

Reis naar het binnenste van een Zwart Gat cursus Zwarte Gat

Dubbele supermassieve Zwarte Gat

komen voor. Uiteindelijk zullen ze naar elkaar spiraliseren en botsen. De langgolvlige zwaartekrachtstraling van dergelijke explosies kunnen in de toekomst gezien worden met de nog te lanceren LISA-satelliet



John Heise

SRON-Ruimteonderzoek Nederland



John Heise, HOVO-Utrecht

16 juli 2021

Zwarte Gat

in 4 colleges

deel 2, Zwarte Gat

en de kwantummechanika

Deze reeks beoogt een uitleg bij twee recente ontwikkelingen:

Observaties • **zwaartekrachtstraling** ontdekt op 14 sept 2015

Theoretisch • de binnenkant van zwarte gaten,
“**gaten in de tijdruimte**”,
theorie van G. 't Hooft, Nederlandse Nobelprijswinnaar

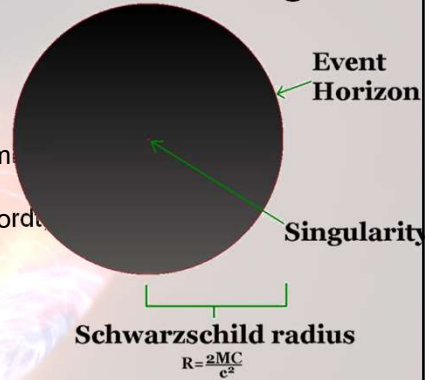
- Zwarte gaten en de Relativiteitstheorie
- Zwarte gaten en de kwantum mechanica
- Waarnemingen ook door zwaartekracht-straling
- De binnenkant van Zwarte Gat



een oplossing van de Einstein-veldvergelijkingen

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 en daarom een singulariteit genoemd wordt, waar de huidige theorieën niet meer geldig zijn



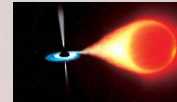
2. de **horizon van een Zwart Gat**
op de Schwarzschildstraal dat alle waarneming van buiten voor gebeurtenissen binnenin uitsluit

Twee soorten waargenomen Zwarte gaten

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

Stellaire Zwarte Gaten van 1 of een paar Zonmassa's:

Zwart Gat gevormd door extreem hoge materiedichtheid door een instortende ster



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

Superzware Zwarte Gaten van miljoen tot miljard keer een Zonmassa's:

Zwart Gat gevormd door bv sterren die in het centrum van een sterstelsel op elkaar klappen

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



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

$$R_{\text{Schwarz.}} = 3 M \text{ km}$$

M in zonsmassa's

• baby zwarte gaten

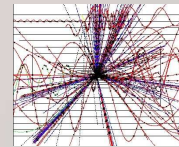
- minder dan een Aardmassa (nog nooit gezien)
- kleiner dan ~1 cm
- vereisen extreme dichtheden bij de vorming
- Misschien gevormd in de Oerknal?

$$\text{dichtheid} \sim \frac{M}{\text{Volume}} \sim \frac{M}{R^3} \sim \frac{1}{M^2}$$


• micro zwarte gaten

- kleiner dan een atoomkern (nog nooit gezien)
- vereisen extreme dichtheden bij de vorming ivm
- (later: verdampen heel snel);
- praktisch elementaire deeltjes
- bv zandkorrel-massa van 20 microgram
- met Schwarzschildstraal van 10^{-32} cm (Planck-lengte)

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



Inhoud

 **Vorige keer: Zwarte Gaten en de Relativiteitstheorie**

- Eigenschappen anders dan wet van Newton.
- we kwamen tot de eigenschap: licht wordt afgebogen
- in een zwaartekrachtsveld,
- het meest extreme rond Zwarte Gaten

 **Vandaag verder: Zwarte Gaten en de Relativiteitstheorie**

- in een zwaartekrachtsveld wordt
 - golflengte van licht opgerekt (gravitatie-roodverschuiving)
 - de tijd opgerekt (gravitatie tijddilatatie)

