming in zwaartekrachtgolven én gewoon licht is een feit!



Zwaartekrachtgolven

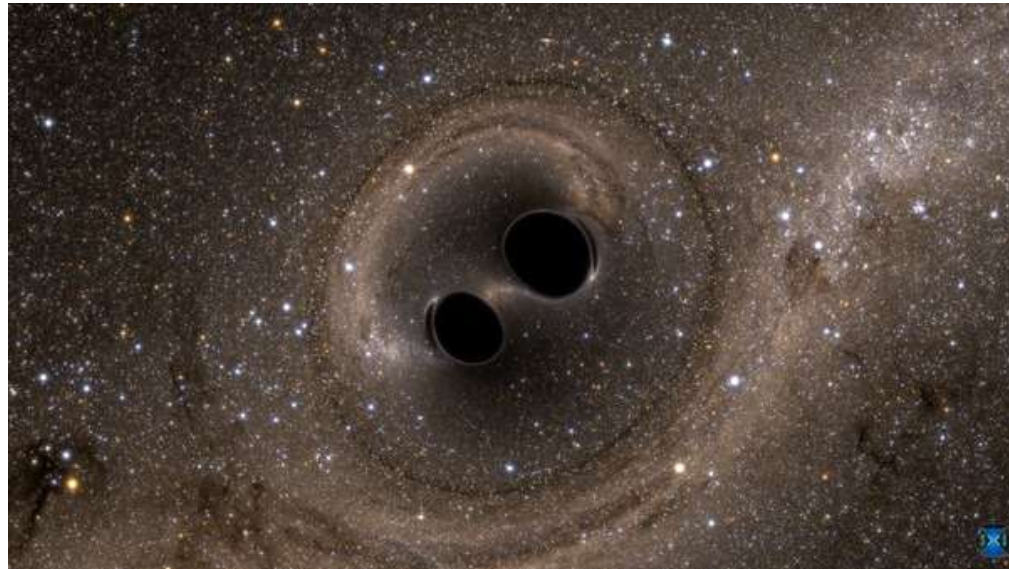
17 augustus 2017:

- 12:41:04 UTC: zwaartekrachtgolf
- 12:41:06 UTC: gamma ray burst
- +10:52 uur: Kilonova in NGC4993
- +11:36 uur: Infraroodstraling
- +15:00 uur: UV-straling
- +9 dagen: röntgenstraling
- +16 dagen: radiostraling

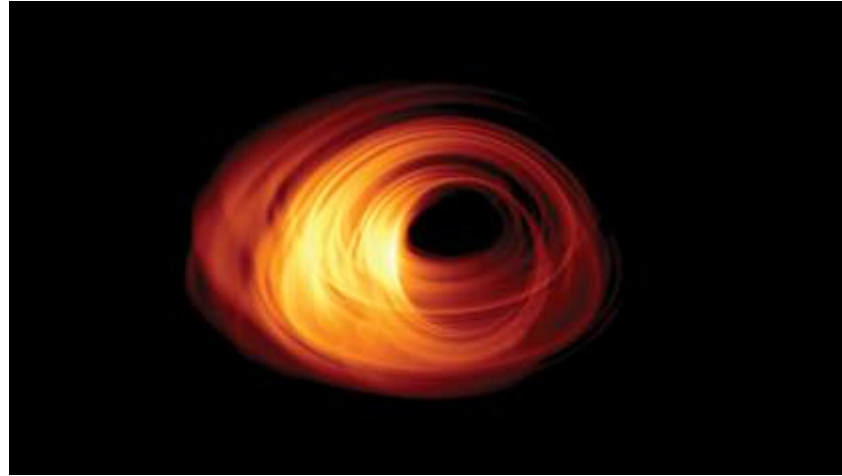


Zwaartekrachtgolven

Kunnen we hiermee ook **quantumeffecten** rond zwarte gaten meten?



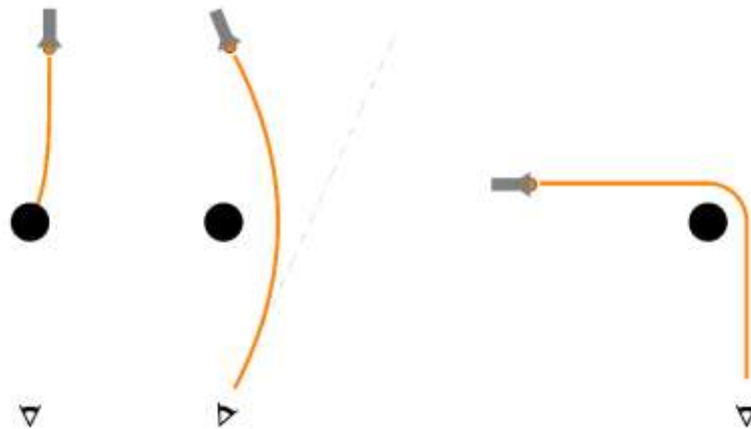
Nog niet, maar wie weet!



