

# VAN ATOOM TOT KOSMOS

## 4. Kracht

Piet Mulders

[pjg.mulders@gmail.com](mailto:pjg.mulders@gmail.com)

<https://www.nat.vu.nl/~mulders>



European Research Council

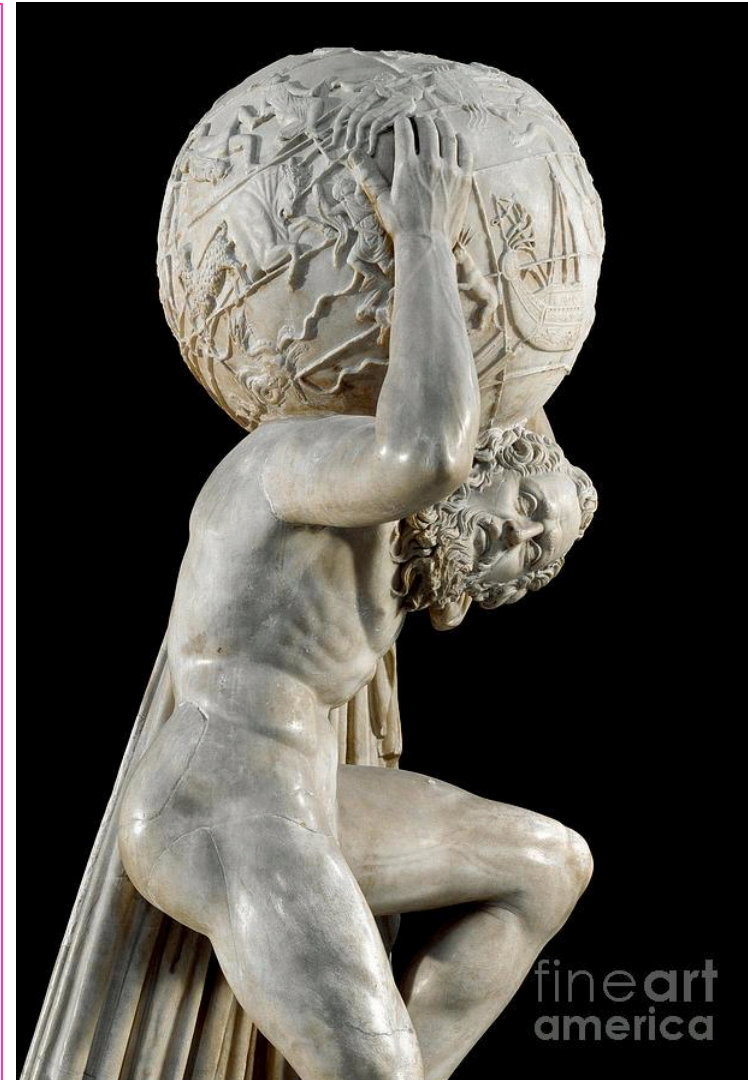


# **De basiskrachten in de materie**

## De basiskrachten in de materie

Krachten veroorzaken verandering in energie, de hoeveelheid van beweging langs een bepaalde richting (impuls) of in de hoeveelheid van draaiing om een bepaalde as (impuls-moment). Dit zijn de grootheden die dus in afwezigheid van krachten niet veranderen en behouden zijn.

Lekker abstract! Maar het is wel hoe we krachten voelen en krachten kunnen ontdekken. De meest zichtbare in het dagelijks leven is de zwaartekracht of gravitatie, het gewicht van een voorwerp. Als dat de enige kracht was zou de Aarde een egale bol zijn met daarin alles netjes gerangschikt in opeenvolgende schillen. Maar er zijn ook de krachten die de materie structuur geven, uiteindelijk terug te voeren op elektromagnetisme tussen en door ladingen. De rijkdom waarmee die krachten zich manifesteren is enorm. Basiskrachten tussen ladingen in atomen en moleculen, van der Waalskrachten tussen moleculen, krachten die kristalroosters vorm geven tot wrijvingskrachten in de makroskopische wereld.



# DE BASISKRACHTEN IN DE MATERIE

Pas binnen de atoomkernen tussen en in protonen en neutronen (nucleonen) verschijnen andere krachten. Dat zijn de sterke krachten die quarks met 3 soorten ladingen opsluiten in nucleonen en die doorsijpelt naar de atoomkern. Daarnaast de zwakke kracht die neutronen in protonen kan veranderen of up-quarks in down-quarks, net zoals diezelfde zwakke kracht elektronen kan veranderen in neutrinos.

Elektromagnetisme, zwakke en sterke kracht vormen één raamwerk, het standaardmodel van elementaire deeltjes. Alle deeltjes hebben ladingen. Krachtdeeltjes voelen ladingen en kunnen die bovendien in elkaar overvoeren. Daarnaast fungeren ze als overbrengers van energie, impuls en impulsmoment en dat zonder verliezen.

Vier van die krachtdeeltjes doen het elektrozwakke werk, waaronder het foton voor elektromagnetisme. Acht gluonen zorgen voor de sterke kracht. En één Higgs deeltje 'rules them all'.



## Standaardmodel van elementaire deeltjes

| Drie generaties materie (fermionen) |                                               |                                                |                                                 |                                       |                   | Krachtdeeltjes (bosonen)                                                                                                                  |  |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| I                                   |                                               | II                                             |                                                 | III                                   |                   |                                                                                                                                           |  |
| massa<br>lading<br>spin             | $\sim 2.2 \text{ MeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$ | $\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$ | $\sim 172.6 \text{ GeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$ | $0$<br>$0$<br>$1$                     | $0$<br>$0$<br>$1$ | <div>HIGGS BOSON</div> <div><math>125 \text{ GeV}/c^2</math><br/><math>0</math><br/><math>0</math><br/>H<br/>Higgs</div>                  |  |
|                                     | u<br>up                                       | c<br>charm                                     | t<br>top                                        | g<br>gluon                            |                   |                                                                                                                                           |  |
| QUARKS                              | $\sim 4.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$ | $\sim 93 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$   | $\sim 4.2 \text{ GeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$   | $0$<br>$0$<br>$1$                     | $0$<br>$0$<br>$1$ | <div>LEPTONEN</div> <div><math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math><br/><math>-1</math><br/><math>1/2</math><br/>e<sup>-</sup><br/>elektron</div> |  |
|                                     | d<br>down                                     | s<br>strange                                   | b<br>bottom                                     | γ<br>foton                            |                   |                                                                                                                                           |  |
| LEPTONEN                            | $0.511 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$      | $105.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$       | $1.777 \text{ GeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$        | $91.19 \text{ GeV}/c^2$<br>$0$<br>$1$ | $0$<br>$0$<br>$1$ | <div>TIKBOSONEN</div> <div><math>80.37 \text{ GeV}/c^2</math><br/><math>\pm 1</math><br/><math>1</math><br/>W<br/>W boson</div>           |  |
|                                     | ν <sub>e</sub><br>neutrino                    | ν <sub>μ</sub><br>neutrino                     | ν <sub>τ</sub><br>neutrino                      | Z <sup>0</sup><br>Z boson             |                   |                                                                                                                                           |  |
|                                     | $< 0.8 \text{ eV}/c^2$<br>$0$<br>$1/2$        | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$<br>$0$<br>$1/2$       | $< 18 \text{ MeV}/c^2$<br>$0$<br>$1/2$          |                                       |                   |                                                                                                                                           |  |
|                                     | ν <sub>e</sub><br>neutrino                    | ν <sub>μ</sub><br>neutrino                     | ν <sub>τ</sub><br>neutrino                      |                                       |                   |                                                                                                                                           |  |

**kracht**

# KRACHT

- In tijdsevolutie van een systeem zijn **energie** en **impuls** zijn behouden grootheden, wat bij samengestelde systeem impliceert dat het **totaal** behouden. Dit is een consequentie van ontbreken van absolute tijd (energiebehoud) en/of plaats (impulsbehoud).
- Er kan wel energie en impuls uitgewisseld worden
- Via **krachten** krijgen we

- overdracht van energie (**slepen**)

$$\Delta E = -F \Delta x \quad \text{of} \quad F = -\frac{dE}{dx}$$

- overdracht van impuls (**stoten**)

$$\Delta p = F \Delta t \quad \text{of} \quad F = \frac{dp}{dt}$$

- Dit is niets anders dan de wetten van Newton

1. Traagheidswet (impulsbehoud)  
Object is in rust of beweegt eenparig
2. Kracht veroorzaakt versnelling

$$F = \frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma$$

3. Actie = -reactie (totaal is behouden)



Niets voor niets!



# KRACHTEN IN HET DAGELIJKS LEVEN

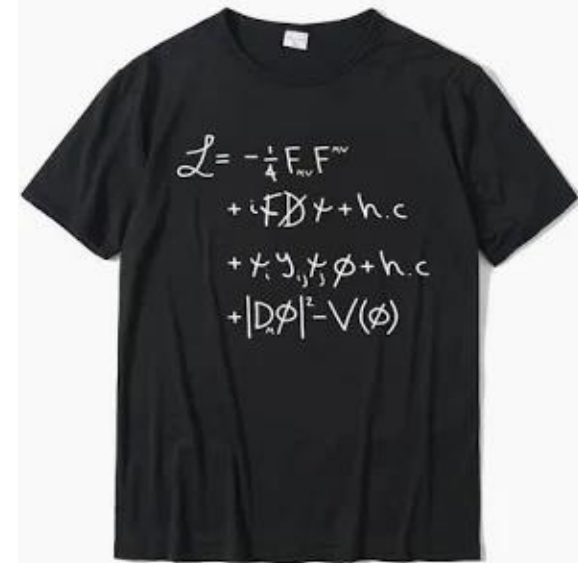
- Elektromagnetisme
- Zwaartekracht

- **Twee van de vier basiskrachten**
- **Beide gebaseerd op fundamentele principes**



# MET VEREENDE KRACHTEN

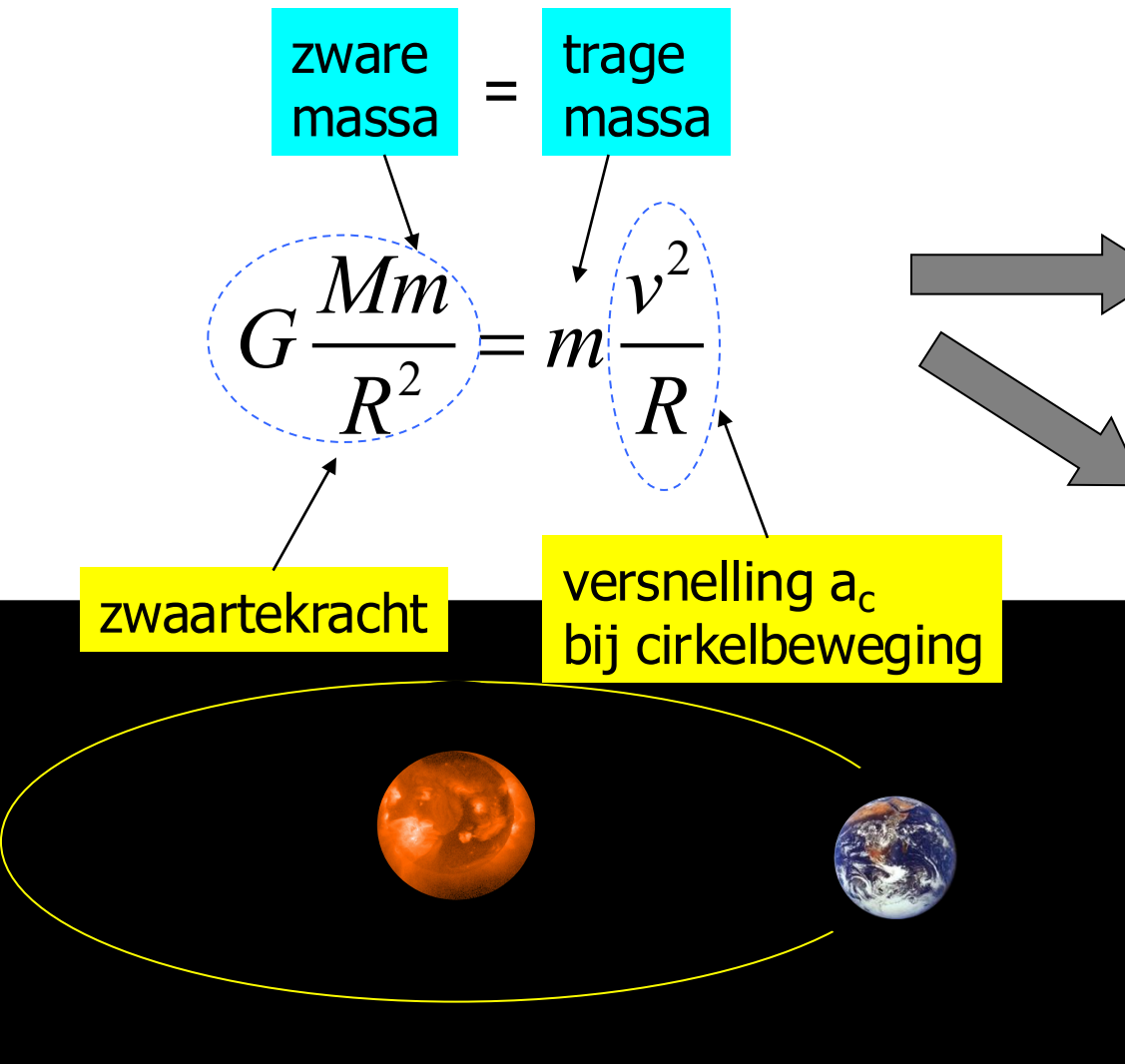
- **Gravitatie** en kromming van ruimte-tijd
  - Koppeling van energie en impuls aan kromming van ruimte en tijd
  - Zwarte gaten
- De niet-abelse **ijktheorieën**
  - Formalisme is 'eenvoudig': symmetrie → ladingen → krachtdeeltjes die ladingen voelen en in elkaar overvoeren
  - Succes van elektrodynamica (elektrische en magnetische krachten)
- Waar zijn al de zware quarks gebleven?
- De zware en lichte krachtdeeltjes
- De relatieve sterkte van de krachten
- De breking van discrete symmetrieën





