

VAN ATOOM TOT KOSMOS

Wie het kleine niet eert ...

Piet Mulders

pjg.mulders@gmail.com

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



European Research Council



Hoofdstuk 6

Met vereende krachten

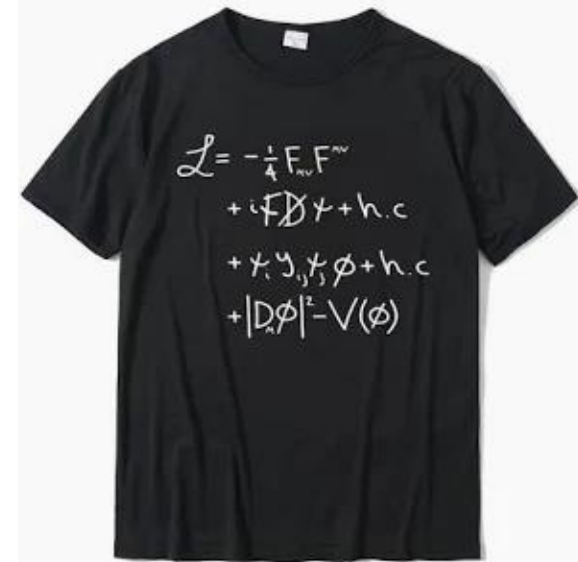
- Elektromagnetisme
- Zwaartekracht

- 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': actie met een eenvoudige (renormeerbare) lagrangiaan
 - Succes van elektrodynamica
- Waar zijn al de zware quarks gebleven?
- De zware en lichte krachtdeeltjes
- De relatieve sterkte van de krachten
- De breking van discrete symmetrieën



Met vereende krachten

Gravitatie en ruimte-tijd

Massa: zwaartekracht

zware
massa

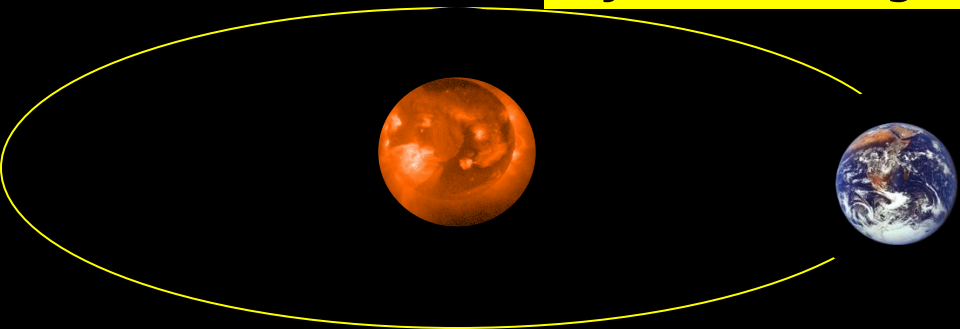
=

trage
massa

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

zwaartekracht

versnelling a_c
bij cirkelbeweging



rotatiesnelheden in galxies

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

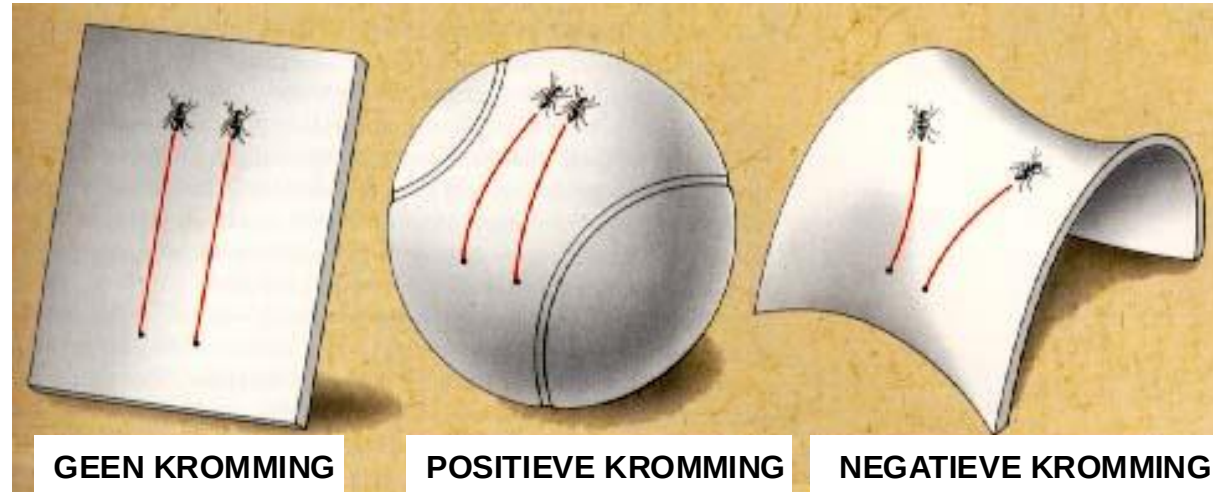
omloopstijden en afstanden
(planeten, dubbelsterren)

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

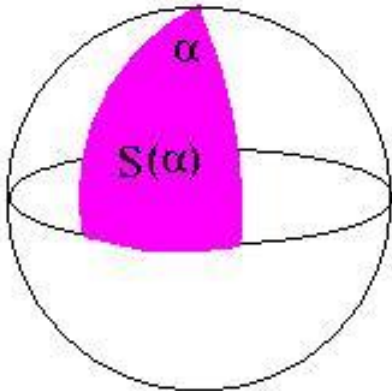
... onafhankelijk van m !!

Massa: kromming van ruimte

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

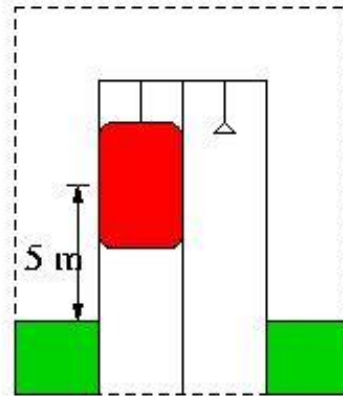
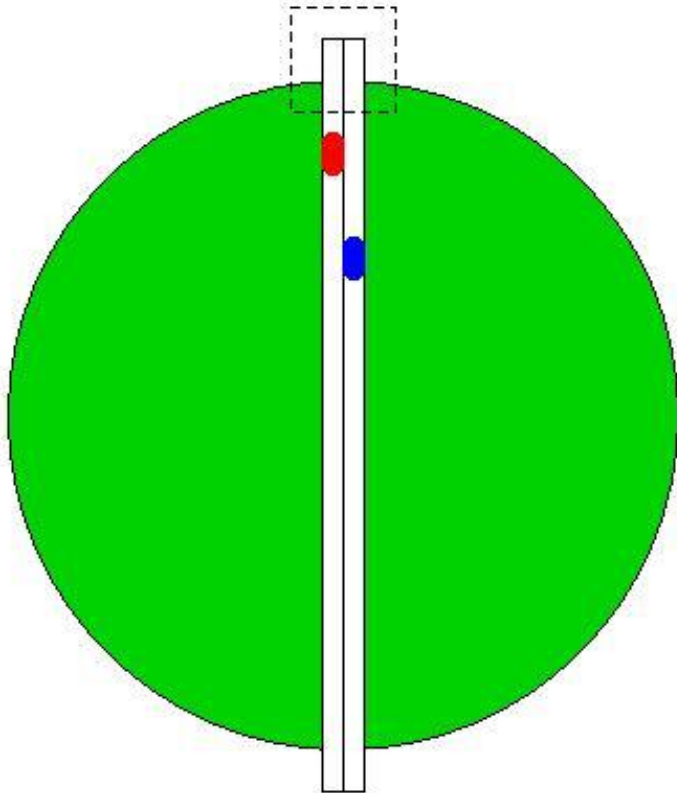


Algemene relativiteitstheorie:
Beweging in zwaartekrachtveld is rechtlijnige beweging in een t.g.v massa gekromde ruimte



- 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!