 **Zwarte Gaten en de kwantummechanica**

Algemene Relativiteitstheorie

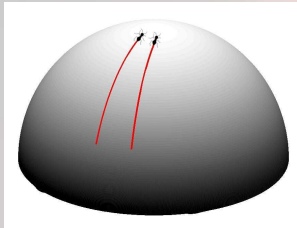
de nieuwe zwaartekrachttheorie



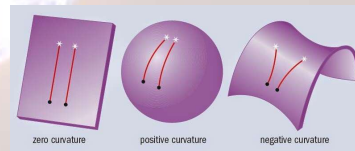
- gebaseerd op het Equivalentie principe

vaak samengevat in twee punten

1. massa doet de tijdruimte krommen
2. alles beweegt in vrije val "zo rechtdoor mogelijk" als de kortste weg in die gekromde tijdruimte

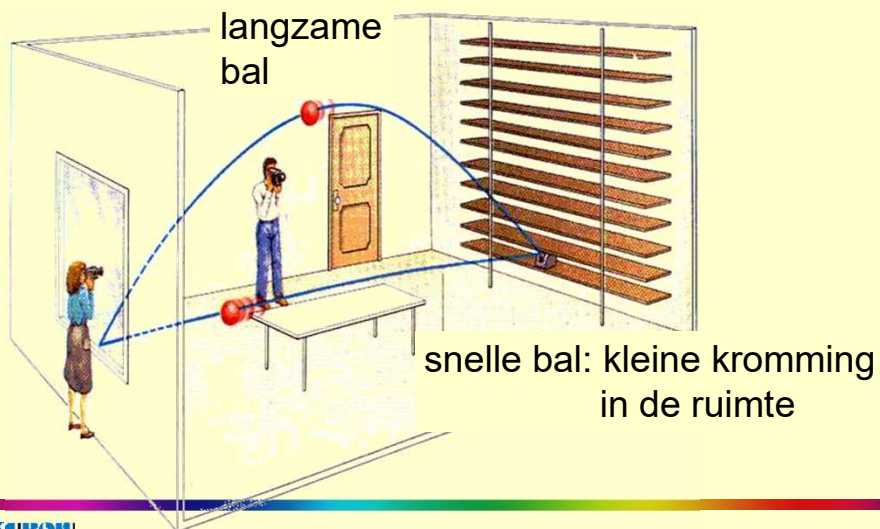


- en dat lijkt op het effect van een kracht

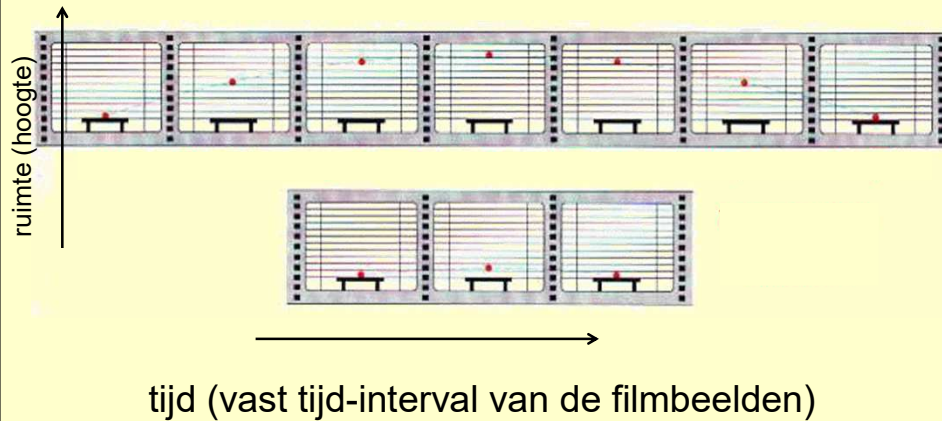


Zwaartekracht is geen "echte" kracht, maar een "meetkunde"; je beweegt door kromming