# Gravitatie en ruimte-tijd

# Massa: zwaartekracht



rotatiesnelheden in galxies

$$v(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

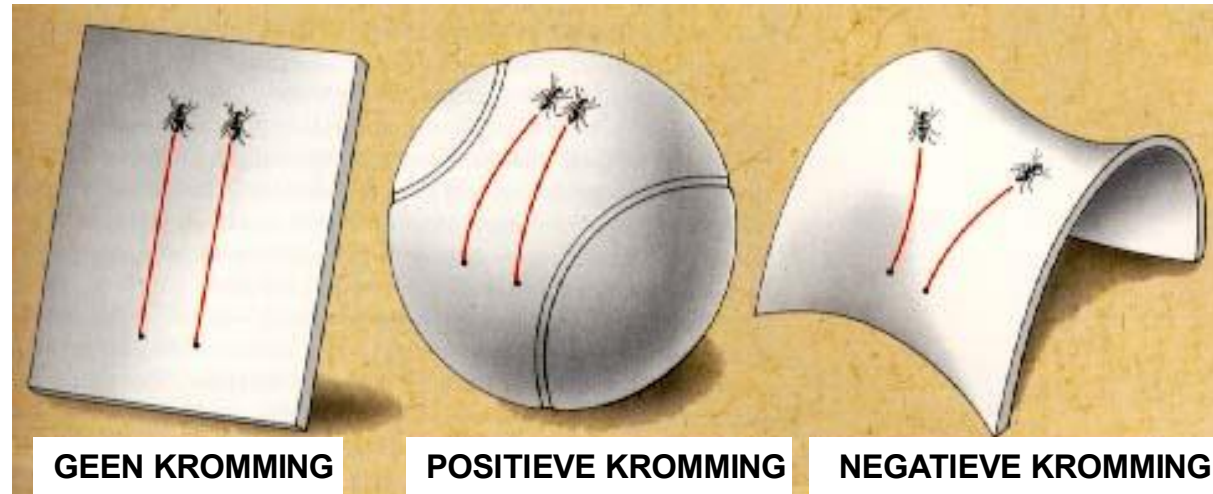
omloopstijden en afstanden  
(planeten, dubbelsterren)

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

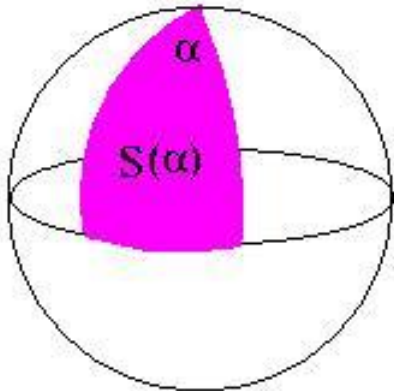
... onafhankelijk van  $m$  !!

# Massa: kromming van ruimte

- Zonder kracht: rechtlijnige beweging
- Zwaartekracht wordt veroorzaakt door massa
- Massa bepaalt ook mate van respons (equivalentieprincipe)



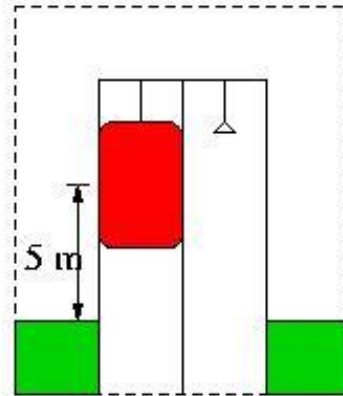
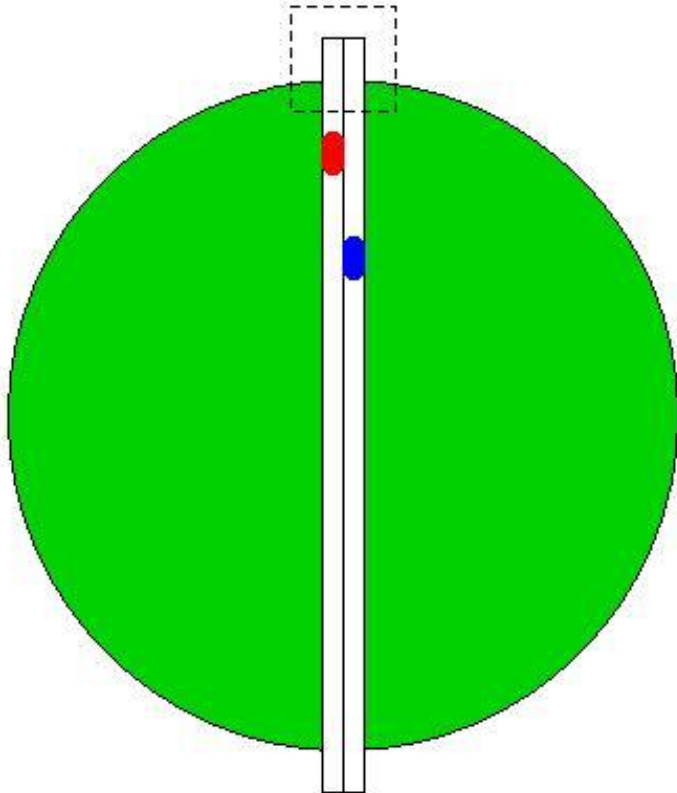
**Algemene relativiteitstheorie:**  
**Beweging in zwaartekrachtveld is rechtlijnige beweging in een t.g.v massa gekromde ruimte**



- Kromming van een bol:  $k = 1/R^2$
- Bijv voor voetbal:  $k = 50 \text{ /m}^2$
- Bijv voor aarde:  $k = 2.8 \times 10^{-14} \text{ /m}^2$
- Andere methode gaat via hoeken  
$$k = \alpha/S(\alpha)$$



# Pendelen dwars door de Aarde



- 2 terra-cruisers
- op en neer!

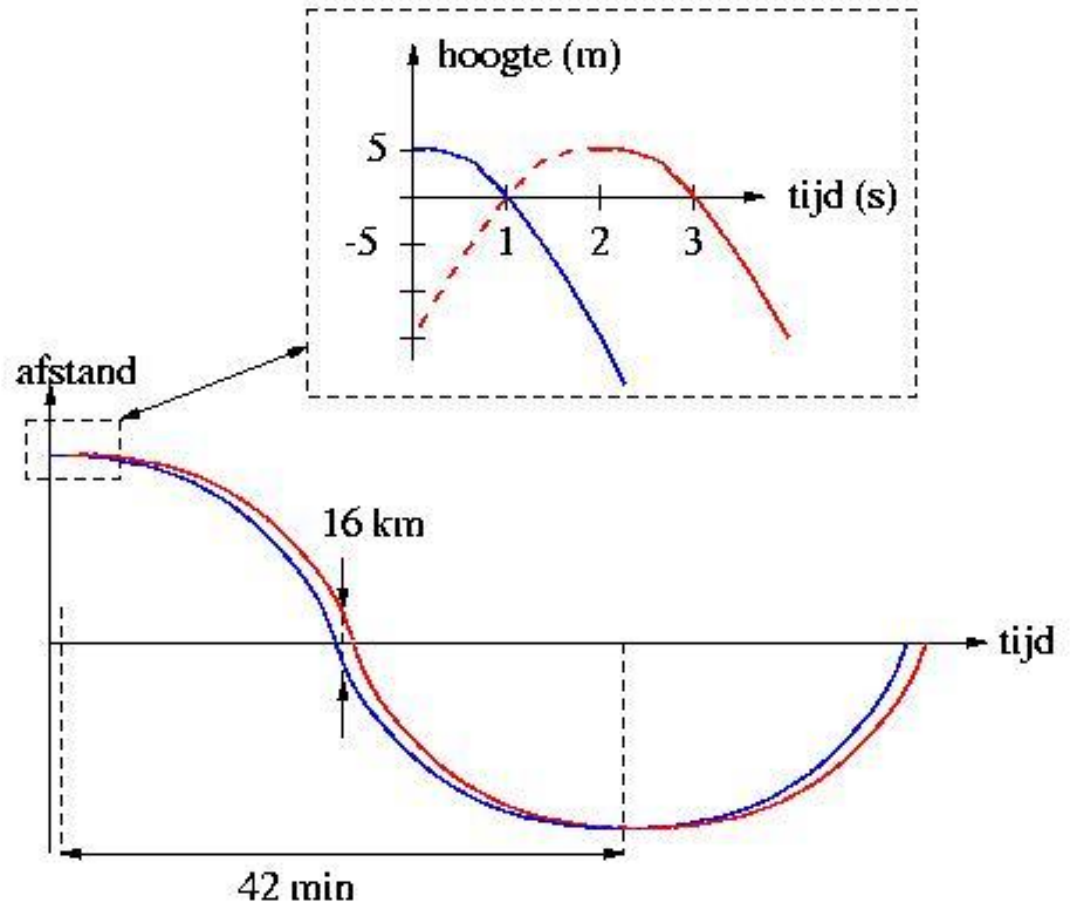
Vergelijk met 'bol' :

- $\pi R = 42 \text{ min}$   
 $= 7.5 \times 10^{11} \text{ m}$

of

- $\alpha = 20 \text{ m/s}$   
 $= 0.67 \times 10^{-7}$

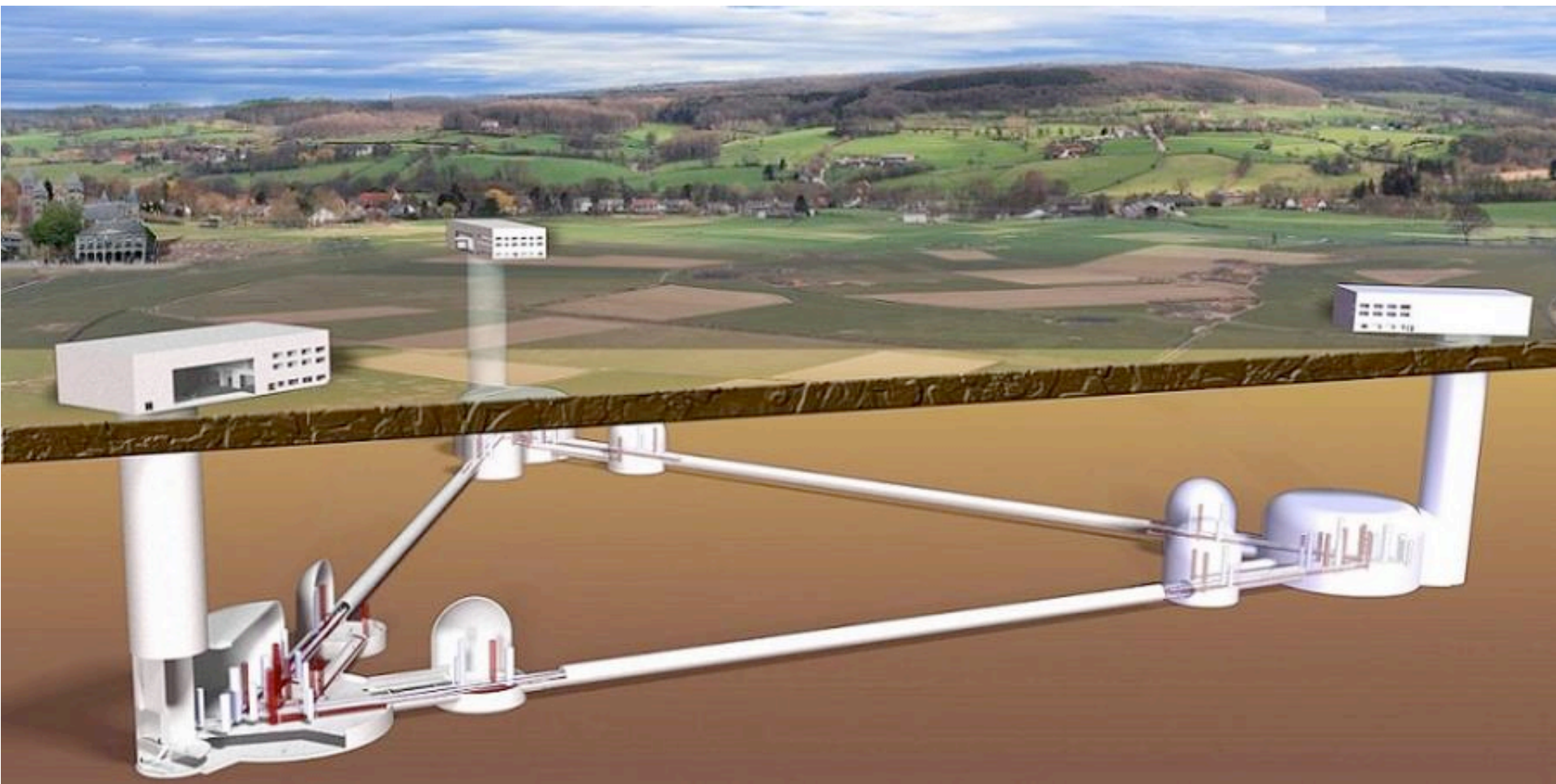
- $R = (16 \text{ km})/\alpha$   
 $= 2.4 \times 10^{11} \text{ m}$