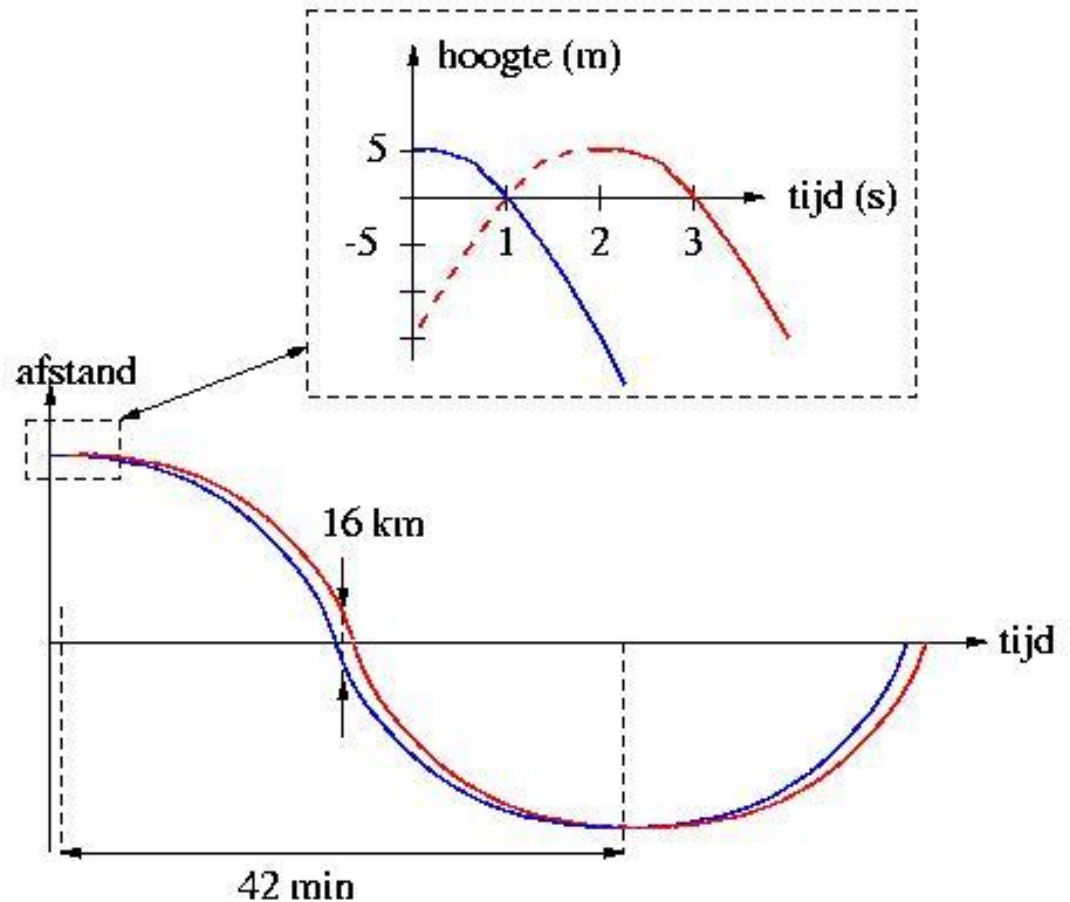
Vergelijk met 'bol' :

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

of

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

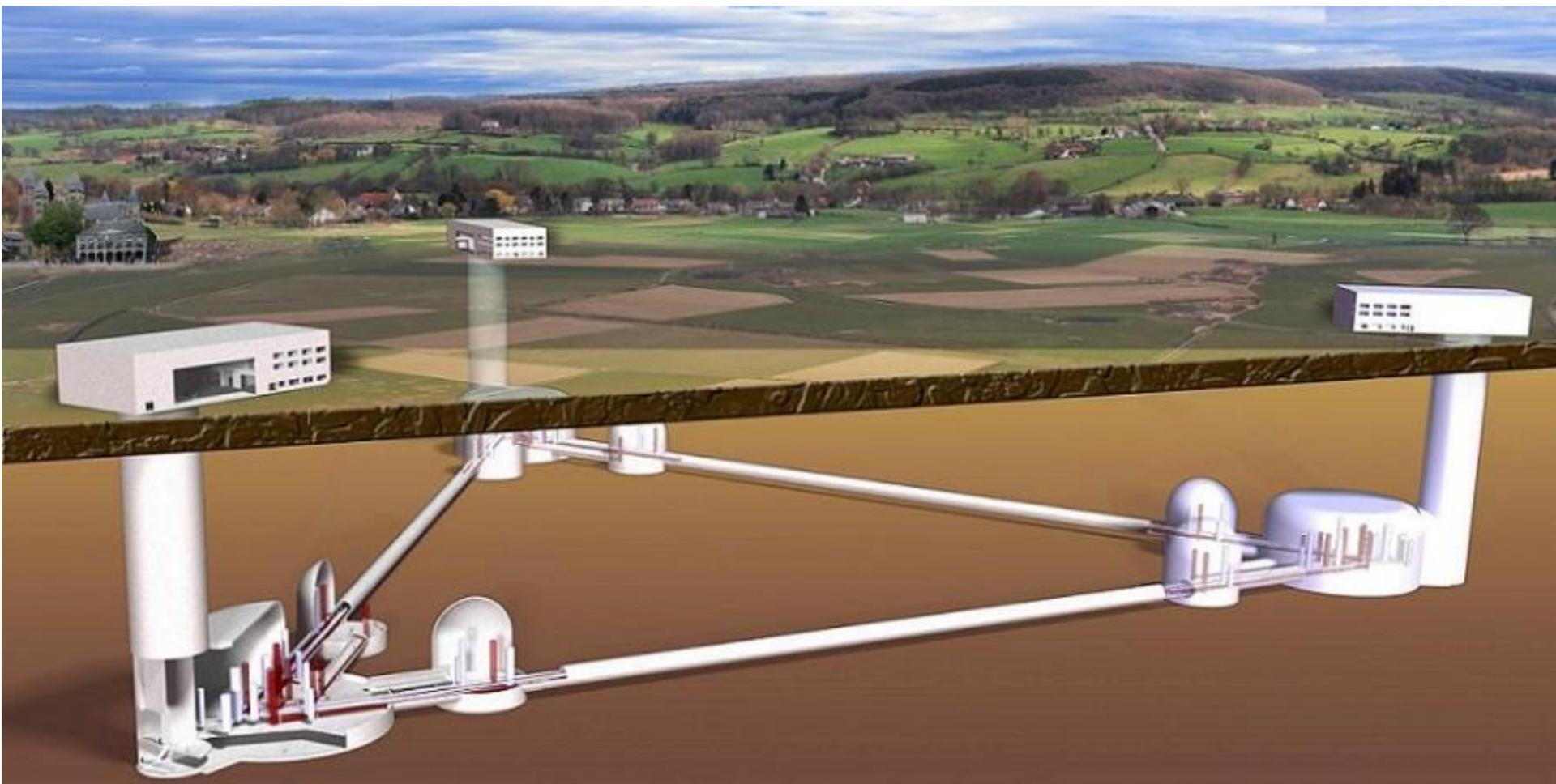
- $R = (16 \text{ km})/\alpha$
 $= 2.4 \times 10^{11} \text{ m}$



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

Bronnen van gravitatiegolven

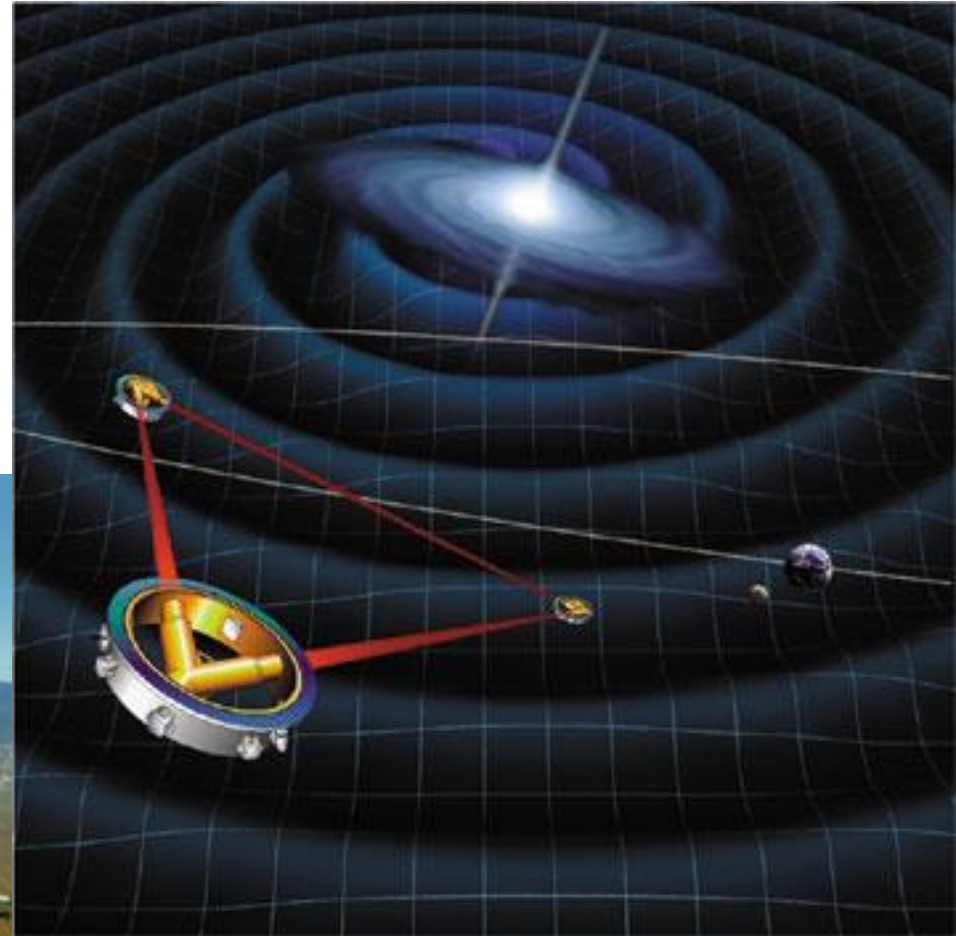
- Op de juiste manier trillende massa-configuratie (kwadрупool trillingen)
- Samensmeltende zwarte gaten: https://youtu.be/I_88S8DWbcU
- Ambitieuze plannen: Einstein telescoop



