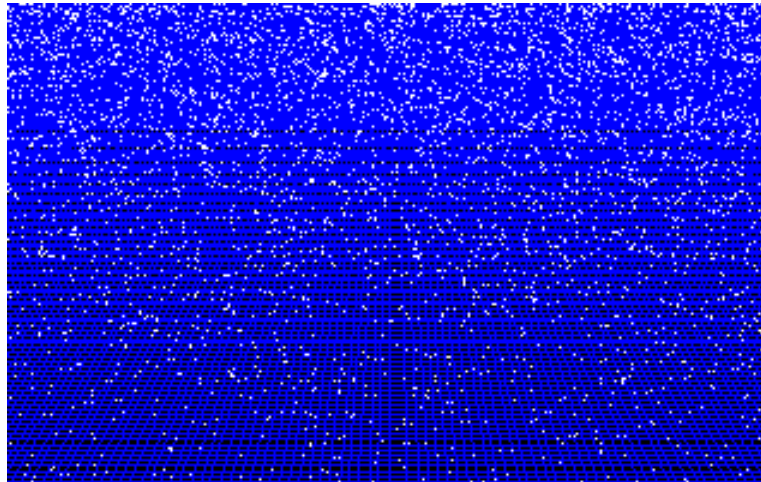


# Elementaire Deeltjesfysica

## *FEW Cursus*



**Jo van den Brand**

**27 Oktober, 2009**

**Structuur der Materie**

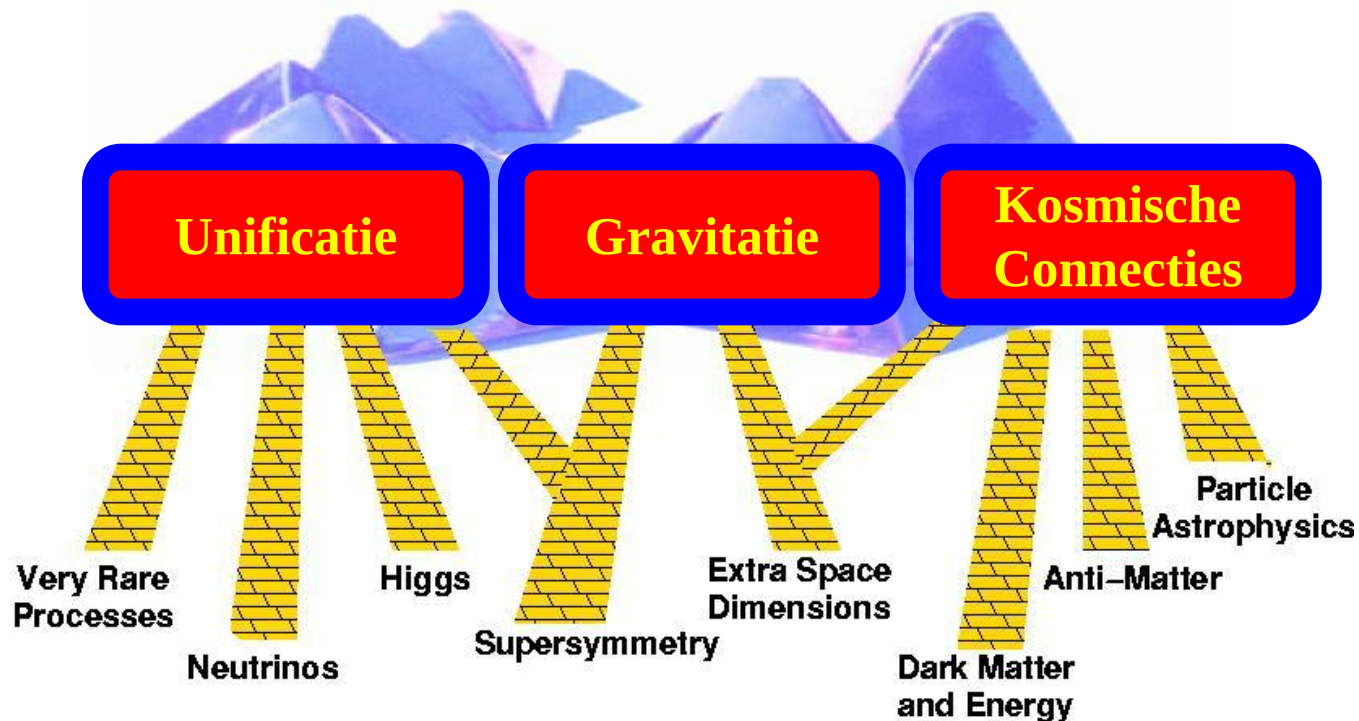
# Overzicht

- **Docent informatie**
  - Jo van den Brand
  - Email: [jo@nikhef.nl](mailto:jo@nikhef.nl)
  - 0620 539 484 / 020 598 7900
  - Kamer: T2.69
- **Rooster informatie**
  - Dinsdag 13:30 – 15:15, F654 (totaal 7 keer)
  - Vrijdag 13:30 – 15:15, F654 (totaal 7 keer) – Tjonnie Li
- **Boek en website**
  - David Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Wiley and Sons, ISBN 978-3-527-40601-2 (2008)
  - Zie website URL: [www.nikhef.nl/~jo](http://www.nikhef.nl/~jo)
- **Beoordeling**
  - Huiswerkopgaven 20%, tentamen 80%