$$k = 1/R^2 = 1.6 \times 10^{-23} / \text{m}^2 \quad !!!$$

# Bronnen van gravitatiegolven

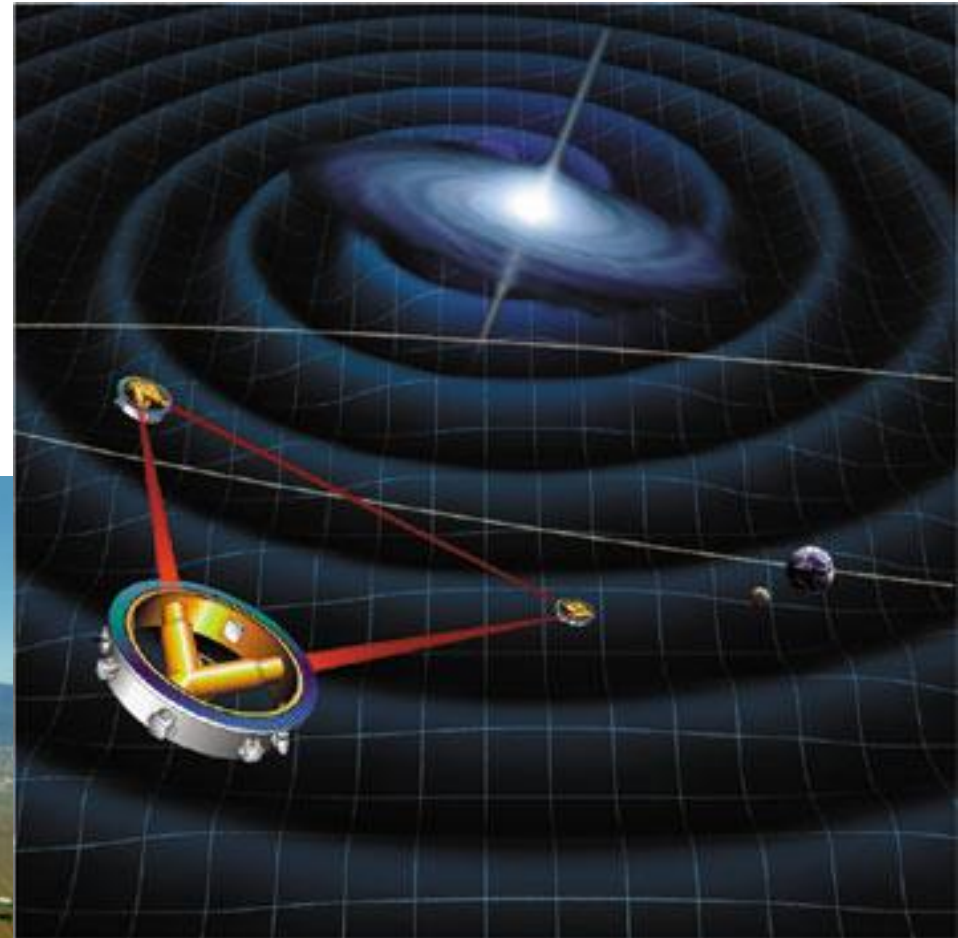
- Op de juiste manier trillende massa-configuratie (kwadрупool trillingen)
- Samensmeltende zwarte gaten: [https://youtu.be/I\\_88S8DWbcU](https://youtu.be/I_88S8DWbcU)
- Ambitieuze plannen: Einstein telescoop



# Gravitatiegolven: trillingen van ruimte en tijd



op aarde (LIGO & VIRGO in Pisa)



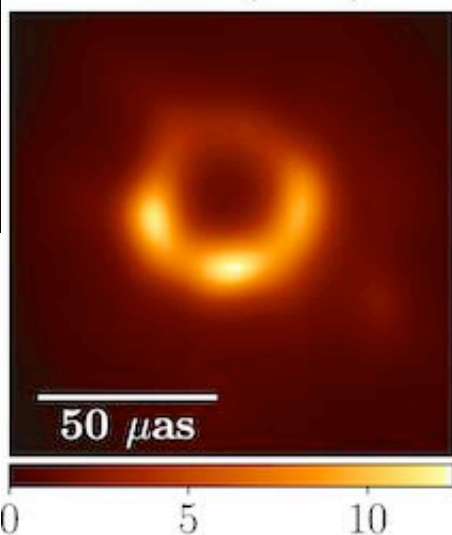
in de ruimte (LISA, to come?)



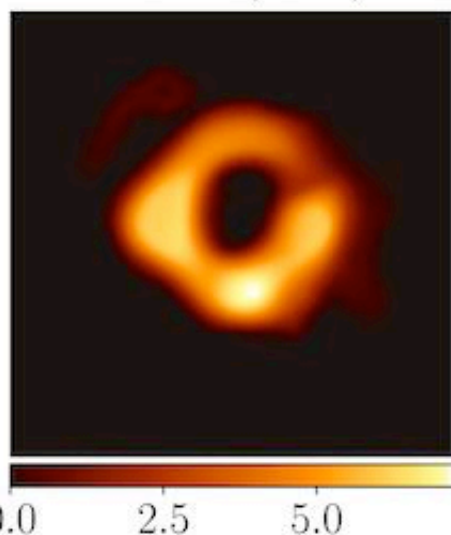
# The black hole in M87



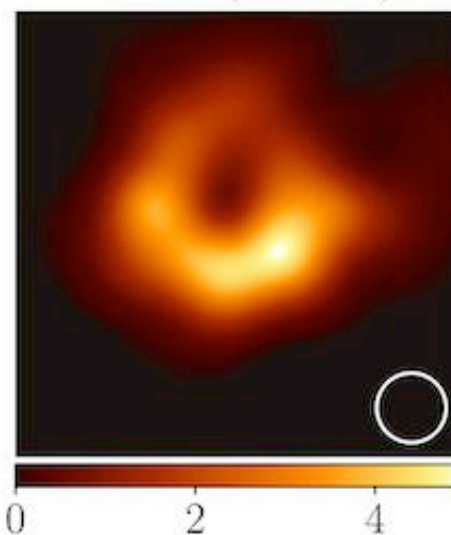
Team 1 (RML)



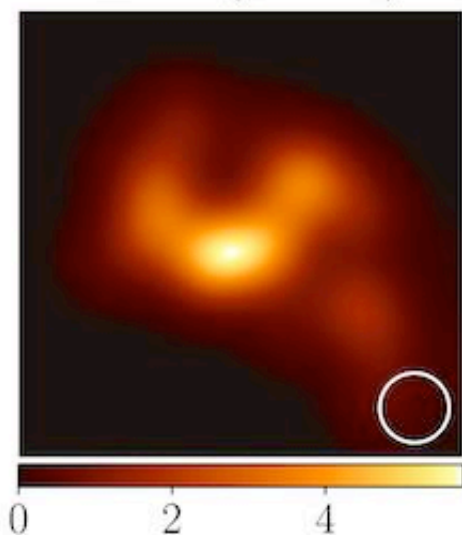
Team 2 (RML)



Team 3 (CLEAN)



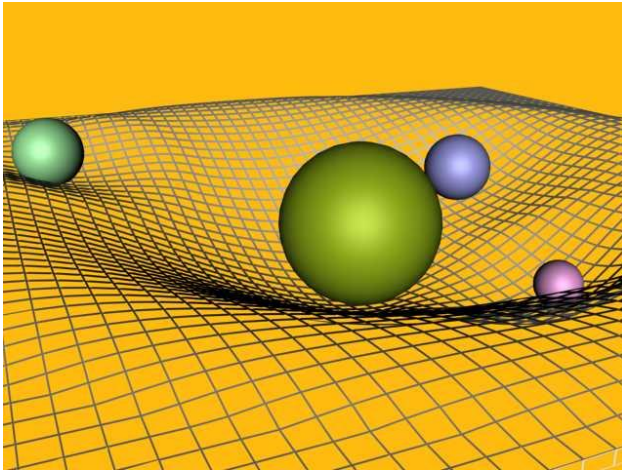
Team 4 (CLEAN)



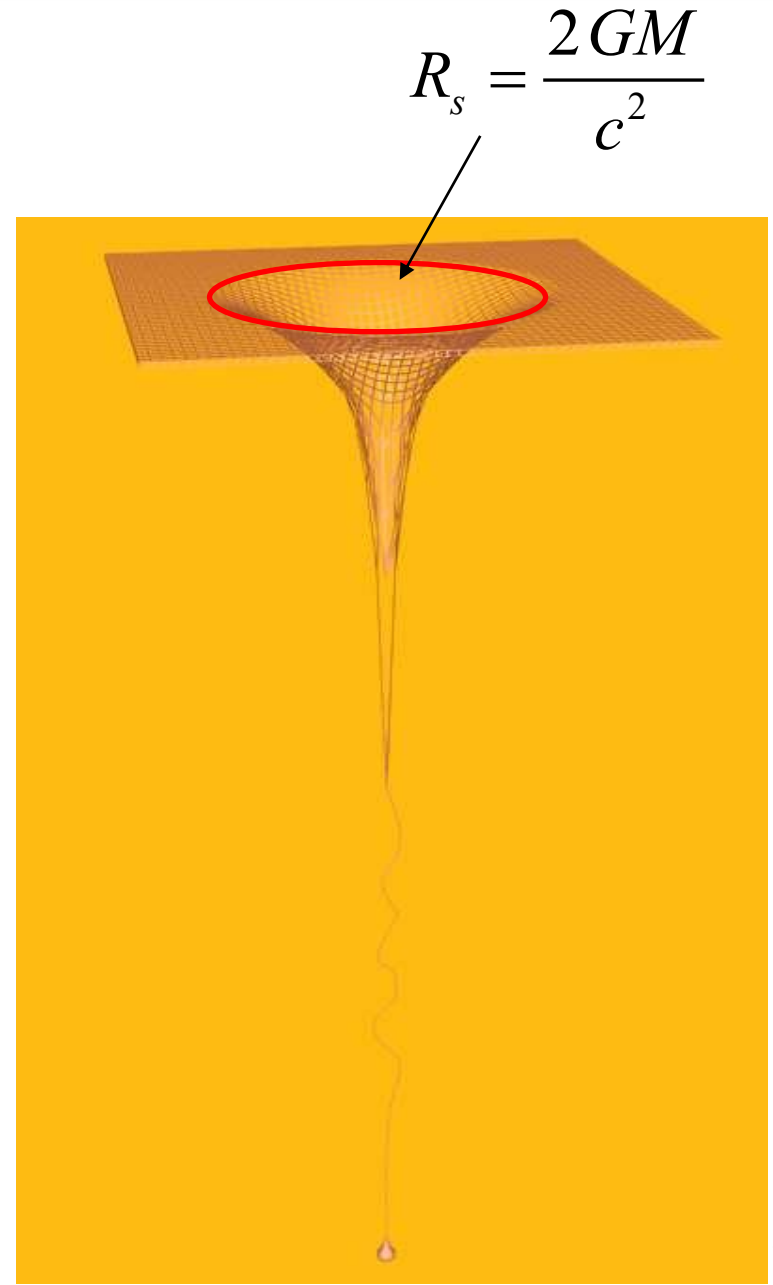
Brightness Temperature ( $10^9 \text{ K}$ )