Gravitatiegolven: trillingen van ruimte en tijd

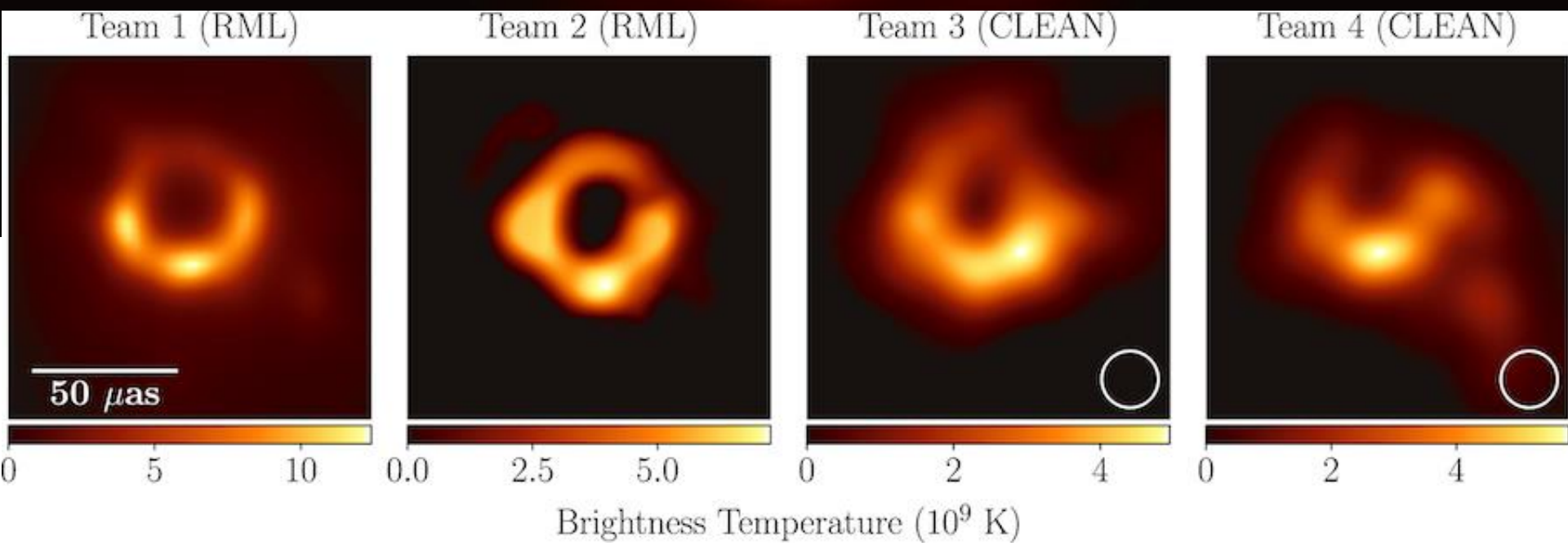


op aarde (LIGO & VIRGO in Pisa)



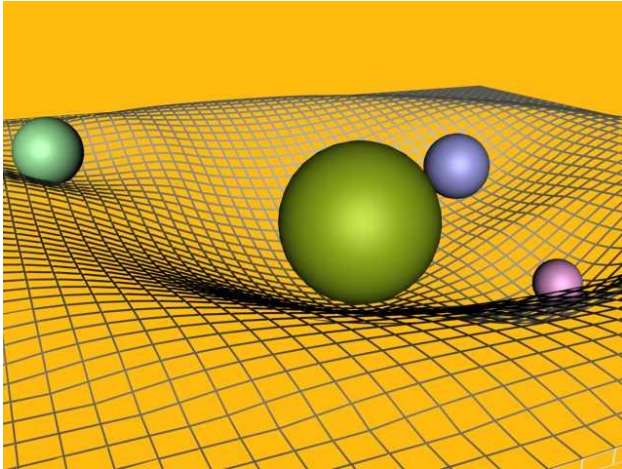
in de ruimte (LISA, to come?)

The black hole in M87

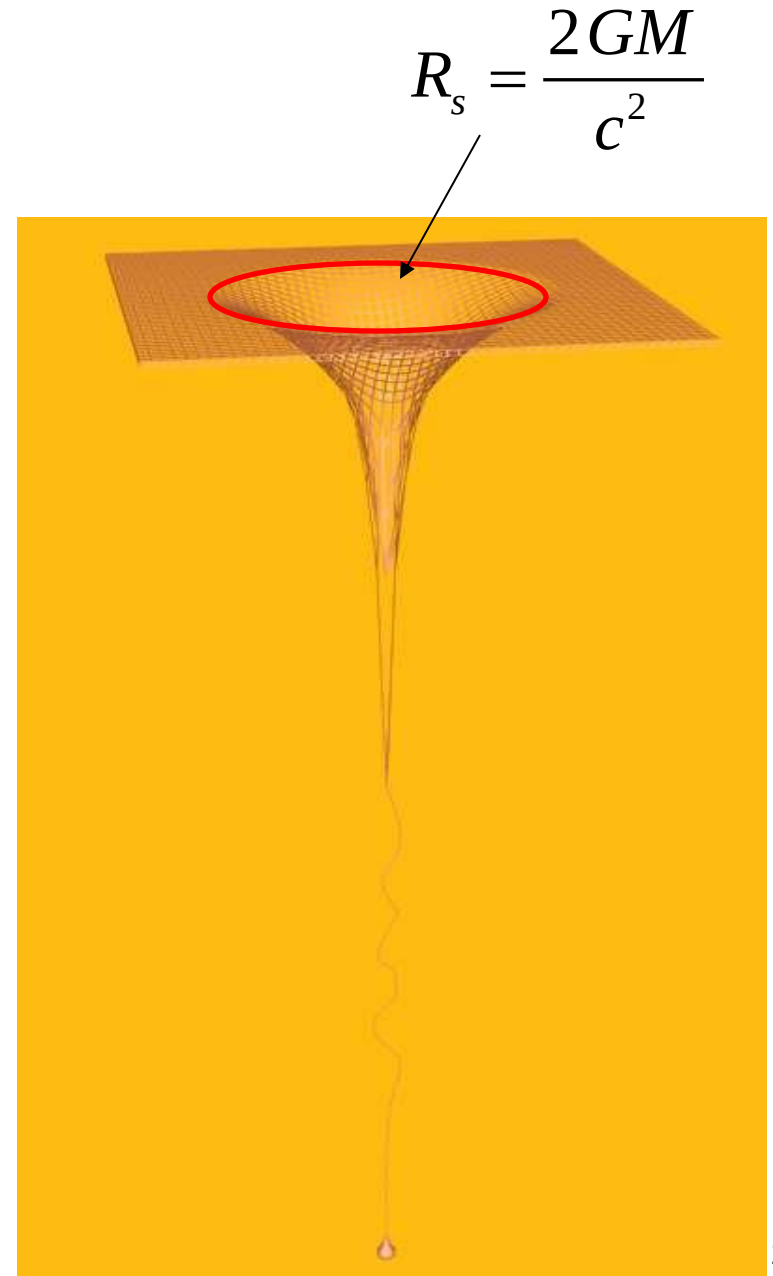


Zwart gat

- Massa kromt ruimte-tijd coördinaten

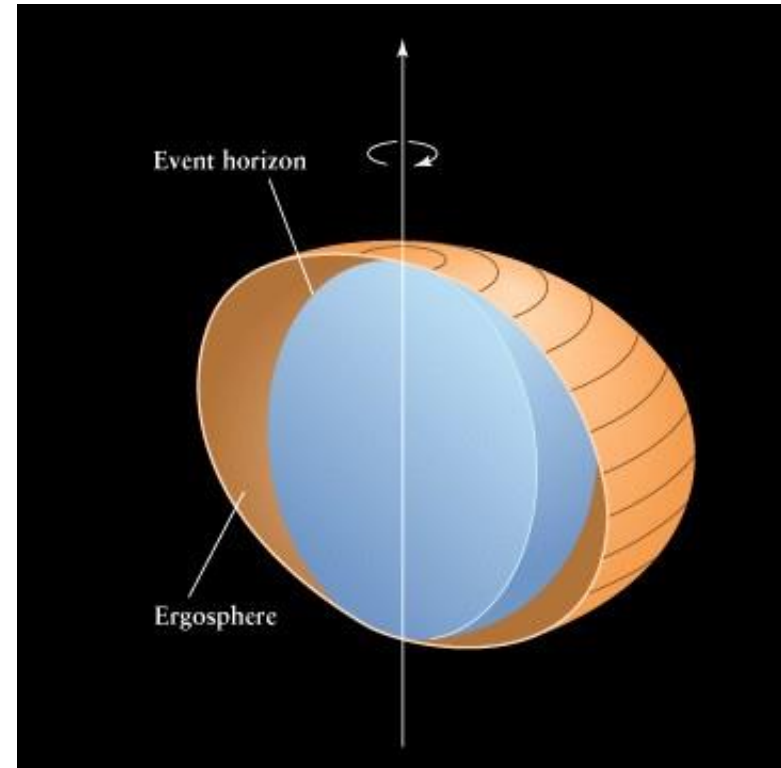


- En bij voldoende massa wordt zelfs licht ingevangen en krijgen we een *zwart gat*
- Eigenschappen
 - Massa M
 - Impulsmoment J
 - Lading Q