# Deeltjesfysica

‘De studie van Materie, Energie, Ruimte en Tijd’

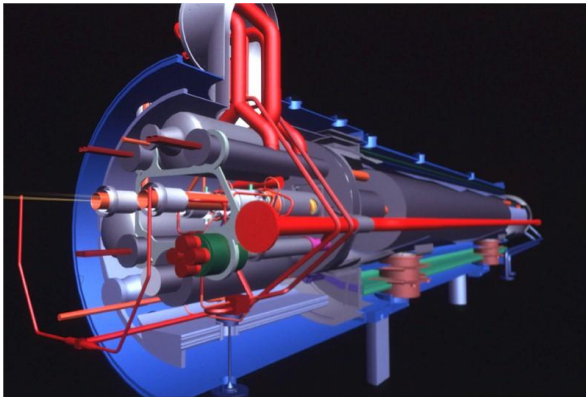


Ambities van de **Elementaire** Deeltjesfysica

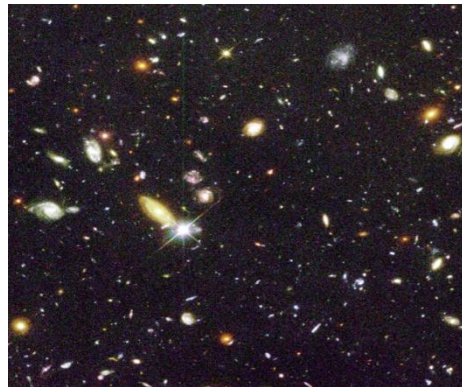


# Palet van deeltjesfysica

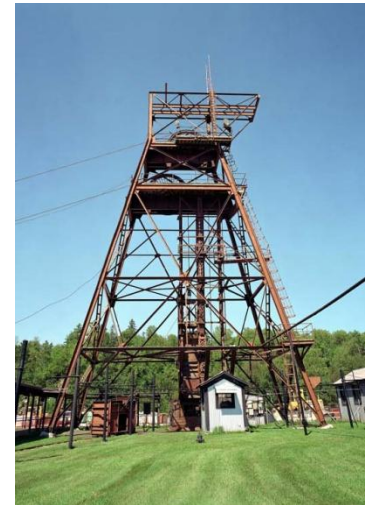
- We hebben veel gereedschap tot onze beschikking van **moderne versnellers tot satellieten in de ruimte tot experimenten diep ondergronds.**



Accelerator  
LHC Magnet



Space



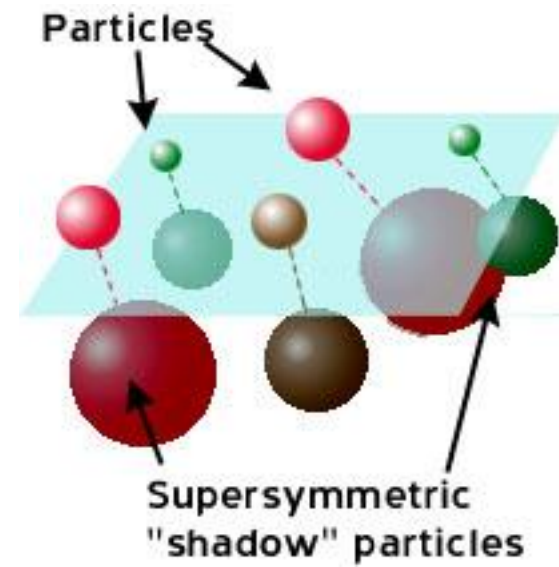
Subterranean  
SNO, Antares, Icecube

***The science requires forefront accelerators at the energy and luminosity frontiers. But, it also requires innovative experiments in space, underground, and away from accelerators.***