# Zwart gat

- Massa kromt ruimte-tijd coördinaten



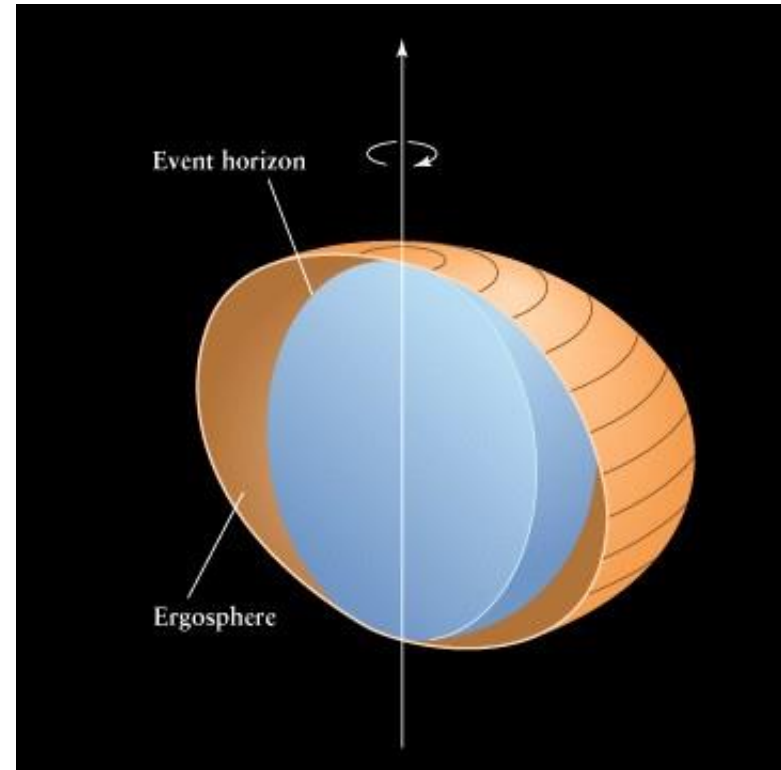
- En bij voldoende massa wordt zelfs licht ingevangen en krijgen we een *zwart gat*
- Eigenschappen
  - Massa  $M$
  - Impulsmoment  $J$
  - Lading  $Q$



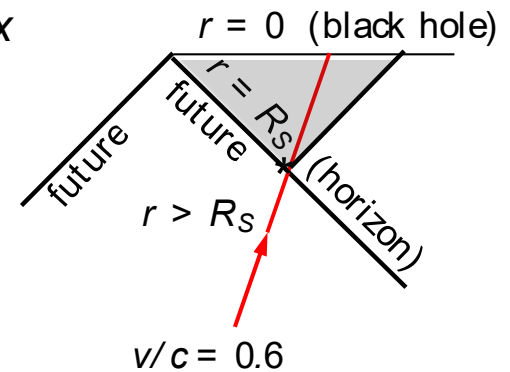
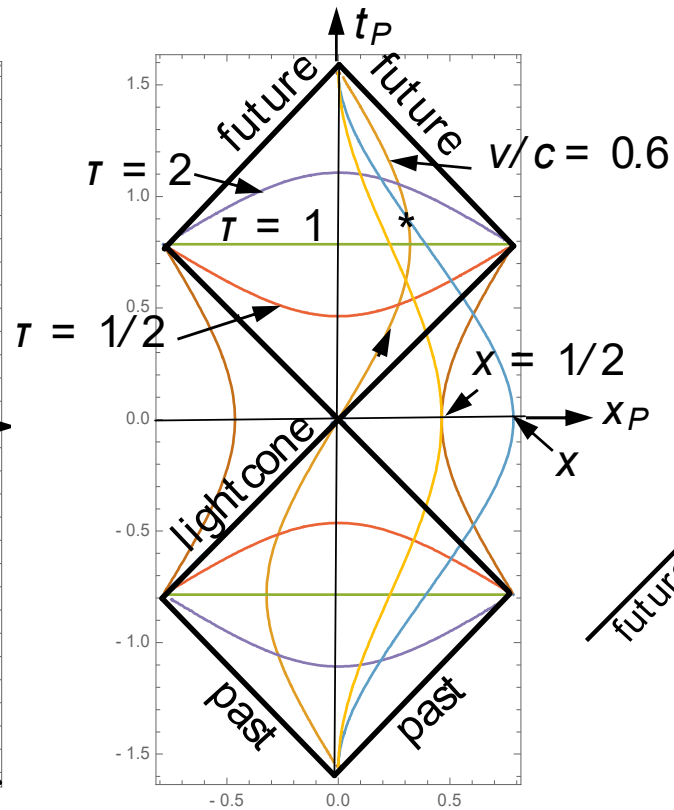
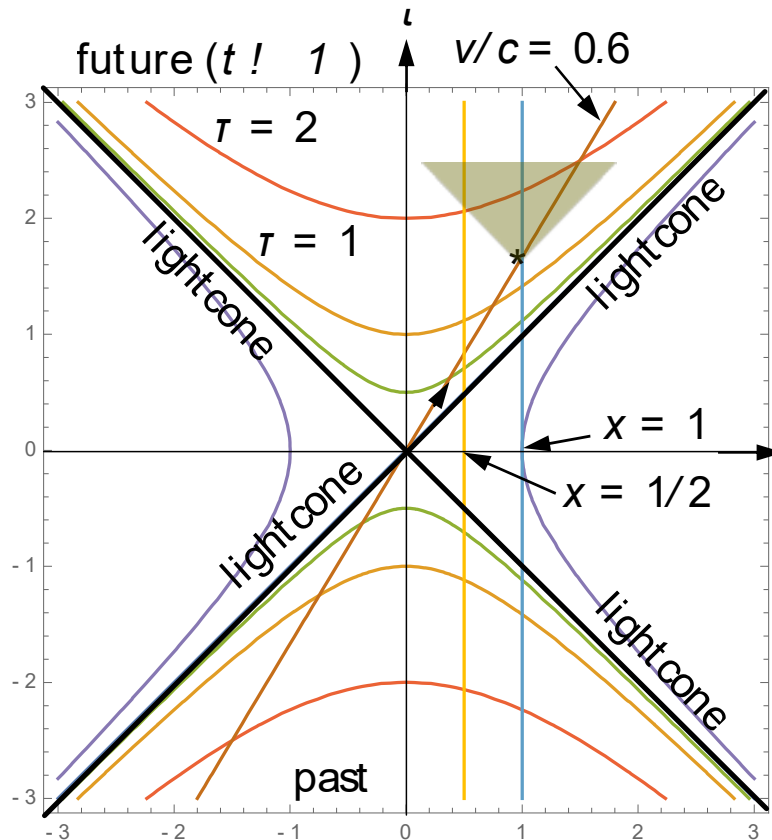


# Bijzonderheden van zwarte gaten

- In een zwart gat vallen is einde verhaal!
- Maar van buiten zie je alles naar de *event horizon* vallen
- Bij een roterend zwart gat kun je nog ontsnappen als je tussen ergosphere en event horizon bent. Je kunt dan zelfs energie uit het zwarte gat winnen (Penrose proces).
- Voor een lading zijn er weer andere mogelijkheden. Door de lading van jezelf te veranderen, zou je in principe ook nog kunnen ontsnappen.



# Penrose diagram en black holes



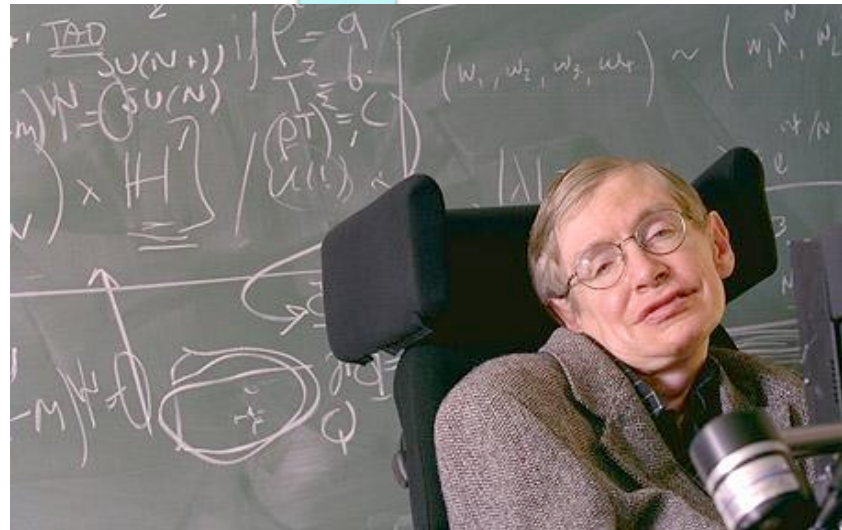
# Quantumgravity

- Quantummechanica  
Golflengte  
Compton/De Broglie

$$\lambda_c = \frac{h}{Mc}$$

- Gravitatie  
Schwarzschild straal

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

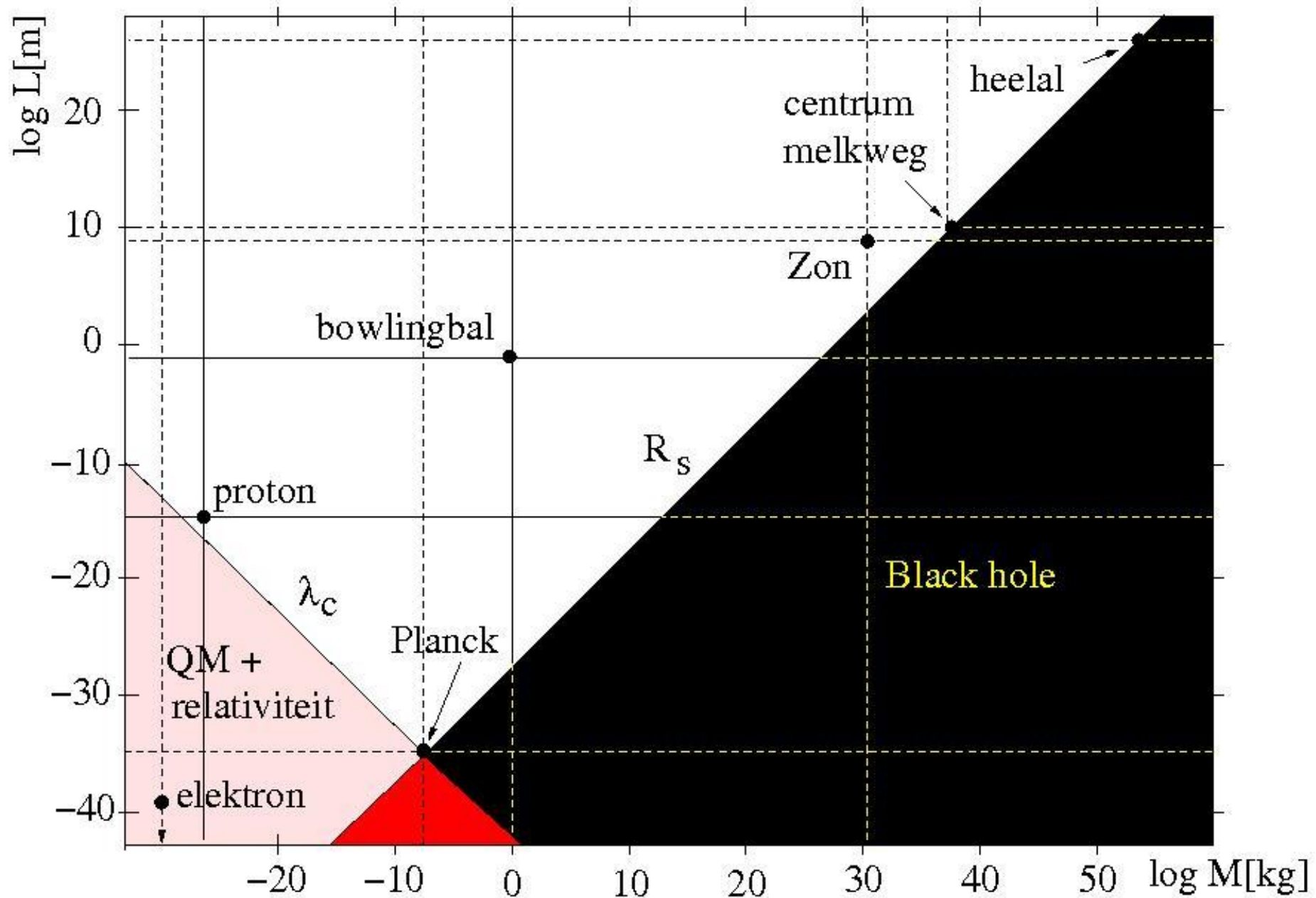


Stephen Hawking

# Quantummechanica en zwarte gaten

- Gaat niet samen
- Probleem is informatieverlies en matching gravitatie (klassiek) en energie-impuls (QM)
- Voor elementaire deeltjes is de Schwarzschild straal  $R_s$  veel kleiner dan de afstand (Compton golflengte  $\lambda_c$ ) waarbij deeltjes en antideeltjes paren kunnen ontstaan.