Niet kromming in de ruimte, maar tijdruimte



filmbeelden: kromming in de tijdruimte



In de tijdruimte een vaste kromming, dezelfde voor beide ballen



Algemene Relativiteitstheorie

- gebaseerd op het Equivalentie principe, "lift-experiment"
lokaal geen verschil tussen versnelde lift
en versnelling vd zwaartekracht



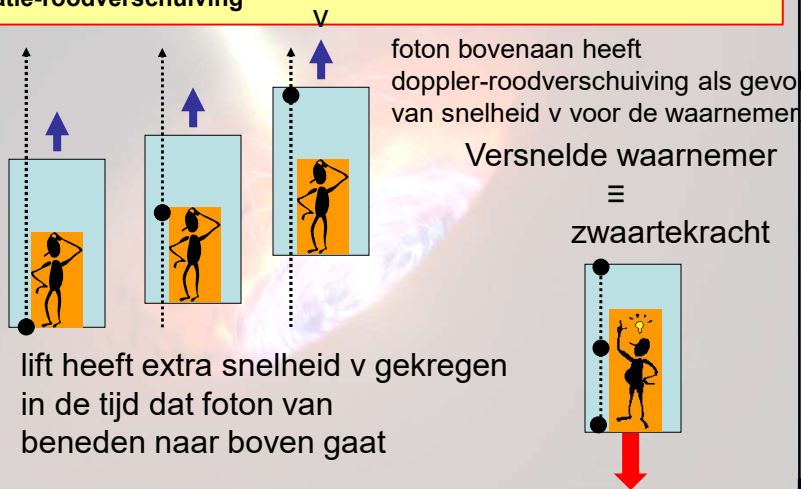
Drie belangrijke verschillen met Newton:

- Licht wordt afgebogen in zwaartekrachtveld
- Licht verschuift in golflengte
Gravitatie-roodverschuiving
- Gravitatie-tijddilatatie
de tijd tikt langzamer in zwaartekrachtsveld

Al deze effecten treden extreem op in Zwarte Gat

Licht en zwaartekracht (2) Gravitatie-roodverschuiving

2 Licht uit zwaartekrachtveld heeft minder energie=lagere frequentie $E=h f$:
a. Gravitatie-roodverschuiving



Algemene Relativiteit 28 nov 2020

gravitatie-roodverschuiving

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



ster nadert tot de horizon, maar komt daar
(gezien van verre)
nooit voorbij

Licht en zwaartekracht (3)

nauw verband tussen golflengte en tijd

relatie tussen golflengte en de tijd van 1 periode:



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

- de tijd tikt langzamer in zwaartekrachtsveld
Gravitatie-tijddilatatie

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

Licht en zwaartekracht (3)

- de tijd tikt langzamer in zwaartekrachtsveld
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