# Recente ontdekkingen wijzen naar een nieuwe wereld

- Heelal bestaat uit 'dark particles', onbekend en het zijn geen atomen.
- Een vreemde 'dark force' doordringt de ruimte en drijft die uit elkaar.
- Krachtige nieuwe ideeën
  - Nieuwe deeltjes
  - Nieuwe krachten
  - Verborgen dimensies

String theorie voorspelt dat er zeven extra ruimtelijke dimensies wachten om ontdekt te worden.



# Inhoud

- **Inleiding**
  - Deeltjes
  - Interacties
- **Relativistische kinematica**
  - Lorentz transformaties
  - Viervectoren
  - Energie en impuls
- **Symmetrieën**
  - Behoudwetten
  - Quarkmodel
  - Discrete symmetrieën
- **Feynman berekeningen**
  - Gouden regel
  - Feynman regels
  - Diagrammen
- **Elektrodynamica**
  - Dirac vergelijking
  - Werkzame doorsneden
- **Quarks en hadronen**
  - Elektron-quark interacties
  - Hadron productie in  $e^+e^-$
- **Zwakke wisselwerking**
  - Muon verval
  - Unificatie



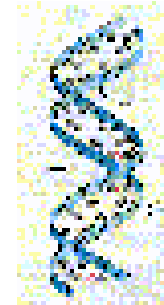
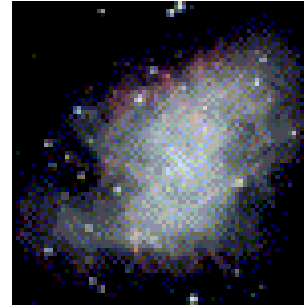
Relativistische quantumveldentheorie

Jo van den Brand



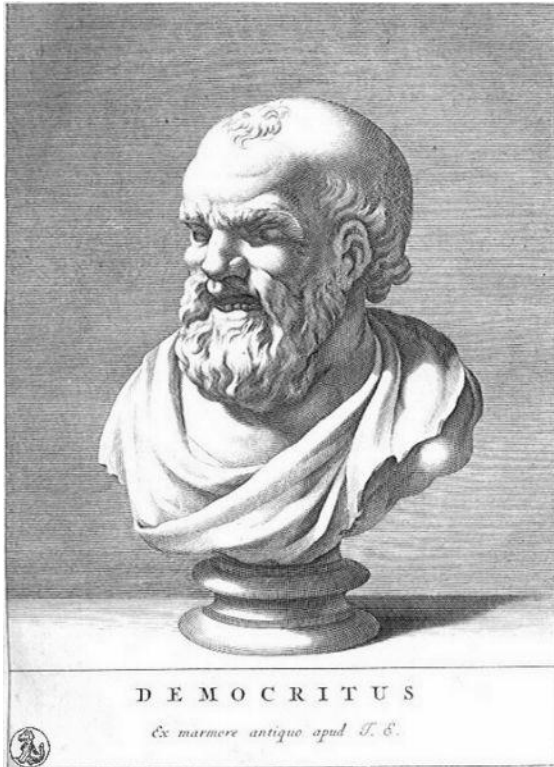
# *Inleiding: waar de wereld van gemaakt is*

- De wereld om ons heen en het Universum zijn opgebouwd uit een enorme diversiteit van materialen en vormen van materie die gewoon waren in het prille begin van het Universum.
- Het is verrassend dat deze grote variëteit gemaakt is van een relatief klein aantal eenvoudige bouwstenen.