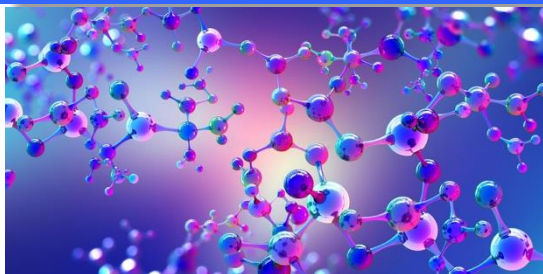
| object       | Massa (kg)            | Afmeting (m)          | $\lambda_c$ (m)       | $R_s$ (m)             |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Zon          | $2,0 \times 10^{30}$  | $1,0 \times 10^6$     |                       | $3,0 \times 10^3$     |
| bal          | 1,0                   | $0,3 \times 10^0$     | $3,5 \times 10^{-43}$ | $1,5 \times 10^{-27}$ |
| Planck massa | $2,0 \times 10^{-8}$  |                       | $1,6 \times 10^{-35}$ | $3,2 \times 10^{-35}$ |
| proton       | $1,7 \times 10^{-27}$ | $1,0 \times 10^{-15}$ | $2,0 \times 10^{-16}$ | $2,5 \times 10^{-54}$ |



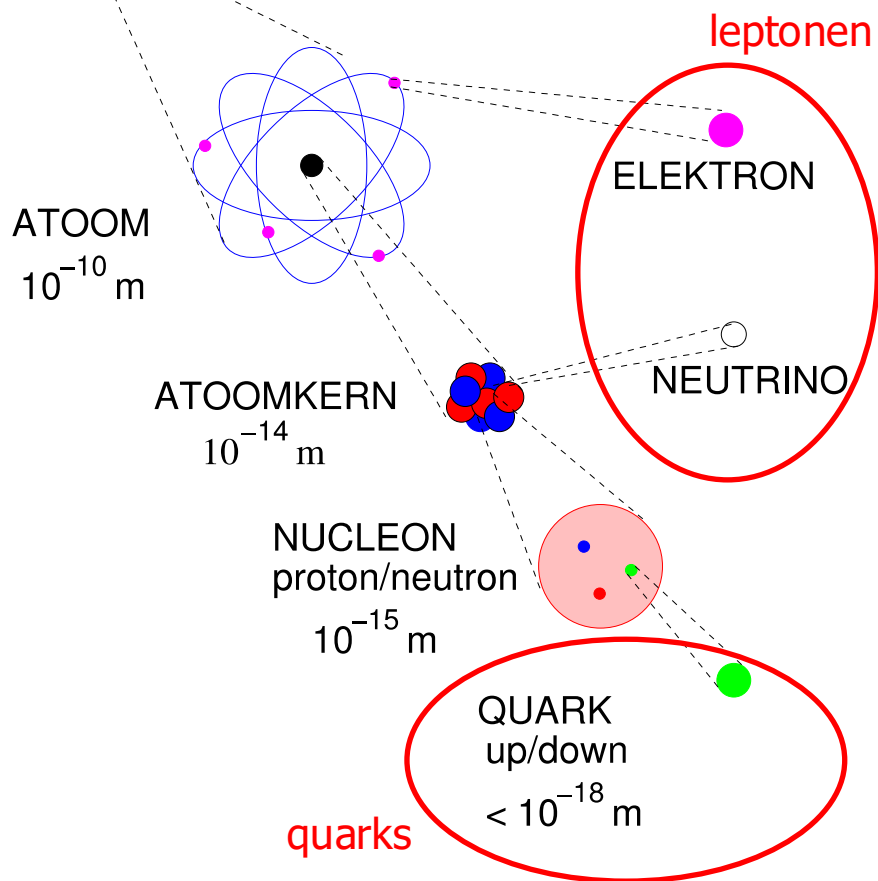


**Andere krachten (SM)**

# WIE HET KLEINE NIET EERT ...



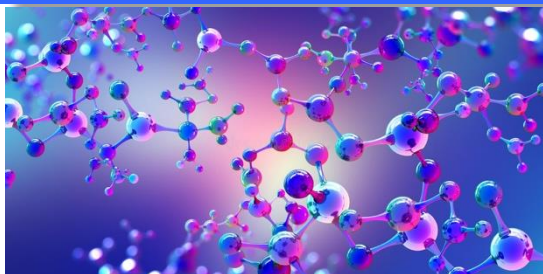
MATERIE



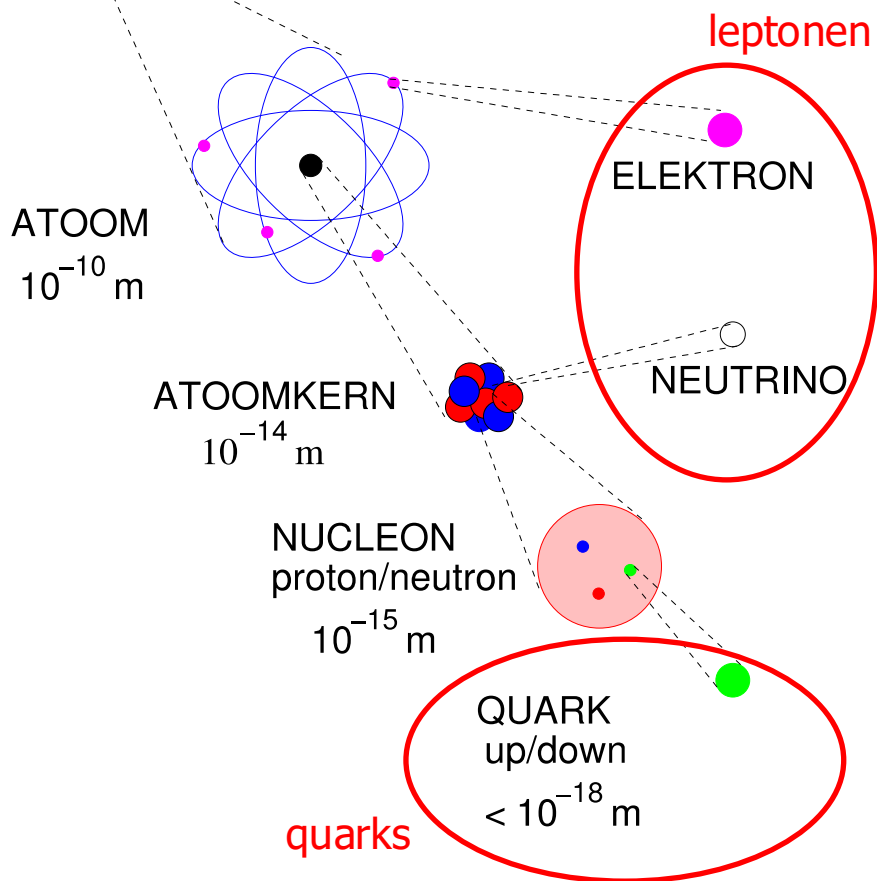
## Standaardmodel van elementaire deeltjes

| Drie generaties materie (fermionen)                                                              |                                                                                   |                                                                                  | Krachtdeeltjes (bosonen)                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| I                                                                                                | II                                                                                | III                                                                              |                                                                                |
| massa<br>lading<br>spin<br>$\sim 2.2 \text{ MeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$<br><b>u</b><br>up       | $\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$<br><b>c</b><br>charm               | $\sim 172.6 \text{ GeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$<br><b>t</b><br>top               | $0$<br>$0$<br>$1$<br><b>g</b><br>gluon                                         |
| <b>QUARKS</b><br>$\sim 4.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$<br><b>d</b><br>down               | $\sim 93 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$<br><b>s</b><br>strange               | $\sim 4.2 \text{ GeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$<br><b>b</b><br>bottom              | $0$<br>$0$<br>$1$<br><b><math>\gamma</math></b><br>foton                       |
| $0.511 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$<br><b><math>e^-</math></b><br>elektron                  | $105.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$<br><b><math>\mu^-</math></b><br>muon     | $1.777 \text{ GeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$<br><b><math>\tau^-</math></b><br>tau    | $91.19 \text{ GeV}/c^2$<br>$0$<br>$1$<br><b><math>Z^0</math></b><br>Z boson    |
| <b>LEPTONEN</b><br>$< 0.8 \text{ eV}/c^2$<br>$0$<br>$L$<br><b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$<br>$0$<br>$L$<br><b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino | $< 18 \text{ MeV}/c^2$<br>$0$<br>$L$<br><b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino | $80.37 \text{ GeV}/c^2$<br>$\pm 1$<br>$1$<br><b>W</b><br>W boson               |
|                                                                                                  |                                                                                   |                                                                                  | <b>HIGGS BOSON</b><br>$125 \text{ GeV}/c^2$<br>$0$<br>$0$<br><b>H</b><br>Higgs |
|                                                                                                  |                                                                                   |                                                                                  | <b>LEPTONEN</b><br><b>LEPTONEN</b>                                             |

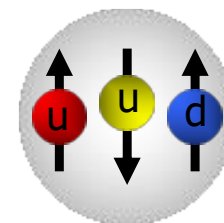
# WIE HET KLEINE NIET EERT ...



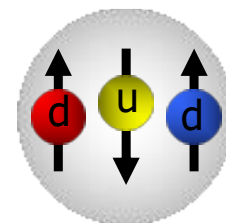
MATERIE



- Leptonen
- Quarks (opgesloten)
- links- of rechtshandig
- Ladingen en bijbehorende krachtdeeltjes (bijvoorbeeld: elektrische lading en foton; maar ook smaken en W-deeltjes)



proton



neutron

nucleonen

## Standaardmodel van elementaire deeltjes

| materie (fermionen)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Krachtdeeltjes (bosonen)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>smaken</b></p> <p><b>QUARKS</b></p> <p><b>I</b></p> <p>massa <math>\sim 2.2 \text{ MeV}/c^2</math><br/>lading <math>+2/3</math><br/>spin <math>1/2</math></p> <p><b>u</b><br/>up</p> <p><math>\sim 4.7 \text{ MeV}/c^2</math><br/><math>-1/3</math><br/><math>1/2</math></p> <p><b>d</b><br/>down</p> <p><b>LEPTONEN</b></p> <p><math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math><br/><math>-1</math><br/><math>1/2</math></p> <p><b>e<sup>-</sup></b><br/>elektron</p> <p><math>&lt; 0.8 \text{ eV}/c^2</math><br/><math>0</math><br/><math>L</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b><br/>neutrino</p> | <p><b>IJKBOSONEN</b></p> <p><math>0</math><br/><math>0</math><br/><math>1</math></p> <p><b>g</b><br/>gluon</p> <p><math>0</math><br/><math>0</math><br/><math>1</math></p> <p><b><math>\gamma</math></b><br/>foton</p> <p><math>91.19 \text{ GeV}/c^2</math><br/><math>0</math><br/><math>1</math></p> <p><b>Z<sup>0</sup></b><br/>Z boson</p> <p><math>80.37 \text{ GeV}/c^2</math><br/><math>\pm 1</math><br/><math>1</math></p> <p><b>W</b><br/>W boson</p> |