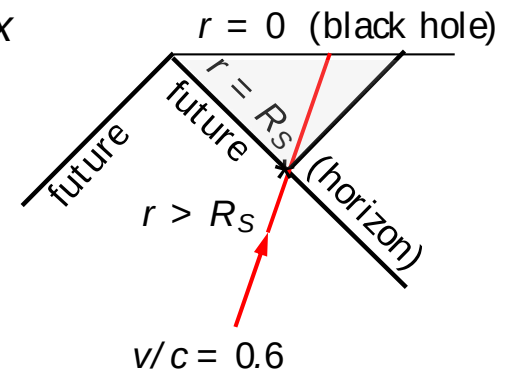
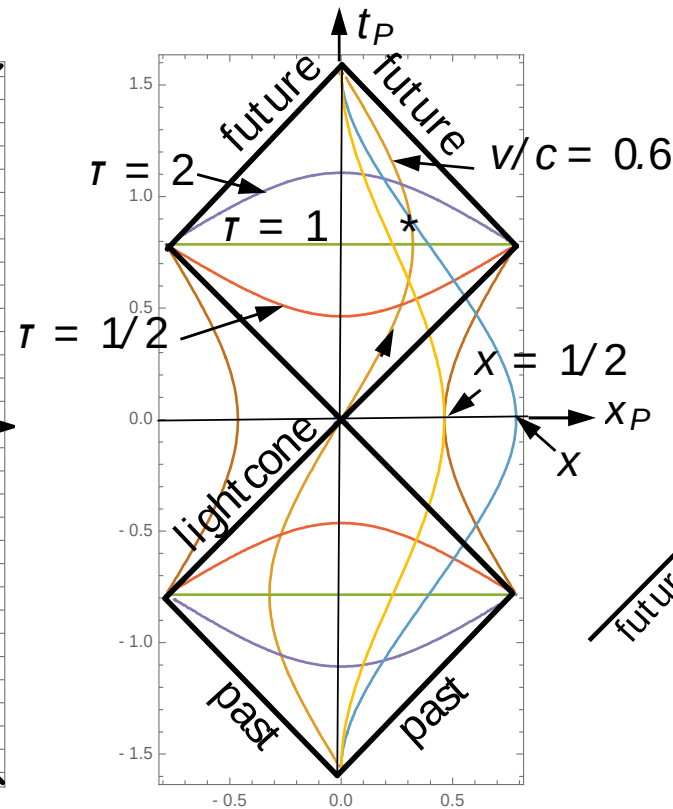
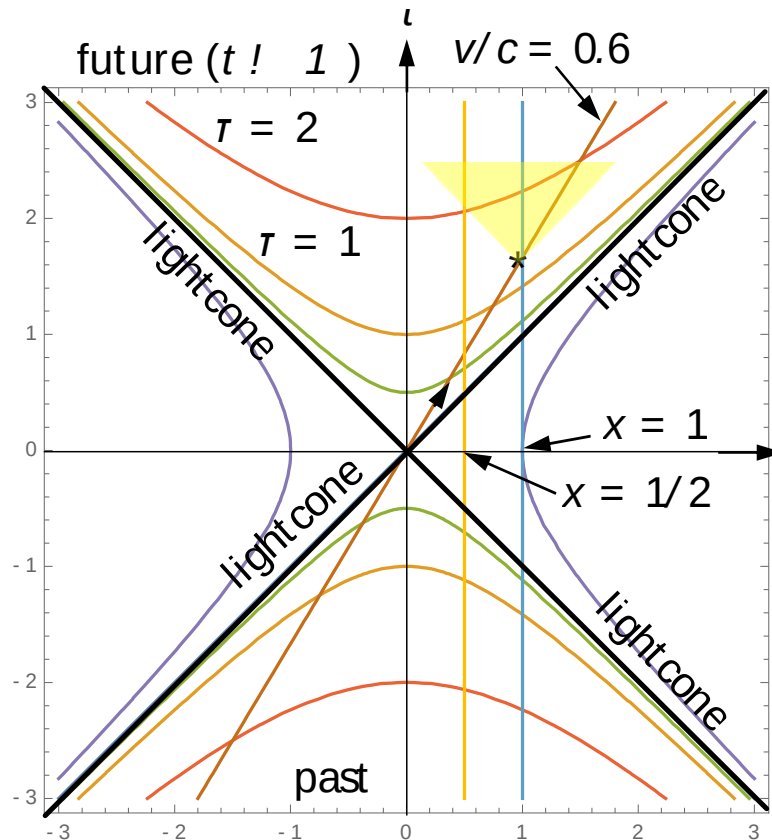