# *Concept: atoom*



Zuiver filosofisch denken





# Het periodieke systeem

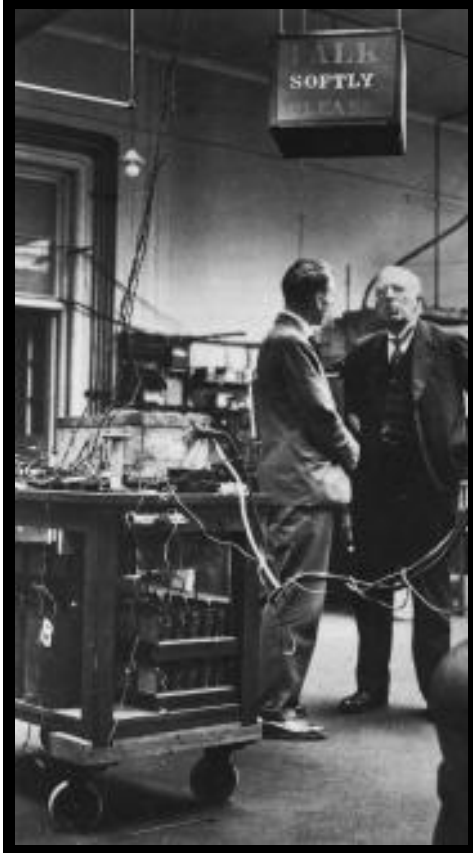


| Group        | 1        | 2        |        | 3              | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10         | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         |
|--------------|----------|----------|--------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Period       |          |          |        |                |           |           |           |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| 1            | 1<br>H   |          |        |                |           |           |           |           |           |           |            |            |            |            |            |            |            |            | 2<br>He    |
| 2            | 3<br>Li  | 4<br>Be  |        |                |           |           |           |           |           |           |            |            |            | 5<br>B     | 6<br>C     | 7<br>N     | 8<br>O     | 9<br>F     | 10<br>Ne   |
| 3            | 11<br>Na | 12<br>Mg |        |                |           |           |           |           |           |           |            |            |            | 13<br>Al   | 14<br>Si   | 15<br>P    | 16<br>S    | 17<br>Cl   | 18<br>Ar   |
| 4            | 19<br>K  | 20<br>Ca |        | 21<br>Sc       | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni   | 29<br>Cu   | 30<br>Zn   | 31<br>Ga   | 32<br>Ge   | 33<br>As   | 34<br>Se   | 35<br>Br   | 36<br>Kr   |
| 5            | 37<br>Rb | 38<br>Sr |        | 39<br>Y        | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd   | 47<br>Ag   | 48<br>Cd   | 49<br>In   | 50<br>Sn   | 51<br>Sb   | 52<br>Te   | 53<br>I    | 54<br>Xe   |
| 6            | 55<br>Cs | 56<br>Ba | *<br>  | 71<br>Lu       | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt   | 79<br>Au   | 80<br>Hg   | 81<br>Tl   | 82<br>Pb   | 83<br>Bi   | 84<br>Po   | 85<br>At   | 86<br>Rn   |
| 7            | 87<br>Fr | 88<br>Ra | **<br> | 103<br>Lr      | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Uun | 111<br>Uuu | 112<br>Uub | 113<br>Uut | 114<br>Uuq | 115<br>Uup | 116<br>Uuh | 117<br>Uus | 118<br>Uuo |
| *Lanthanides |          |          |        | *<br>57<br>La  | 58<br>Ce  | 59<br>Pr  | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd   | 65<br>Tb   | 66<br>Dy   | 67<br>Ho   | 68<br>Er   | 69<br>Tm   | 70<br>Yb   |            |            |
| **Actinides  |          |          |        | **<br>89<br>Ac | 90<br>Th  | 91<br>Pa  | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm   | 97<br>Bk   | 98<br>Cf   | 99<br>Es   | 100<br>Fm  | 101<br>Md  | 102<br>No  |            |            |