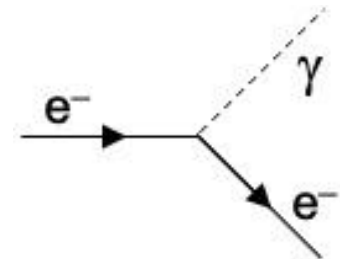
# LADINGEN EN KRACHTDEELTJES

- Toestanden in quantum wereld
  - Gekenmerkt door quantumgetallen en fases
  - Energie  $E$ , impuls  $p$ , lading  $q \leftrightarrow$  tijd  $t$ , ruimte  $x$ , ijkveld  $A$
  - Quantum fases
- Events in ruimte en tijd
  - ijkvelden  $A$  hangen van plaats en tijd af, dus  $A(t,x)$
  - Dit vertaald zich naar quantumveldentheorie met **vertices**
  - ijkboson voelt lading of neemt lading mee
  - ijkboson draagt energie en impuls over of neemt die mee
- Voorbeeld is het foton, gevoelig voor elektrische lading
  - elektron kan foton uitzenden (emissie)
  - Hierbij wordt energie en impuls van electron overgedragen naar foton, maar met inachtneming van energie- en impuls-behoud
- Rigoreuze wiskundige aanpak is equivalent met combinaties van vertices (Feynman diagrammen)

$$e^{-iEt/\hbar}$$

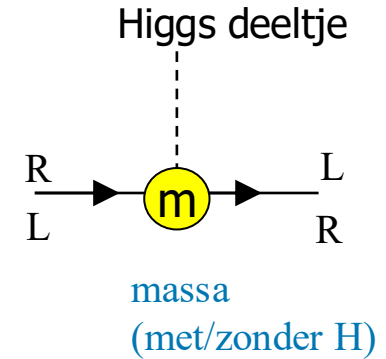
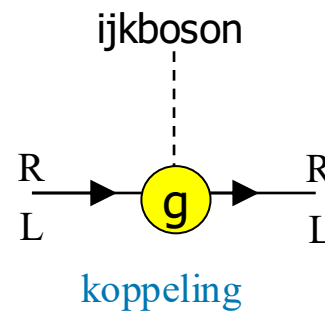
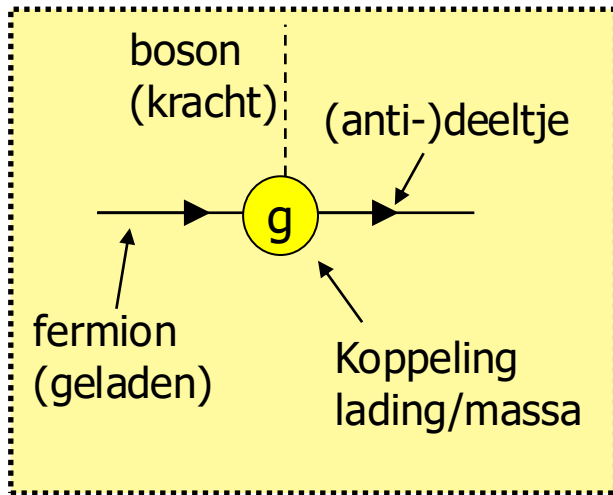
$$e^{+ipx/\hbar}$$

$$e^{+iqA/\hbar}$$

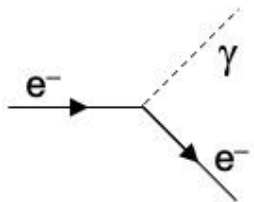


# KRACHTDEELTJES

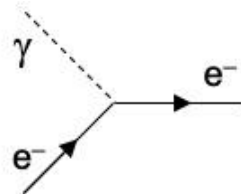
- Manipulatie van fermion vrijheidsgraden en bijbehorende ladingen via koppeling aan bosonen (ijkbosonen en Higgs)



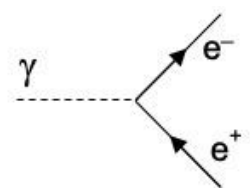
- Rol van ijkbosonen: één getalletje voor meerdere situaties



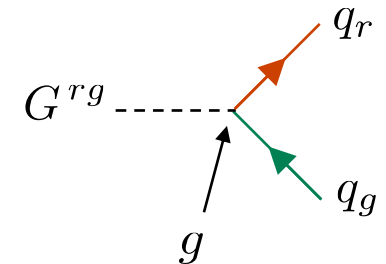
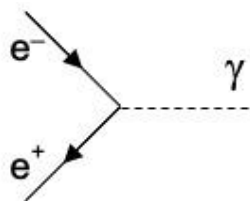
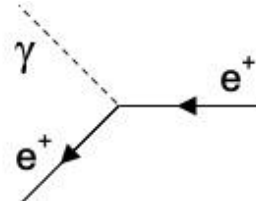
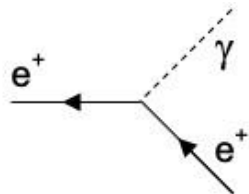
emissie



absorptie

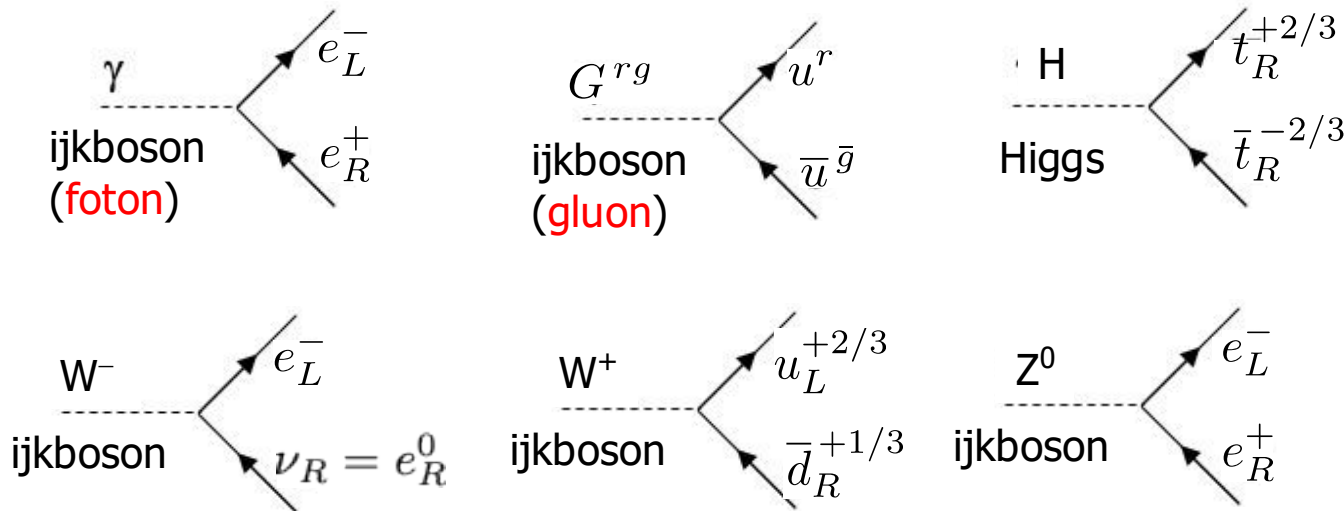


creatie/annihilatie



# LADINGEN EN SYMMETRIEEN IN STANDAARDMODEL

- Vrijheidsgraden/ladingen met chirality and triality
  - Chiraliteit: (L,R) en bijbehorende halftallige/heeltallige heliciteiten/spins
  - Elektrische lading: (+, -) zoals  $(e_R^+, e_R^-)$  of  $(e_L^-, e_L^+)$
  - Isospin lading: (e,  $\nu$ ) of (u, d) zoals  $(e_L^-, e_L^0)$ ,  $(e_R^0, e_R^+)$  of  $(u_L^{+2/3}, d_L^{-1/3})$
  - Kleurladingen: (r, g, b) zoals (u, u, u), etc.
- Koppelingen gevoelig voor chiraliteit, maar ook voor kleuren en elektrozwakke structuur



GWS model van  
Sheldon Glashow,  
Steve Weinberg,  
& Abdus Salam  
voor elektrozwak

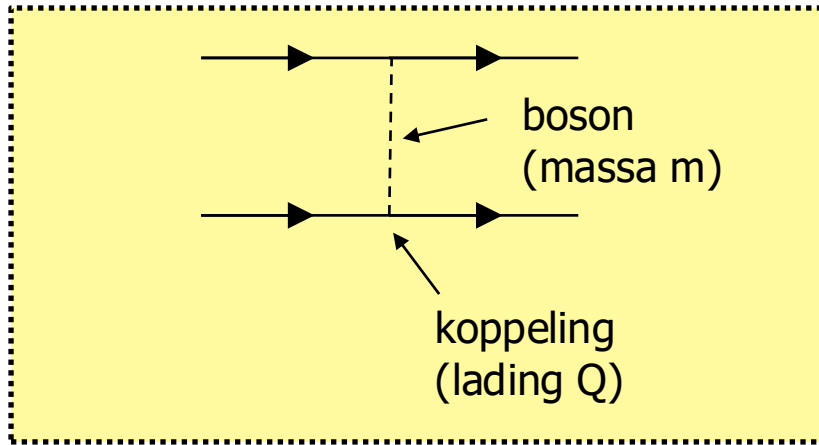
- Koppeling voor ijkbosonen is **lading** van fermion  
Koppeling voor Higgs boson is **massa** van fermion





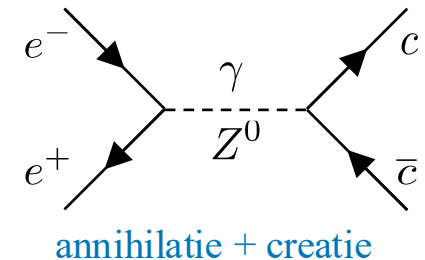
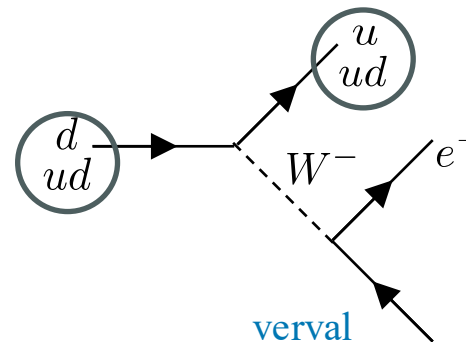
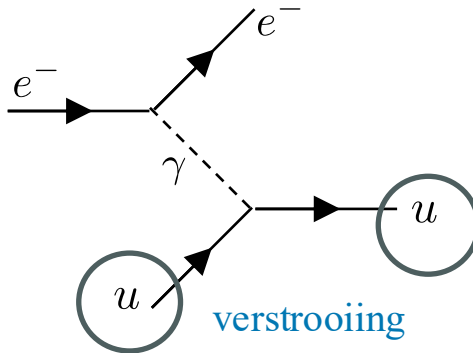
# INTERACTIES VIA UITWISSELINGEN

- Uitwisseling van krachtdeeltjes (met massa  $m$  en  $\lambda_c = \frac{\hbar}{mc}$ ) leidt tot kracht



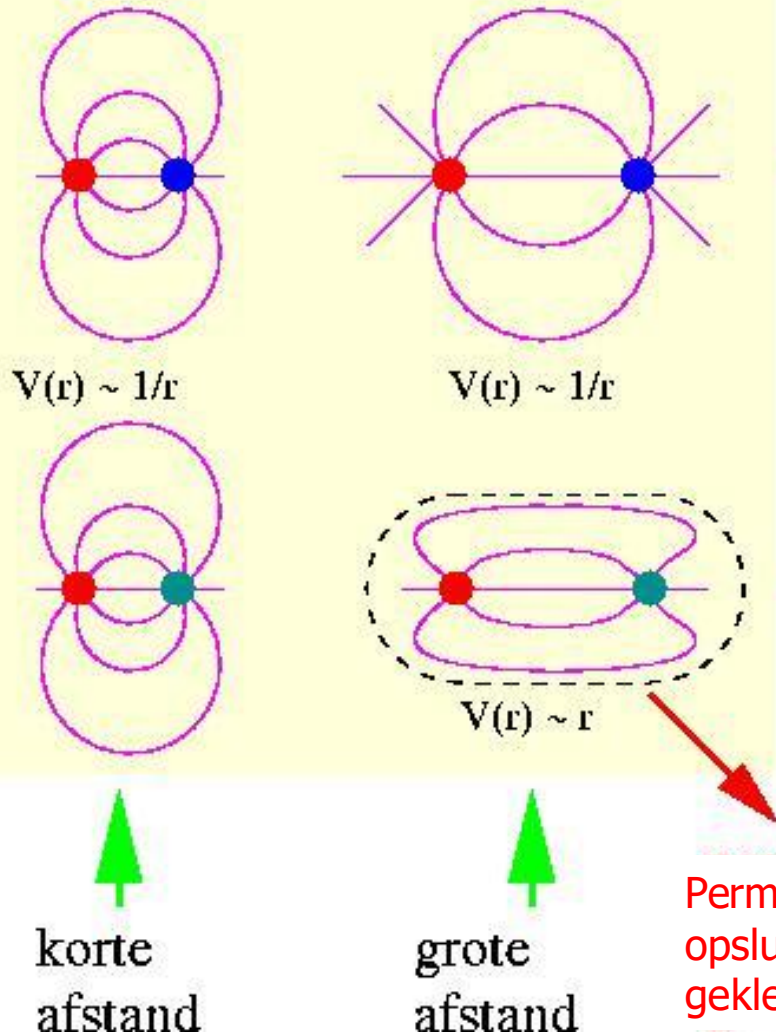
3D wereld:  $V(r) \sim -\frac{Q^2}{4\pi} \frac{e^{-r/\lambda_c}}{r}$   
 $\xrightarrow{m \rightarrow 0} -\frac{Q^2}{4\pi r}$

1D wereld:  $V(r) \sim T_0 \lambda_c (1 - e^{-r/\lambda_c})$   
 $\xrightarrow{m \rightarrow 0} T_0 r$



Rekenen met krachtdeeltjes  
Richard Feynman

# VAN QED NAAR QUANTUMCHROMODYNAMICA (QCD)



1 elektrische lading  
(positief en negatief)  
1 krachtdeeltje (foton)