Weer extreem voor Zwarte Gat

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

Interstellar, de science fiction film

- met interessante relativistische effecten, zoals **Gravitatie-tijddilatatie**



Planeet in een nauwe baan rond een zwaar zwart gat

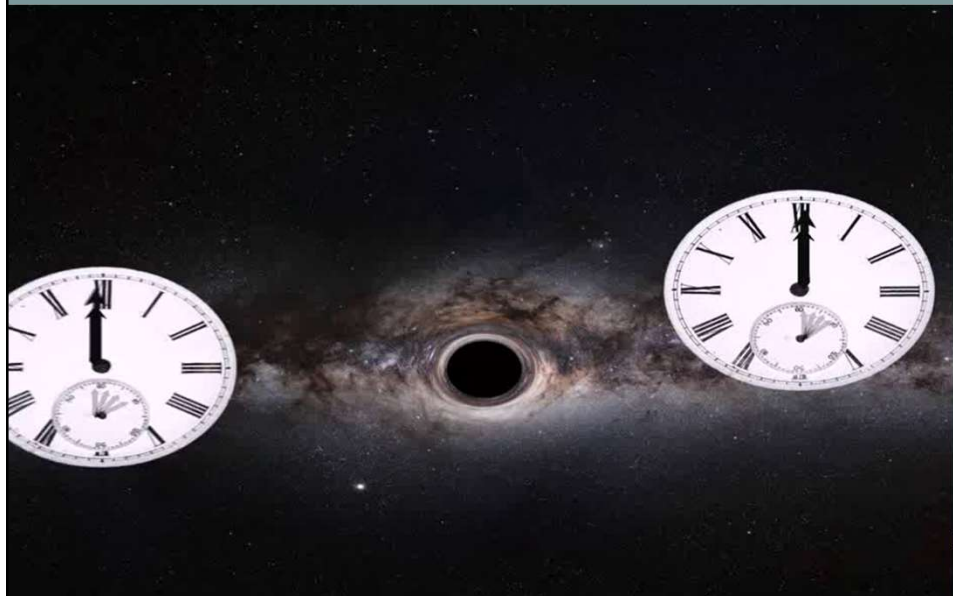
Tijd astronaut (vader) gaat langzamer dan de tijd voor de dochter op Aarde

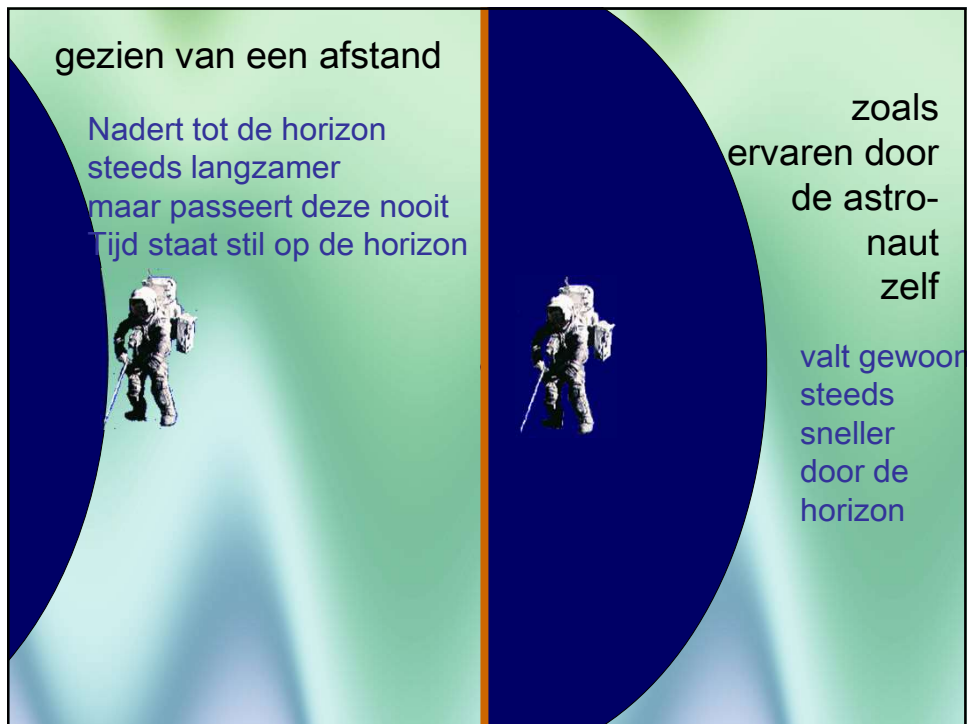
Bij thuiskomst (samen met het effect van de zgn. tweelingparadox) is dochter veel ouder dan astronaut

ene Relativiteit 28 nov 2020

Tijd-dilatatie

naarmate je dichterbij de horizon komt, gaat de tijd langzamer





zoals golf/deeltje een dualistische visie is

Dualistische visie

Zwart Gat ontstaat in een grote implosie als een ster zijn eigen gewicht niet meer kan dragen.