Bijzonderheden van zwarte gaten

- 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



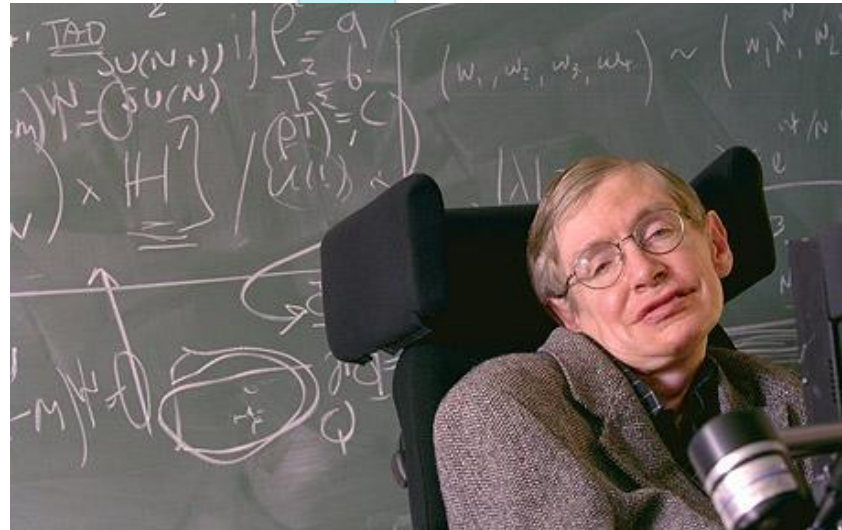
Quantumgravity

- Quantummechanica
Golflengte
Compton/De Broglie

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

- Gravitatie
Schwarzschild straal

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

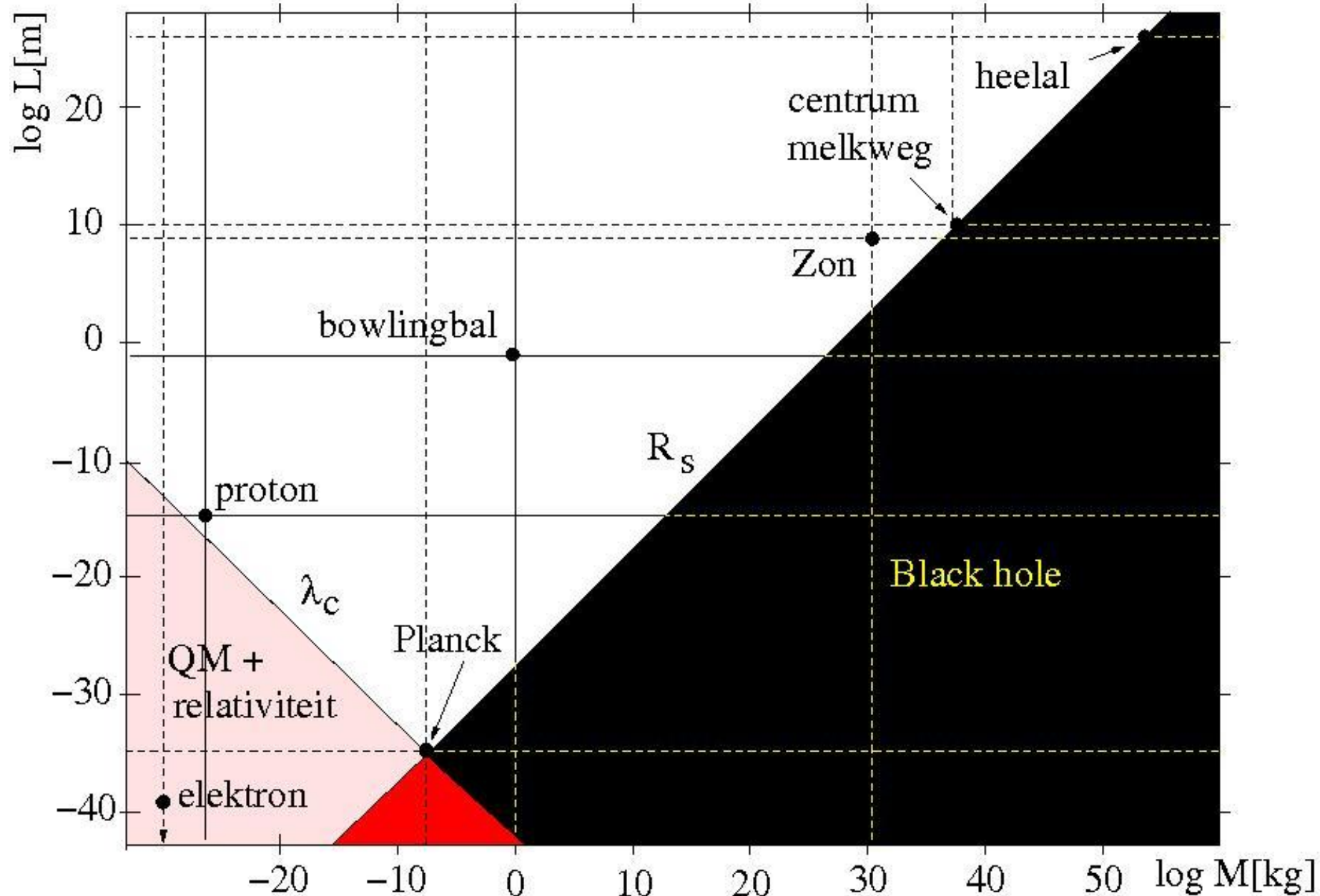


Stephen Hawking

Quantummechanica en zwarte gaten

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

object	Massa (kg)	Afmeting (m)	λ_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)

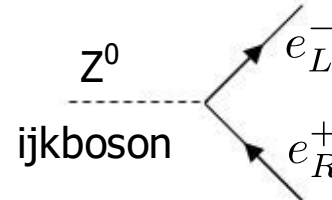
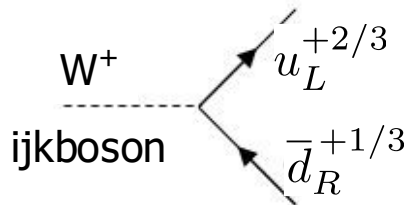
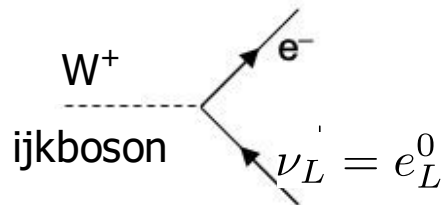
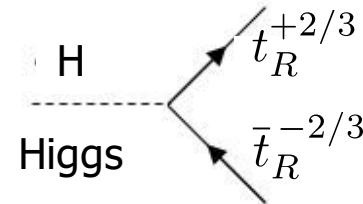
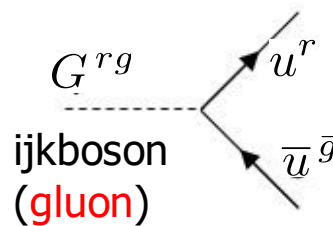
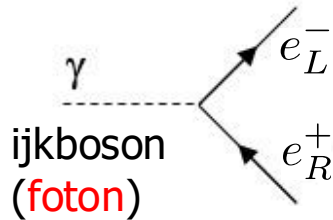
Andere krachten gebaseerd op ijsymmetrie

- Symmetrie: begin met setje (zeg preonen?) en bouw van vervolgsets
 - preonen $\rightarrow$ quarks + leptonen (voorlopig nog speculatieve stap)
 - quarks $\rightarrow$ nucleonen $\rightarrow$ atoomkernen
 - atomen $\rightarrow$ moleculen, $\rightarrow$ materie

- veranderingen via interacties met bosonen fungerend als krachtdeeltjes (fermion – fermion – boson koppelingen/vertices met dynamische rol als events)
 - Bosonen met spin 0 (Higgs deeltje): massa
 - Bosonen met spin 1 (ijkbosonen): ladingen en eventueel veranderen daarvan

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, ν) 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



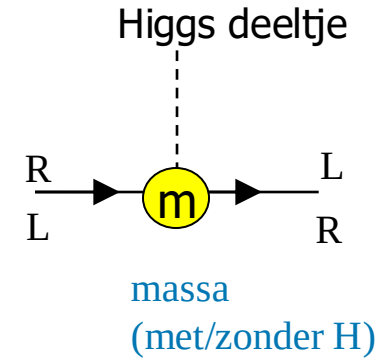
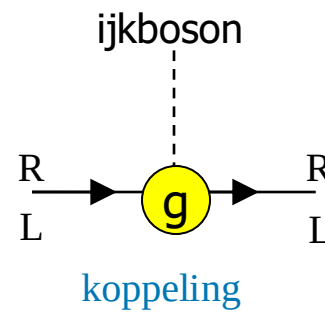
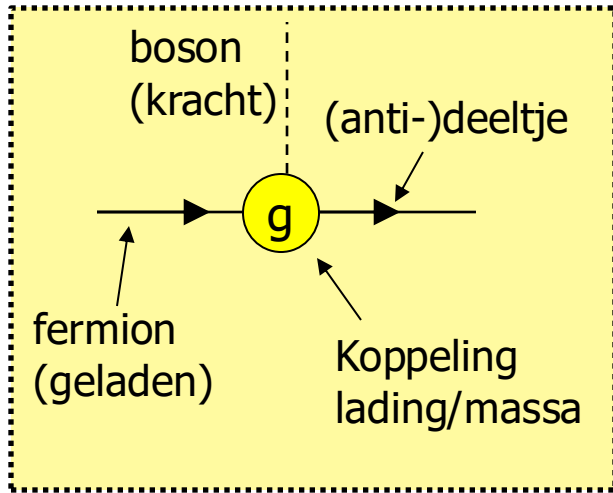
GWS model van
Sheldon Glashow,
Steve Weinberg,
& Abdus Salam
voor elektrozwak

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

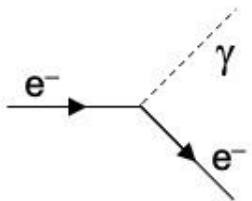


KRACHTDEELTJES

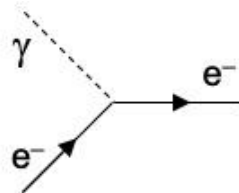
- Manipulatie van fermion vrijheidsgraden en bijbehorende ladingen via koppeling aan bosonen (ijkbosonen en Higgs)



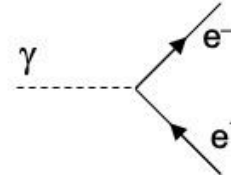
- Rol van ijkbosonen: één getalletje voor meerdere situaties



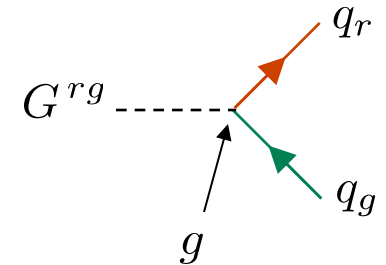
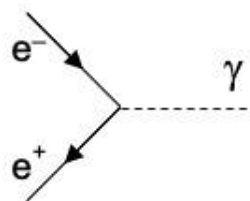
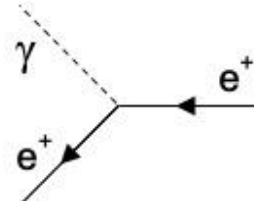
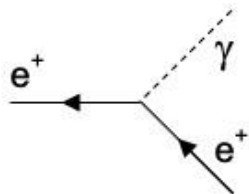
emissie