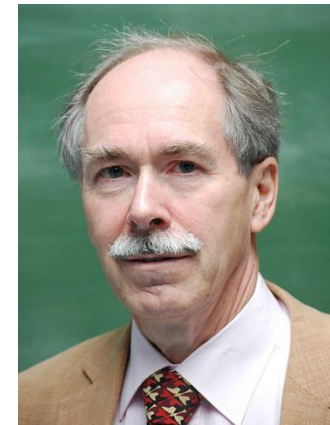
Quantumelektrodynamica (QED)

3 kleurladingen  
(kleur en anti-kleur)  
8 krachtdeeltjes (gluonen)

QCD

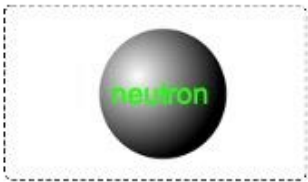
Permanente  
opsluiting van  
gekleurde quarks

Veld correspondeert met  
constante kracht  
 $T_0 = 1 \text{ GeV/fm} = 20 \text{ Ton}$

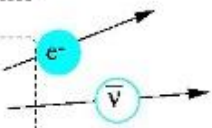
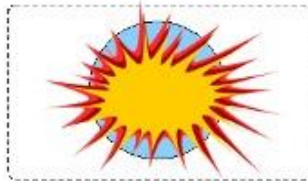


Martinus Veltman & Gerard 't Hooft  
Rekenen met zware W en Z-  
deeltjes en gluonen

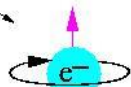
# NEUTRINOS DUIKEN OP IN ZWAK VERVAL VAN DEELTJES



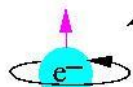
Na 15 min  
( $\tau_n = 877,8 \text{ s}$ )



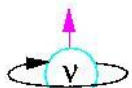
elektron



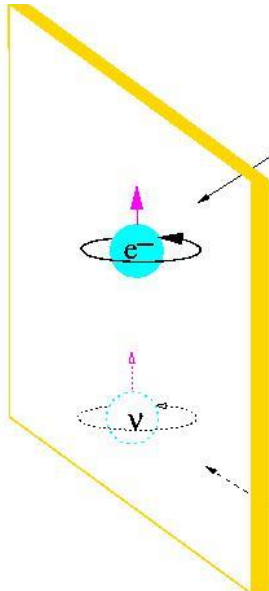
rechtshandig  
elektron



linkshandig  
neutrino

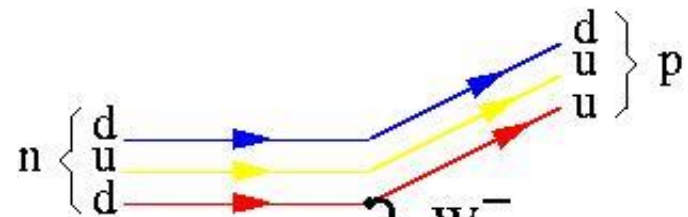
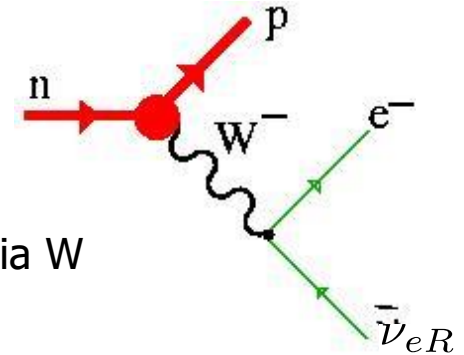


~~rechtshandig  
neutrino~~



Neutron beta-verval via W

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Op niveau van quarks

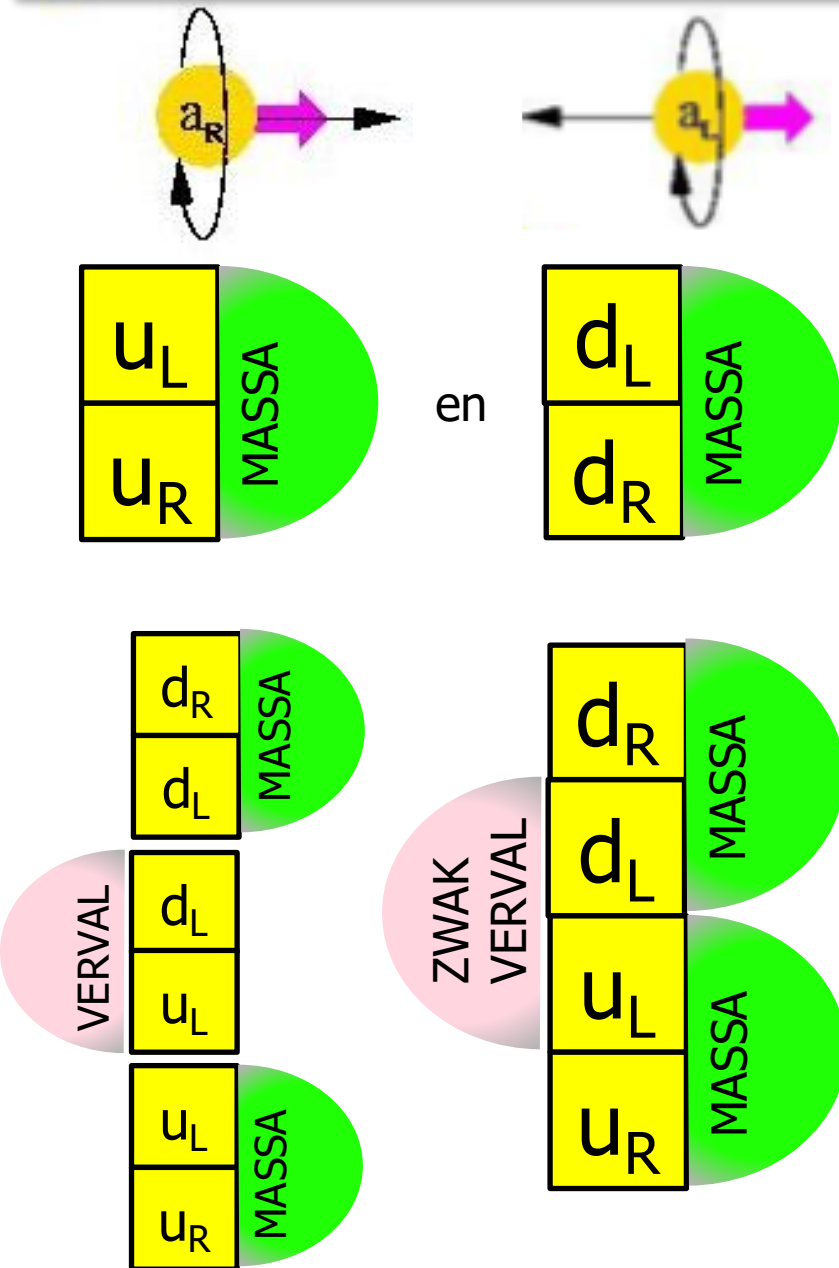
$$d_L \rightarrow u_L + W^-$$

$$\rightarrow u_L + e_L^- + \bar{\nu}_{eR}$$

Gebroken spiegelsymmetrie:

- Elektron kan linkshandig of rechtshandig zijn
- neutrino bestaat alleen linkshandig
- anti-neutrino bestaat alleen rechtshandig

# GEBROKEN SPIEGELSYMMETRIE EN CHIRALITEIT



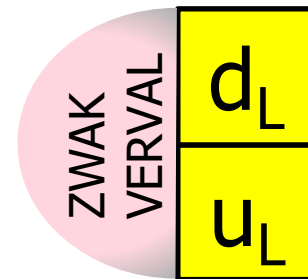
Deeltjes **met massa** hebben twee rotatiemogelijkheden, parallel of anti-parallel aan bewegings-richting (heliciteiten), die combinaties van links- en rechtshandig zijn

Quarks en leptonen met massa komen in twee **chiraliteiten**, links- en rechtshandig

Alleen linkhandig deeltjes (en rechts-handig anti-deeltjes) koppelen aan  $W^\pm$

$$d_L \longrightarrow u_L + W^-$$

$$\longrightarrow u_L + e_L^- + \bar{\nu}_{eR}$$



Probleem:

**We missen een rechtshandig neutrino (en linkshandig anti-neutrino), dus geen massa voor neutrinos, hoe zit dat?**

**rol van drie generaties**

# DRIE GENERATIES VAN MATERIEDEELTJES

## Standaardmodel van elementaire deeltjes

Drie generaties materie  
(fermionen)

Krachtdeeltjes  
(bosonen)

|                         | I                                             | II                                             | III                                             |                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| massa<br>lading<br>spin | $\sim 2.2 \text{ MeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$ | $\sim 1.27 \text{ GeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$ | $\sim 172.6 \text{ GeV}/c^2$<br>$+2/3$<br>$1/2$ | 0<br>0<br>1                             |
|                         | <b>u</b><br>up                                | <b>c</b><br>charm                              | <b>t</b><br>top                                 | <b>g</b><br>gluon                       |
| QUARKS                  | $\sim 4.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$ | $\sim 93 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$   | $\sim 4.2 \text{ GeV}/c^2$<br>$-1/3$<br>$1/2$   | 0<br>0<br>1                             |
|                         | <b>d</b><br>down                              | <b>s</b><br>strange                            | <b>b</b><br>bottom                              | $\gamma$<br>foton                       |
|                         | $0.511 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$      | $105.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$       | $1.777 \text{ GeV}/c^2$<br>$-1$<br>$1/2$        | $91.19 \text{ GeV}/c^2$<br>0<br>1       |
|                         | <b>e<sup>-</sup></b><br>elektron              | <b><math>\mu^-</math></b><br>muon              | <b><math>\tau^-</math></b><br>tau               | <b>Z<sup>0</sup></b><br>Z boson         |
| LEPTONEN                | $< 0.8 \text{ eV}/c^2$<br>0<br>L              | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$<br>0<br>L             | $< 18 \text{ MeV}/c^2$<br>0<br>L                | $80.37 \text{ GeV}/c^2$<br>$\pm 1$<br>1 |
|                         | <b><math>\nu_e</math></b><br>neutrino         | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>neutrino        | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>neutrino        | <b>W</b><br>W boson                     |
|                         |                                               |                                                |                                                 | <b>H</b><br>Higgs                       |

Enorme verschillen  
in massa's tussen en  
binnen generaties!



# WAAR ZIJN DE ZWARE DEELTJES GEBLEVEN?

## ■ QUARKS (OPGESLOTEN IN BARYONEN EN MESONEN)

- top  $\rightarrow$  bottom +  $W^+$   $\tau \approx 0,5 \times 10^{-24}$  s
- ! bottom  $\rightarrow$  charm +  $W^-$   $\tau \approx 1,5 \times 10^{-12}$  s
- charm  $\rightarrow$  strange +  $W^+$   $\tau \sim 10^{-12}$  s
- ! strange  $\rightarrow$  up +  $W^-$   $\tau \sim 10^{-10}$  s
- down  $\rightarrow$  up +  $W^- \rightarrow$  up +  $e^- + \nu_e$

## ■ LEPTONEN

- $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + W^- \rightarrow \nu_\tau + \square$   $\tau \approx 0,3 \times 10^{-12}$  s
- $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \nu_e$   $\tau \approx 2,2 \times 10^{-6}$  s

## ■ KRACHTDEELTJES

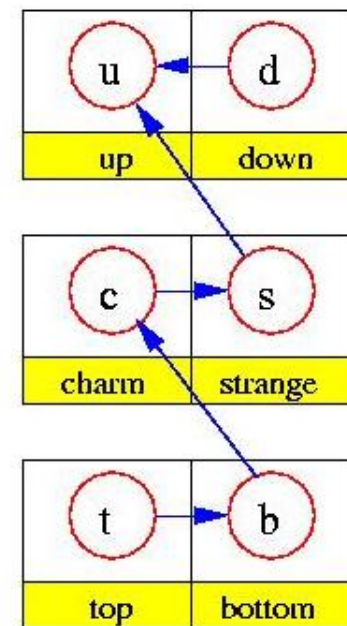
- $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$  of  $\mu^- + \bar{\nu}_\mu$  of  $\tau^- + \bar{\nu}_\tau$  of  $s + \bar{c}$  of  $d + \bar{u}$   $\tau \approx 3,1 \times 10^{-25}$  s
- $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$  of  $\mu^+ + \nu_\mu$  of  $\tau^+ + \nu_\tau$  of  $c + \bar{s}$  of  $u + \bar{d}$   $\tau \approx 3,1 \times 10^{-25}$  s
- $Z \rightarrow$  quark + anti-quark, lepton + anti-lepton  $\tau \approx 2,6 \times 10^{-25}$  s