- de buitenlagen worden heet, ontbranden en exploderen (Supernova)
- de binnenlagen imploderen tot steeds grotere dichtheid

Twee waarnemers, die totaal iets anders constateren:

1. Meevallend met instortende ster in vrije val: gaat steeds harder, passeert gewoon de horizon, eindigt in $r=0$
2. Van een afstand bekeken: nadert steeds langzamer tot de horizon, passeert deze nooit en verdwijnt door oneindig grote roodverschuiving

Nieuwe definitie van de horizon a.d. hand van waarneming oppervlak waar roodverschuiving oneindig is

Algemene Relativiteit 28 nov 2020

eigenschappen Zwarte Gaten 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 tijdsdilatatie steeds dichterbij 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

1974 Stephen Hawking's grote ontdekking:

*Zwart Gat is niet zwart maar straalt wel!
oppervlak Zwart Gat heeft een temperatuur*



Alles wat er in valt wordt uiteindelijk ook weer uitgestraald als thermische straling

Het merkwaardige van een Zwart Gat is niet dat er niets uit kan komen, maar dat het zolang duurt

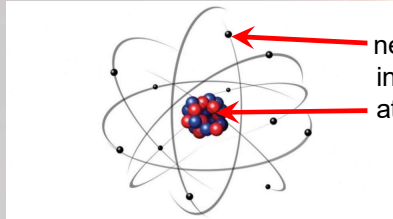
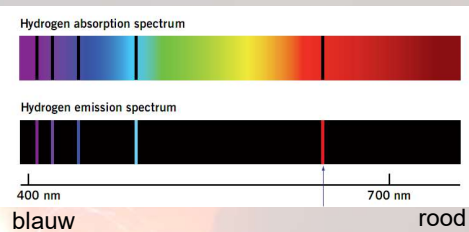
deel 2, Zwarte Gaten en de kwantummechanika

- **Eerst: ontwikkeling van de kwantum-mechanika**



begin 20ste eeuw Atoom model

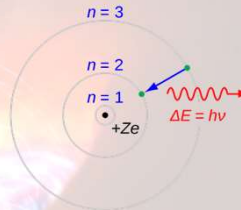
- materie, wat is opvallend?
spectrum van hete gassen
- beeld van een atoom



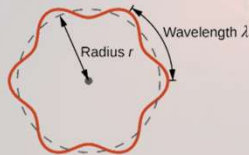
negatief geladen elektronen
in een baan rond een kleine positief geladen
atoomkern (voor waterstof: 1 proton)

1920, kwantummechanica

- 1905 Einstein:
elektromagnetische **golf** gedraagt zich als **deeltje** (foton)
 $E = h f$ E energie, h constante van Planck, f de frequentie v.d. golf
- 1913 atoommodel van Bohr
banen gekwantiseerd
en daarmee de energie v.d. elektronen
- 1924 De Broglie, ook omgekeerd
deeltje (materie) gedraagt zich als **golf**



Golven anders dan deeltjes: vertonen interferentie=
kunnen elkaar uitdoven/versterken



- electron-golf alleen op afstanden met geheel aantal golfjes

1925, kwantummechanica, verklaring deeltje/golf wat golft er? Een kans, abstrakte golffunctie

kwantum-mechanica beschrijft dit dualisme als
een abstracte golf die de kans aangeeft iets als deeltje te zien

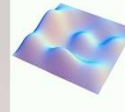
- voortplanting als golf
- waarneming als deeltje op zekere plaats
(met een kans gegeven door de golffunctie)