absorptie

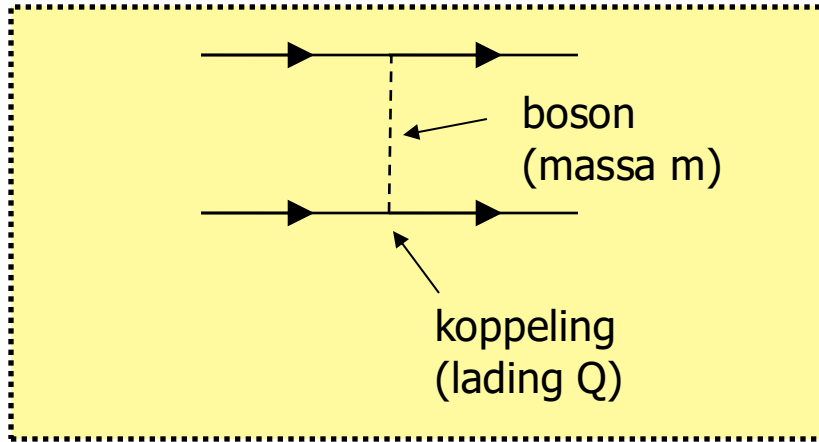


creatie/annihilatie



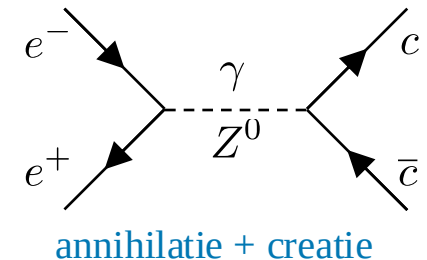
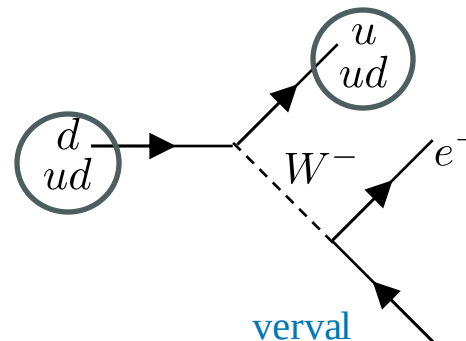
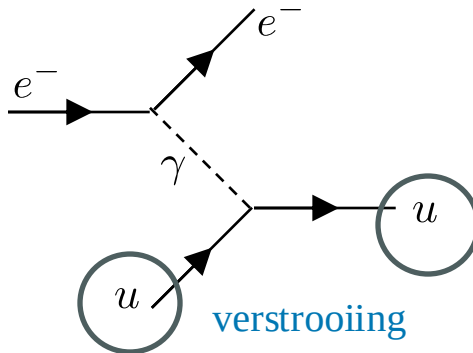
INTERACTIES VIA UITWISSELINGEN

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



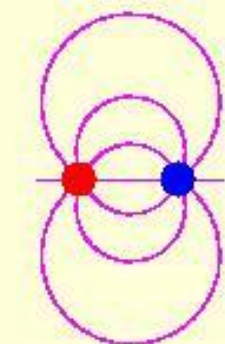
3D wereld: $V(r) \sim -\frac{Q^2}{4\pi} \frac{e^{-r/\lambda_c}}{r}$
 $\xrightarrow{m \rightarrow 0} -\frac{Q^2}{4\pi r}$

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

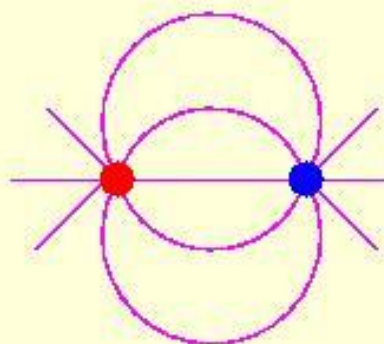


Rekenen met krachtdeeltjes
Richard Feynman

VAN QED NAAR QUANTUMCHROMODYNAMICA (QCD)



$$V(r) \sim 1/r$$

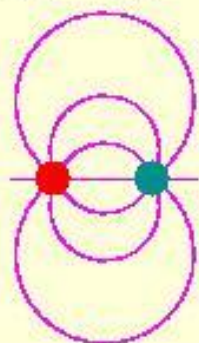


$$V(r) \sim 1/r$$

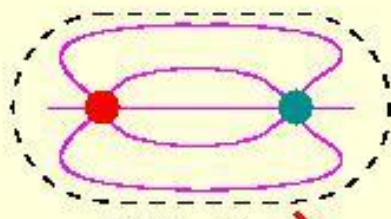


1 elektrische lading
(positief en negatief)
1 krachtdeeltje (foton)

Quantumelektrodynamica (QED)



korte
afstand



grote
afstand

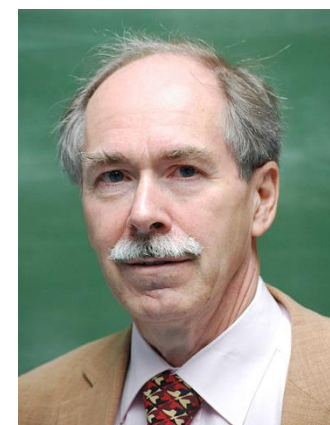
$$V(r) \sim r$$



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

Permanente
opsluiting van
gekleurde quarks

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

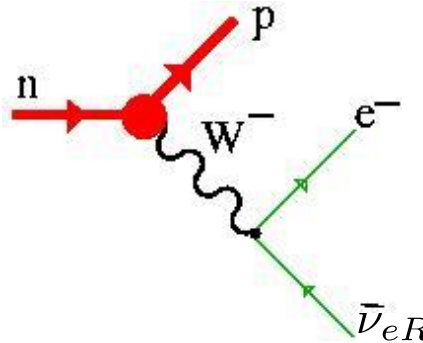


Martinus Veltman & Gerard 't Hooft
Rekenen met zware W en Z-
deeltjes en gluonen

ZWAK VERVAL VAN NEUTRON (d-QUARK)

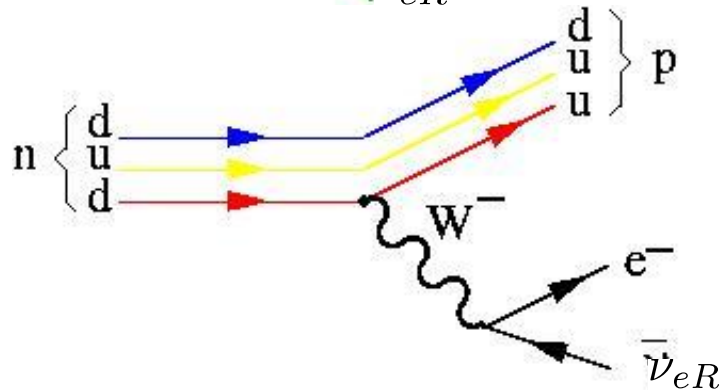
Neutron beta-verval

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



Op niveau van quarks

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

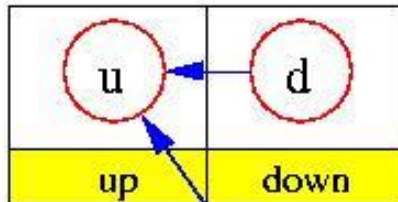


Maar in protonen zijn d-quarks veilig
en in stabiele atomen zijn neutronen veilig!

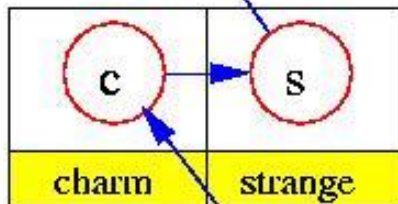
WAAR ZIJN DE ZWARE QUARKS GEBLEVEN?

- 3 families van deeltjes
- 4 fundamentele krachten

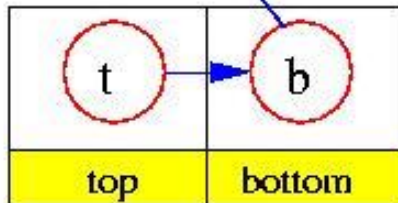
Familie 1



Familie 2



Familie 3

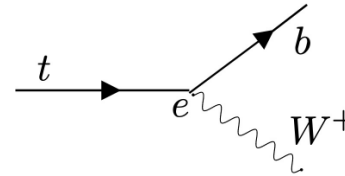


- **sterke kracht**
quark → nucleon → atomic nucleus
- **electromagnetische kracht**
atom → molecule → complexity
- **zwakke kracht**
verval van zwaardere quarks naar lichte
- **zwaartekracht**
planeten, sterren, sterrenstelsels, kosmos

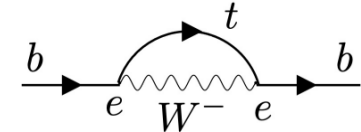
HET ADDERTJE ONDER HET GRAS

- $t \rightarrow b + W^+$, $d \rightarrow u + \dots$ kan via W-bosonen

- leeftijd van t is $0,5 \times 10^{-24}$ s



- Zelfs b-massa via kwantumeffecten gegenereerd uit t is mogelijk via



- Maar hoe zit dat met overgangen tussen families zoals $b \rightarrow c + W^-$ of $s \rightarrow u + \dots$

- Leeftijd van b is $1,5 \times 10^{-12}$ s, weliswaar 'lang' maar niet oneindig!