## ■ HIGGS

- Higgs  $\rightarrow$  bottom + anti-bottom  $\tau \approx 1,6 \times 10^{-22}$  s

## ■ STABIELE DEELTJES

- proton (en bijna neutron met  $\tau_{1/2} \approx 880$  s)
- elektron en alle drie soorten neutrinos
- foton



Verval tussen generaties vereist:

- Verval  $d \rightarrow u$ ,  $c \rightarrow s$ ,  $t \rightarrow b$  ok
- Maar i.h.b. ook  $b \rightarrow c$  en  $s \rightarrow u$

# QUANTUM MIXING BIJ VERVAL VAN QUARKS $b \rightarrow c$ EN $s \rightarrow u$

## QUANTUM MIXING

$$\begin{aligned} d'_L &= 0,97 d_L + 0,23 s_L + \dots b_L \\ s'_L &= -0,23 d_L + 0,97 s_L + 0,04 b_L \\ b'_L &= \dots d_L + 0,04 s_L + 0,998 b_L \end{aligned}$$

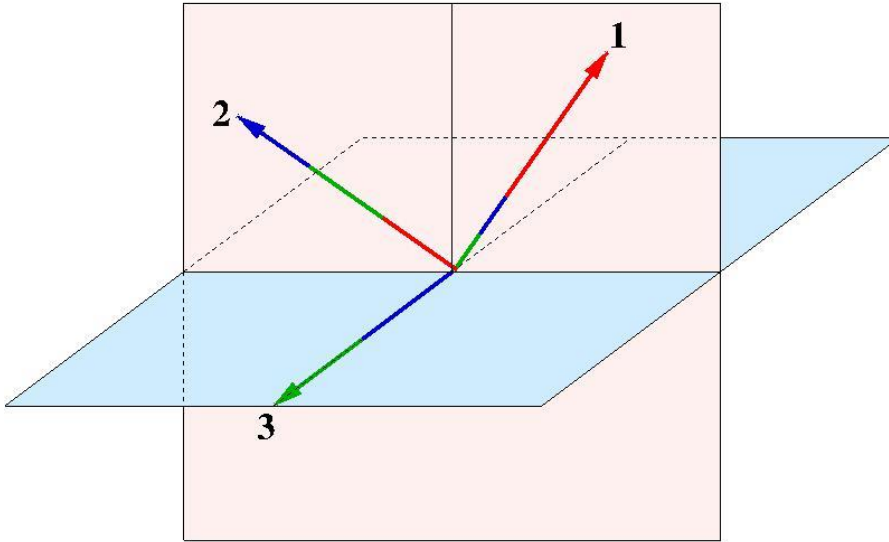
## PERCENTAGES

|        | $d_L$ | $s_L$ | $b_L$ |
|--------|-------|-------|-------|
| $d'_L$ | 0,94  | 0,06  | ...   |
| $s'_L$ | 0,06  | 0,94  | 0,002 |
| $b'_L$ | ...   | 0,002 | 0,998 |

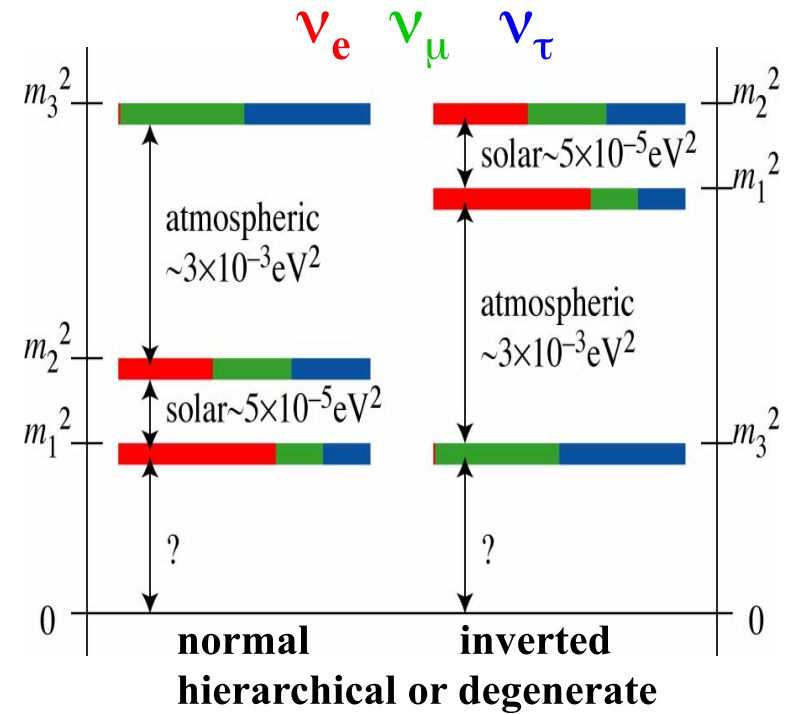
s-quark is een beetje  $d'$  ( $\sim 6\%$ ), die vervalt naar u  
b-quark is een beetje  $s'$  ( $\sim 0,2\%$ ) die vervalt naar c

|        |              |              |              |       |
|--------|--------------|--------------|--------------|-------|
| MIXING | $d_R$        | $s_R$        | $b_R$        | MASSA |
|        | $d_L$        | $s_L$        | $b_L$        |       |
|        | $d'_L$       | $s'_L$       | $b'_L$       |       |
| VERVAL | $u_L$        | $c_L$        | $t_L$        | MASSA |
|        | $u_L$        | $c_L$        | $t_L$        |       |
|        | $u_R$        | $c_R$        | $t_R$        |       |
| MIXING | $\bar{u}_R$  | $\bar{c}_R$  | $\bar{t}_R$  | MASSA |
|        | $\bar{u}_L$  | $\bar{c}_L$  | $\bar{t}_L$  |       |
|        | $\bar{u}_L$  | $\bar{c}_L$  | $\bar{t}_L$  |       |
| VERVAL | $\bar{d}'_L$ | $\bar{s}'_L$ | $\bar{b}'_L$ | MASSA |
|        | $\bar{d}'_L$ | $\bar{s}'_L$ | $\bar{b}'_L$ |       |
|        | $\bar{d}_L$  | $\bar{s}_L$  | $\bar{b}_L$  |       |
| MIXING | $\bar{d}_L$  | $\bar{s}_L$  | $\bar{b}_L$  | MASSA |
|        | $\bar{d}_L$  | $\bar{s}_L$  | $\bar{b}_L$  |       |
|        | $\bar{d}_R$  | $\bar{s}_R$  | $\bar{b}_R$  |       |

# OSCILLATIES VAN NEUTRINO-SOORTEN VEREIST MASSA



Massa's:



(lichte voorkeur)

**Puzzle: neutrino massa's**

# FAMILIE COMPLICATIES

|        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| MIXING | $d_R$  | $s_R$  | $b_R$  | MASSA  |
|        | $d_L$  | $s_L$  | $b_L$  |        |
| =      | $d'_L$ | $s'_L$ | $b'_L$ | VERVAL |
|        | $u_L$  | $c_L$  | $t_L$  |        |
|        | $u_L$  | $c_L$  | $t_L$  | MASSA  |
|        | $u_R$  | $c_R$  | $t_R$  |        |

|        |              |              |              |        |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------|
| =      | $\bar{u}_R$  | $\bar{c}_R$  | $\bar{t}_R$  | MASSA  |
|        | $\bar{u}_L$  | $\bar{c}_L$  | $\bar{t}_L$  |        |
| MIXING | $\bar{u}_L$  | $\bar{c}_L$  | $\bar{t}_L$  | VERVAL |
|        | $\bar{d}'_L$ | $\bar{s}'_L$ | $\bar{b}'_L$ |        |
|        | $\bar{d}_L$  | $\bar{s}_L$  | $\bar{b}_L$  | MASSA  |
|        | $\bar{d}_R$  | $\bar{s}_R$  | $\bar{b}_R$  |        |

QUARKS

|        |            |               |                |        |
|--------|------------|---------------|----------------|--------|
| =      | $e_R^-$    | $\mu_R^-$     | $\tau_R^-$     | MASSA  |
|        | $e_L^-$    | $\mu_L^-$     | $\tau_L^-$     |        |
| MIXING | $e_L^-$    | $\mu_L^-$     | $\tau_L^-$     | VERVAL |
|        | $\nu_{eL}$ | $\nu_{\mu L}$ | $\nu_{\tau L}$ |        |
|        | $\nu_{1L}$ | $\nu_{2L}$    | $\nu_{3L}$     | MASSA  |
|        | $\nu_{1R}$ | $\nu_{2R}$    | $\nu_{3R}$     |        |

|        |                  |                     |                      |        |
|--------|------------------|---------------------|----------------------|--------|
| MIXING | $\bar{\nu}_{1L}$ | $\bar{\nu}_{2L}$    | $\bar{\nu}_{3L}$     | MASSA  |
|        | $\bar{\nu}_{1R}$ | $\bar{\nu}_{2R}$    | $\bar{\nu}_{3R}$     |        |
| =      | $\bar{\nu}_{eR}$ | $\bar{\nu}_{\mu R}$ | $\bar{\nu}_{\tau R}$ | VERVAL |
|        | $e_R^+$          | $\mu_R^+$           | $\tau_R^+$           |        |
|        | $e_R^+$          | $\mu_R^+$           | $\tau_R^+$           | MASSA  |
|        | $e_L^+$          | $\mu_L^+$           | $\tau_L^+$           |        |

LEPTONEN

# FAMILIE COMPLICATIES

|        |              |              |              |        |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------|
| MIXING | $d_R$        | $s_R$        | $b_R$        | MASSA  |
|        | $d_L$        | $s_L$        | $b_L$        |        |
| =      | $d'_L$       | $s'_L$       | $b'_L$       | VERVAL |
|        | $u_L$        | $c_L$        | $t_L$        |        |
| MASSA  | $u_L$        | $c_L$        | $t_L$        | MASSA  |
|        | $u_R$        | $c_R$        | $t_R$        |        |
| =      | $\bar{u}_R$  | $\bar{c}_R$  | $\bar{t}_R$  | MASSA  |
|        | $\bar{u}_L$  | $\bar{c}_L$  | $\bar{t}_L$  |        |
| MIXING | $\bar{u}_L$  | $\bar{c}_L$  | $\bar{t}_L$  | VERVAL |
|        | $\bar{d}'_L$ | $\bar{s}'_L$ | $\bar{b}'_L$ |        |
| MASSA  | $\bar{d}_L$  | $\bar{s}_L$  | $\bar{b}_L$  | MASSA  |
|        | $\bar{d}_R$  | $\bar{s}_R$  | $\bar{b}_R$  |        |

QUARKS

Oplossing: Majorana neutrino's  
( $\nu = \bar{\nu}$ )

|        |                  |                     |                      |        |
|--------|------------------|---------------------|----------------------|--------|
| =      | $e_R^-$          | $\mu_R^-$           | $\tau_R^-$           | MASSA  |
|        | $e_L^-$          | $\mu_L^-$           | $\tau_L^-$           |        |
| MIXING | $e_L^-$          | $\mu_L^-$           | $\tau_L^-$           | VERVAL |
|        | $\nu_{eL}$       | $\nu_{\mu L}$       | $\nu_{\tau L}$       |        |
| MASSA  | $\nu_{1L}$       | $\nu_{2L}$          | $\nu_{3L}$           | MASSA  |
|        | $\nu_{1R}$       | $\nu_{2R}$          | $\nu_{3R}$           |        |
| MIXING | $\bar{\nu}_{eR}$ | $\bar{\nu}_{\mu R}$ | $\bar{\nu}_{\tau R}$ | VERVAL |
|        | $e_R^+$          | $\mu_R^+$           | $\tau_R^+$           |        |
| =      | $e_R^+$          | $\mu_R^+$           | $\tau_R^+$           | MASSA  |
|        | $e_L^+$          | $\mu_L^+$           | $\tau_L^+$           |        |

LEPTONEN

*Dit zit niet in SM formule !*



# SAMENVATTING

## ■ Atomen

- Gerangschikt in kristallen, moleculen, ...
- Elektronen bepalen eigenschappen: binding, geleiding, ...

QUANTUM ELEKTRODYNAMICA  
(QED van der Waalskracht)

## ■ Atoomkernen

- Concentratie van massa
- Isotopen en radioactiviteit
- Sterke kernkracht tussen nucleonen

QCD van der Waalskracht  
(via uitwisseling mesonen)  
ZWAKKE WISSELWERKING

## ■ Nucleonen

- Protonen en neutronen en hun massa
- Quarks als elementaire gekleurde bouwstenen en kleurkrachten

QUANTUM CHROMODYNAMICA  
(opsluiting quarks)

## ■ Drie generaties van deeltjes en antideeltjes

- Van eigenschappen via symmetrieën naar ladingen en krachtdeeltjes
- Het standaardmodel van elementaire deeltjes