Golf-karakter impliceert onzekerheden;
een sinus-golf "is overal";
soms van sinussen (golf-pakketje)
lijkt al op een voortbewegend deeltje

golf-pakket

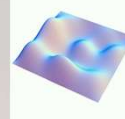


1925, Kwantummechanica QM belangrijke kenmerken

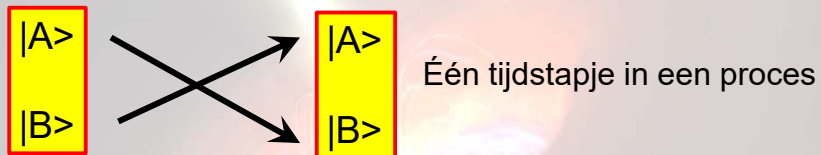


- net als bij golven: de som van twee toestanden is weer een fysische toestand (superpositie principe)
- som kansen over alle mogelijkheden=1,
(toestanden mogen niet verdwijnen: probleem in Zwarte Gat)
- basis uitgangspunt in de kwantummechanika:
de tijdsevolutie is simpele voorplanting van golven:
deterministisch en invariant voor tijdsomkering
alle informatie daarvoor is aanwezig en behouden;
probleem in Zwarte Gat
- micro-natuurwetten dienen omkeerbaar te zijn voor de tijd

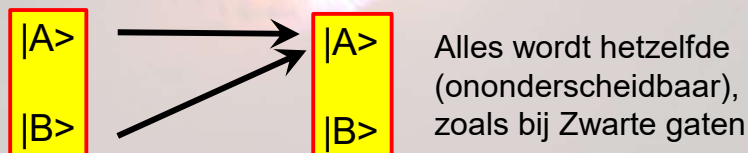
Informatie-behoud QM



- bv toegestaan proces in natuurwetten:
toestand A wordt B en B wordt A:



- bv niet-toegestaan proces in natuurwetten:
toestand A wordt A en B wordt ook A
éénmaal A weet je niet het verleden te reconstrueren



Zwarte Gat en de kwantummechanika



de lege ruimte in de kwantummechanika

de stap naar neerdere deeltjes:

Kwantumvelden-theorie



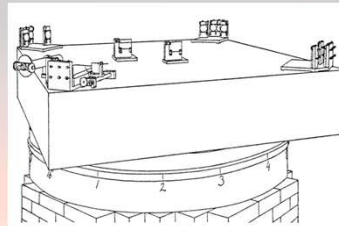
19e eeuw: lege ruimte gevuld met de ether

1887 Michelson-Morley experiment:

geen ether-snelheid gedetecteerd

lichtsnelheid varieert niet:

Aarde heeft geen snelheid t.o.v. de ether



1905 Einstein, Speciale Relativiteitstheorie: lichtsnelheid altijd constant

meestal gezien als weerlegging van de ether,
maar eigenlijk alleen op het snelheids-effect van ether

1920, Einstein over aether

1920 Einstein

ruimte als drager van natuurkundige grootheden

"... I can see that with the word æther we say nothing else than that space has to be viewed as a carrier of physical qualities...."

maar geen medium met 'gewicht'

"...æther may not be thought of as endowed with the quality characteristic of ponderable media, as consisting of parts which may be tracked through time. The idea of motion may not be applied to it"

- met de ontwikkeling van de kwantum-velden-theorie (QFT) is dit nu de gangbare opvatting

1925, kwantummechanica

Belangrijke gevolgen van de kwantum mechanica

Golf-karakter impliceert onzekerheden

1925 Heisenbergs **onbepaalbaarheidsrelatie** (plaats en snelheid)
als je de plaats nauwkeurig kent, is de impuls(snelheid) onnauwkeurig en v.v.

$\Delta x \Delta p > h/2$, met Δx onzekerheid in positie x , Δp onzekerheid in impuls p
= $\text{massa} \times \text{snelheid}$ [h is constante van Planck]