(vergelijking leeftijd top : bottom is als 1 s : 100 000 jaar!)

- **Kwantum menging van families**

- Doubletten zijn (u_L, d_L') , (c_L, s_L') en (t_L, b_L') die koppelen aan W waar linkshandige (d_L', s_L', b_L') een mengsel zijn van linkshandige (d_L, s_L, b_L) die in de combinaties (d_R, d_L) , (s_R, s_L) en (b_R, b_L) de massa-toestanden vormen die koppelen aan H

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

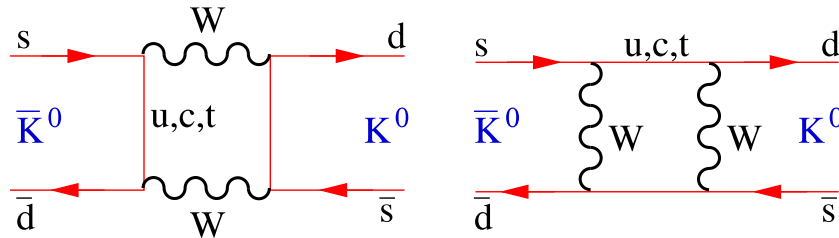
$$\begin{aligned} V_{ud} &= V_{cs} \sim 0,974 & V_{tb} &\sim 1 \\ V_{us} &= -V_{cd} \sim 0,227 \\ V_{cb} &\sim V_{ts} \sim 0,04 \\ V_{ub} &\sim V_{td} \sim 0,01 \text{ (deze zijn complex)} \end{aligned}$$

- Dus omdat $d' \rightarrow u + W^-$ kan zowel $d \rightarrow u + W^-$ als $s \rightarrow u + W^-$ en zelfs $b \rightarrow u + W^-$
- En via $s' \rightarrow c + W^-$ kan ook $b \rightarrow c + W^-$ met extra onderdrukking $|V_{cb}|^2 \sim 10^{-3}$

EN NOG EEN COMPLICATIE

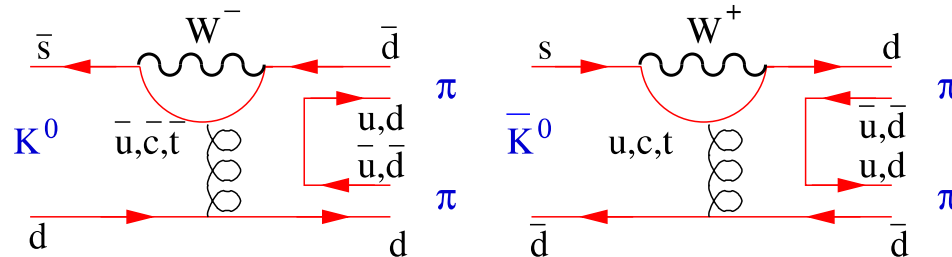
- Breking van C, P, CP en T symmetrie. Alleen CPT gecombineerd is goed!

- menging van mesonen



→ toestanden $K^0 \pm \bar{K}^0$

- met onverwachte vervalsprocessen naar twee en drie pionen (K_S^0 en K_L^0)



- Effecten sterker (en ook aangetoond) bij mesonen met b-quarks (LHCb programma bij CERN)
- CP-breking kan leiden tot baryon-antibaryon symmetrie in kosmos en we weten dat er meer materie is dan antimaterie, al is dat maar een 10^{-9} effect. Overigens is de CP-breking in het SM te klein om zelfs deze breking te verklaren!

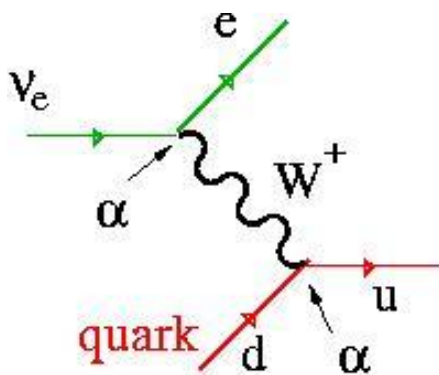
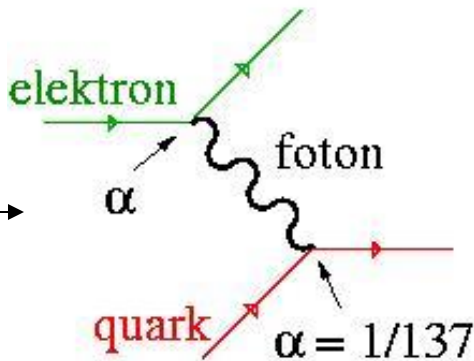
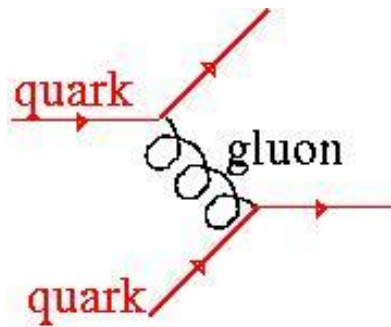
De relatieve sterkte van krachten in het SM

Sterkte van krachten

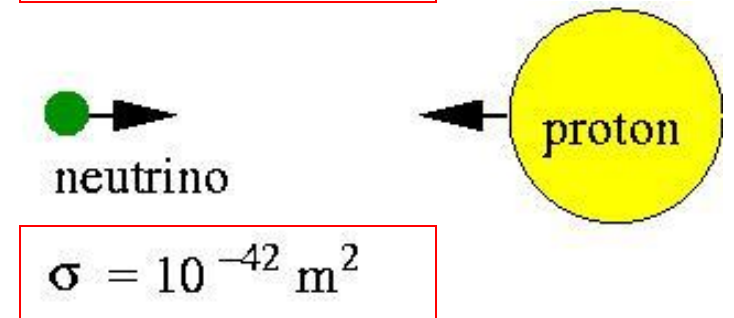
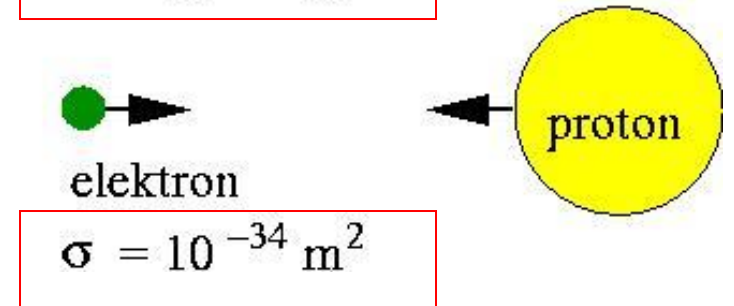
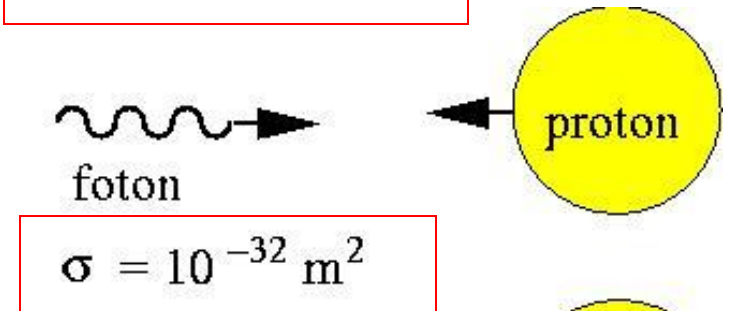
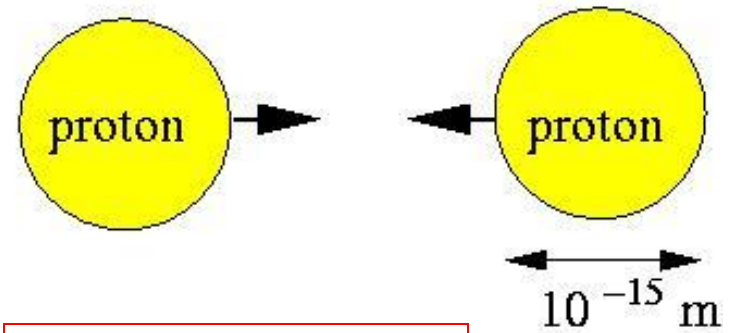
sterke kracht