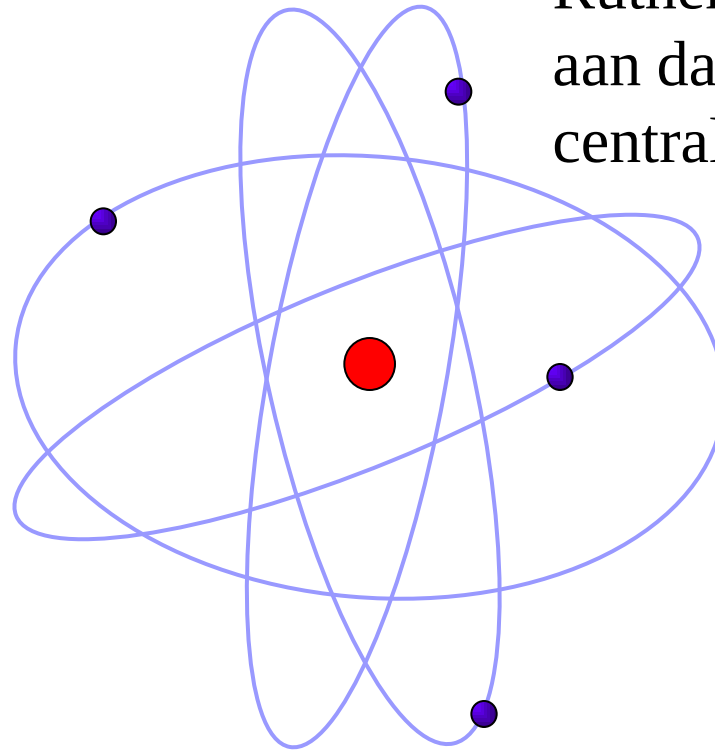
Mendeleev (1869) introduceerde het periodieke systeem