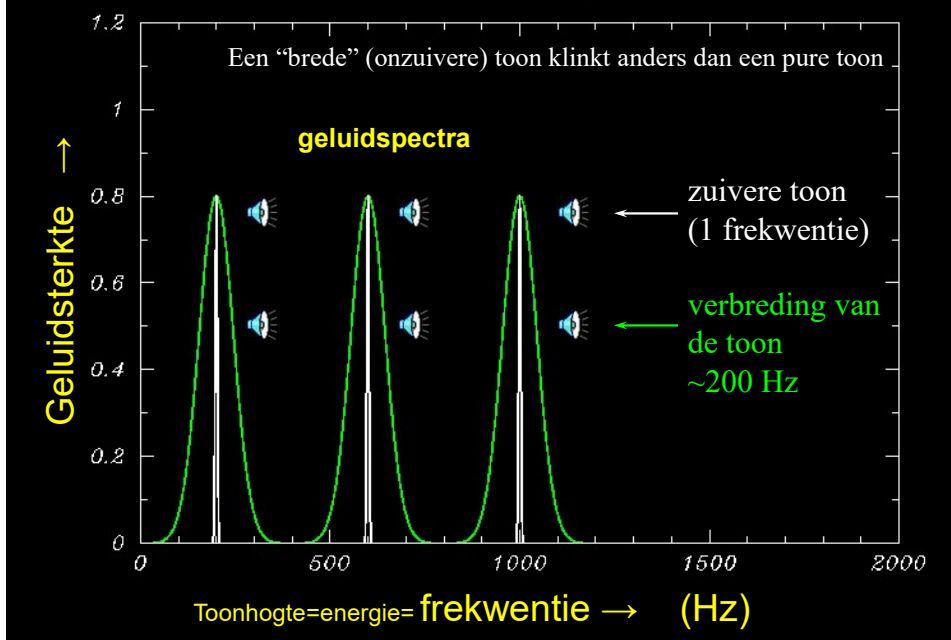
maar ook zijn **tijd en energie met elkaar gekoppeld**
bij heel korte duur, is de energie onbepaald
(energiebehoud alleen gemiddeld: tijdelijke fluctuaties mogelijk)

$\Delta t \Delta E > h/2$, met Δt de tijdduur van een gebeuren, ΔE onzekerheid in energie E
dus heel even (Δt) kan iets energie ΔE krijgen die er tevoren niet was

Acoustisch voorbeeld van de Heisenberg- Energie-tijd-relatie

bekend bij musici (energie=frequentie trilling snaar=toonhoogte snaar):
snaar heel kort aangetikt dan toon onzuiver (onbepaalde toonhoogte)

Precies bepaalde energie-versus minder scherp bepaald



Precies bepaalde energie-versus minder scherp bepaald

bekend bij musici (energie=frequentie trilling snaar=toonhoogte snaar)
snaar heel kort aangetikt dan toon onzuiver (onbepaalde toonhoogte)

mengen van twee tonen, geeft een "beat", verschilfrequentie:



Nu het effect van het tijdsinterval

400 en 403 Hz, gedurende 5 sec

400 en 403 Hz, gedurende 1 sec

400 en 403 Hz, gedurende 80 msec

hoe kleiner het tijdsinterval des te groter is de onzekerheid in energie

1930, Kwantum Veldentheorie QFT

uitbreiding van kwantummechanica in overeenstemming
met speciale relativiteitstheorie

- de ruimte is gevuld met natuurkundige velden (vergelijk elektrisch veld en magnetisch veld)
- alles fluctueert voortdurend
- velden zijn nooit blijvend nul, dan immers precies bepaald fluctuaties noemen we virtuele deeltjes

Vacuum in de kwantum-veldentheorie is niet meer leeg (want altijd gevuld met velden) maar gedefinieerd als de laagste energie toestand

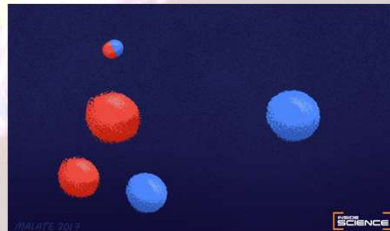
Geen behoud van deeltjes in Kwantummechanica

Creatie en annihilatie van deeltjes, gewoonte zaak van de wereld

- knip een lamp aan en miljarden fotonen worden **gecreëerd** uit niets en uitgezonden
- energie uiteindelijk afkomstig van elektrische velden
- ze vallen op je netvlies of worden elders geabsorbeerd: **annihilatie**
- vacuum: hoe korter de tijd hoe groter de energie van virtuele deeltjes