5. De Event Horizon Telescope

Event Horizon Telescope

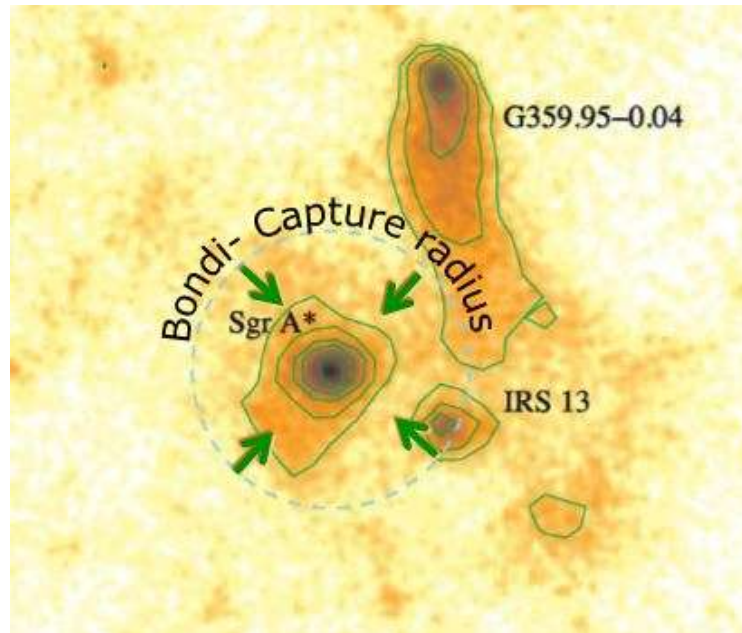
Kunnen we de horizon van een zwart gat fotograferen?



Bijna: de **schaduw** van de horizon is ongeveer 5 maal zo groot.

Event Horizon Telescope

Wat is het **grootste** zwarte gat aan de hemel?



Event Horizon Telescope

De **resolutie** van een telescoop wordt bepaald door de **doorsnede** van de spiegel, niet de brandpuntafstand!



Event Horizon Telescope

Hoe groot moet een spiegel zijn om een zwart gat te kunnen zien?



Event Horizon Telescope

Maar: het maakt niet uit of er gaten in de telescoop zitten!

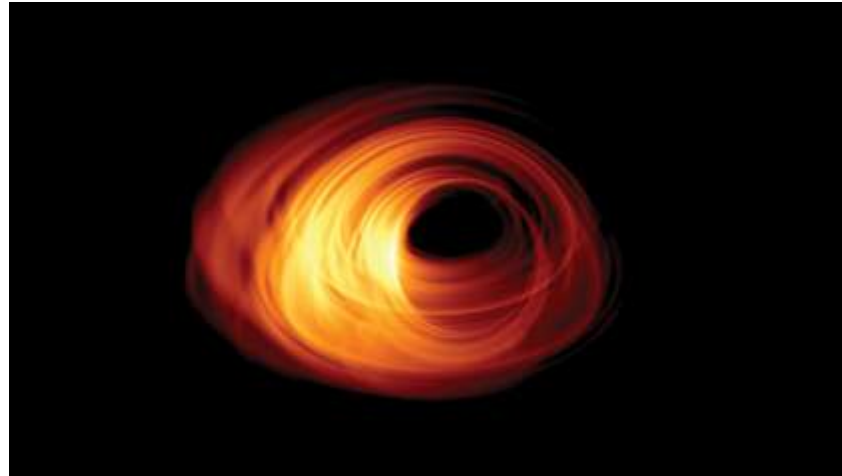


VLBA: “Meer gat dan telescoop”.

Event Horizon Telescope

De eerste data zijn binnen, maar moeten nog verwerkt worden. Stay tuned!





Conclusie

Conclusie

Het zijn spannende tijden, waarin theorie en waarnemingen rond zwarte gaten steeds dichterbij elkaar komen!



Meer weten?



www.quantumuniverse.nl

Meer weten?



Zwarte Gaten

Gevangen in ruimte en tijd

(€39,99)