elektromagne-
tische kracht

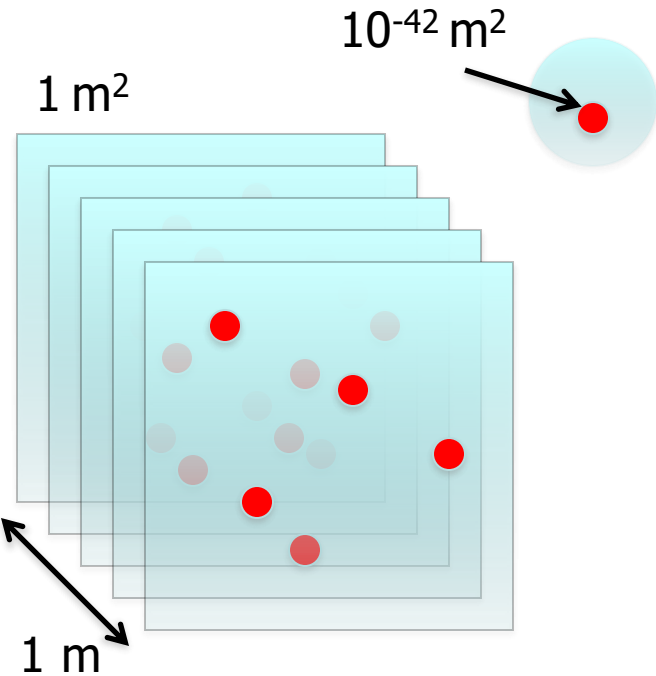
zwakke kracht



$$G_F \sim \alpha / M_W^2$$



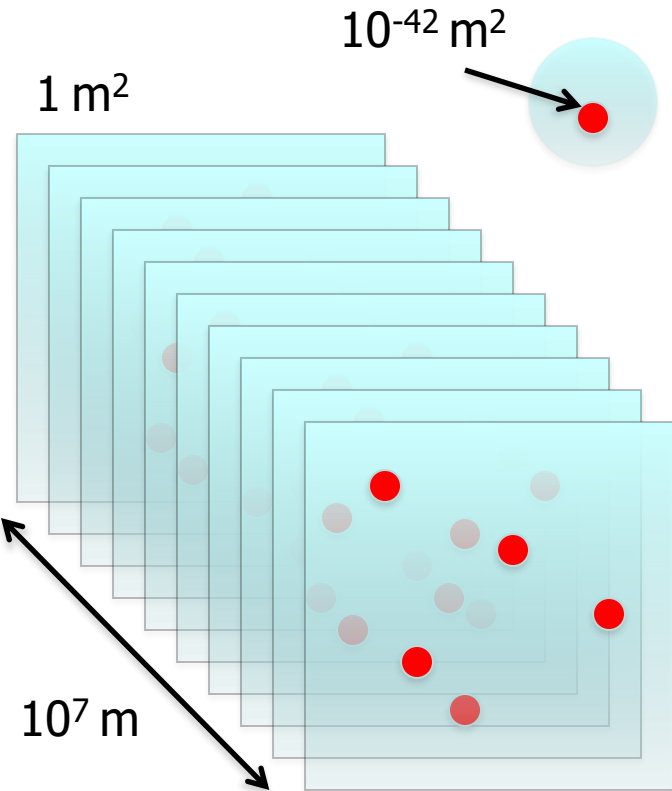
Kan de Aarde neutrino's stoppen



- Voor neutrinos is werkzame doorsnede voor botsing met één proton heel klein: 10^{-42} m^2 .
- Maar er zitten behoorlijk wat, 10^{24} protonen, in iedere cm^3 en dus zelfs 10^{30} in iedere m^3

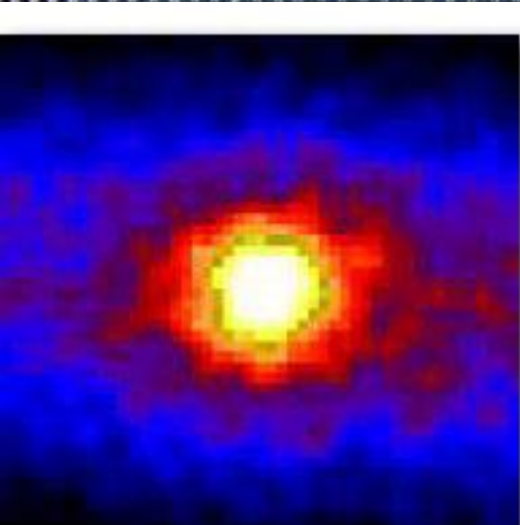
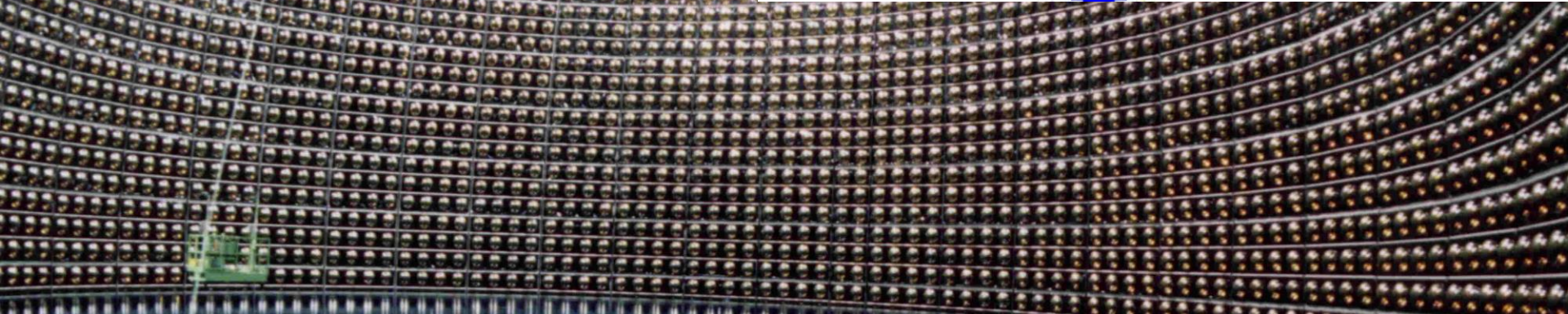
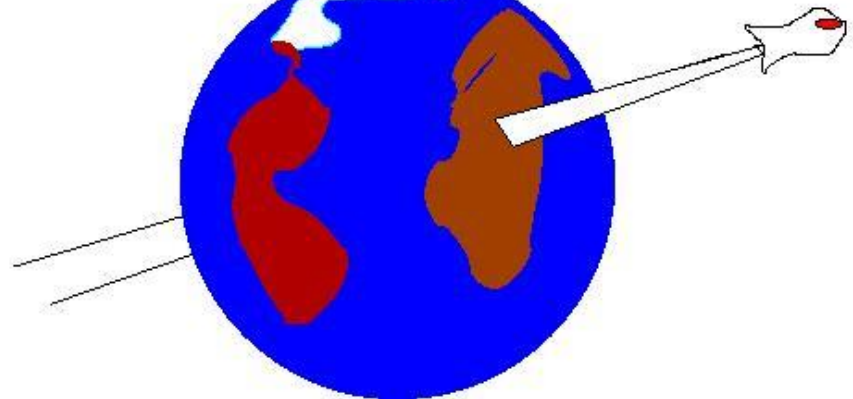
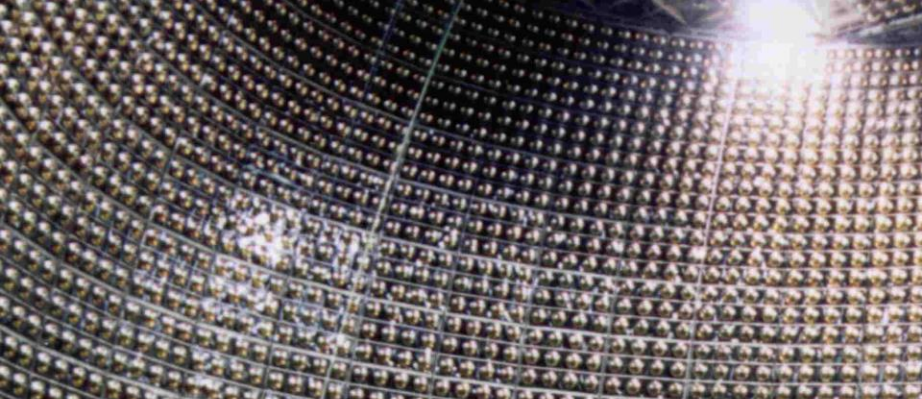
$$\text{Botsingskans} = 10^{30} \times 10^{-42} = 10^{-12}$$

Kan de Aarde neutrino's stoppen



- Voor neutrinos is werkzame doorsnede voor botsing met één proton heel klein: 10^{-42} m^2 .
- Maar er zitten behoorlijk wat, 10^{24} protonen, in iedere cm^3 en dus zelfs 10^{30} in iedere m^3
- Dwars door de Aarde is ruim 10000 km (dus 10^7 m). Dat betekent dat het neutrino maar liefst 10^{37} protonen voor zich ziet.
- Helaas dat is dus nog niet genoeg, de Aarde blijft een gatenkaas voor het neutrino. Het betekent dat er (gemiddeld) maar 1 op de 10^5 neutrinos wordt gestopt.

$$\text{Botsingskans} = 10^{37} \times 10^{-42} = 10^{-5}$$



Zon gezien dwars door de Aarde heen