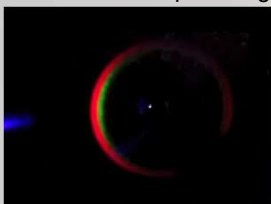
“het kokende vacuum”



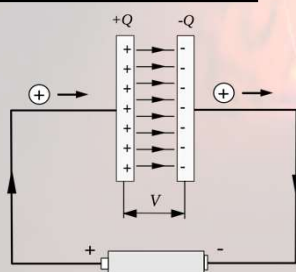
Het proces heet ook Vacuum-polarisatie

omdat paren positief-negatieve deeltjes een elektrisch dipool-moment die (hoewel samen neutraal) toch invloed uitoefenen
b.v. op het energie-niveau van het waterstof-atoom (**Lamb-shift**)

Ook te zien in speciaal geprepareerd laser licht, letterlijk als fluctuatie



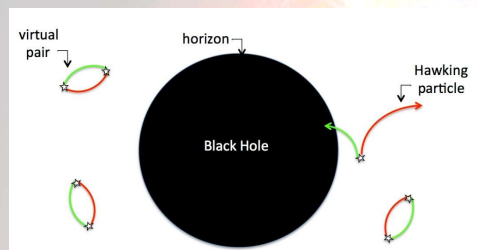
Virtuele deeltjes worden reëel als je energie toevoerd
b.v. door een elektrische spanning
(de **Schwinger-limiet**)



Bij een elektrisch veld van $\sim 10^{18}$ Volt/meter
"slaat het vacuum door"
(**"vonkend vacuum"**)
en worden reële paren van
1 elektron en 1 positron gevormd

Hawkingstraling

- Nabij Zwarte Gatten wordt energie geleverd door **de Getijdenkracht** tussen de twee virtuele deeltjes-paren, waardoor ze reëel kunnen worden



Hawkingstraling, filmpje

I made some animations
for a documentary series, where
Stephen Hawking, James Hartle and Thomas Hertog
present their model, the "No Boundary Proposal".

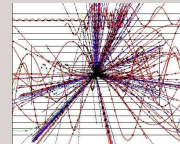
It takes quantum effects into account and may be able to explain
if there is a multiverse, why there is an arrow of time and
what really happened at the big bang.

Link is in the description.



Hawkingstraling, temperatuur en verdamping

- temperatuur Zwart Gat van 1 zonsmassa uiterst gering
~60 nano-Kelvin $6 \cdot 10^{-9} K$
- verdamping duurt $\sim 10^{67}$ jaar (leeftijd heelal $\sim 10^{10}$ jaar)
- temperatuur Zwart Gat $\sim \frac{1}{M}$ (*wordt dus steeds heter*)
- de hele kleintjes: heet en verdampen explosief als instabiele elementaire deeltjes
bv 20 microgram Planck-massa, zandkorrel)
explodeert in veelminder dan pico-seconden
- experimenteel bewijs alleen te geven als het ooit lukt om micro-Zwarte gaten te maken
- Stephen Hawking geen Nobel-prijs omdat zijn effect nog nooit experimenteel geverifieerd is.



Kwantummechanika een probleem voor Zwarte Gat

- Relativiteitstheorie beschrijft de macro-kosmos tot op hoge precissie geverifieerd (bv neutronensterren en zwarte gaten in nauwe baan)
- Kwantum-natuurkunde beschrijft de micro-kosmos tot op hoge precissie geverifieerd

Bij Zwarte gaten zijn ze onderling strijdig,
Relativiteitstheorie in wezen juist?
Afwijking Kwantummechanika?

OF:

Relativiteitstheorie onjuist?
Kwantummechanika in wezen correct

- OF: Gheelnieuwe theorie voor de Kwantumzwaartekracht

Einde

Volgende keer:
waarnemingen Zwarte Gat
zwaartekrachtstraling