# *De structuur van atomen*



Rutherford (1912) toonde aan dat atomen een centrale kern bevatten

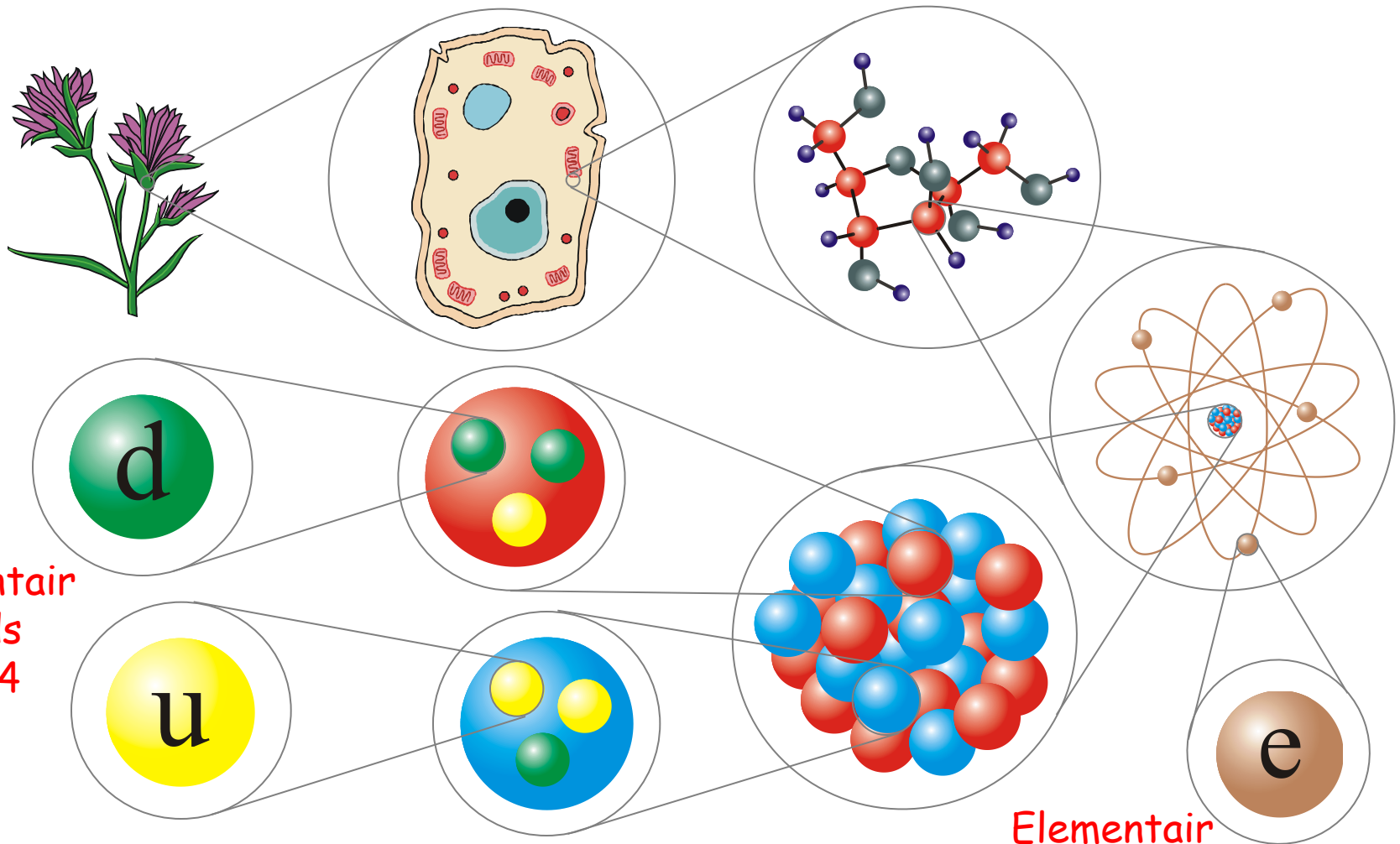


$10^{-10}$  m

Elektronen draaien rond de kern met precies gedefinieerde energie en slecht gedefinieerde posities



# Deeltjesfysica



Elementair  
sinds  
1974

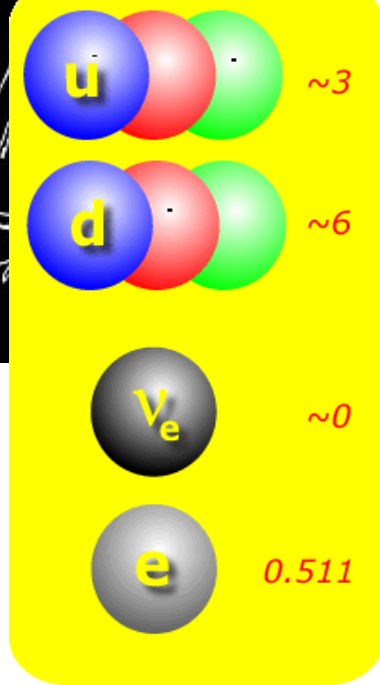
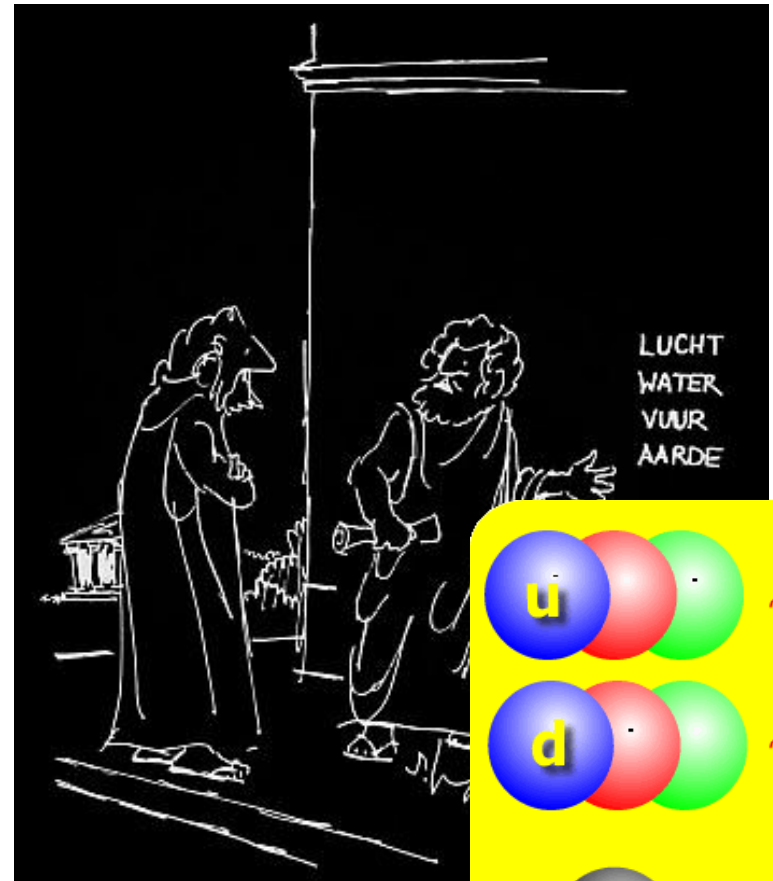
Elementair  
sinds  
1897

Reductionisme



# Gewone materie

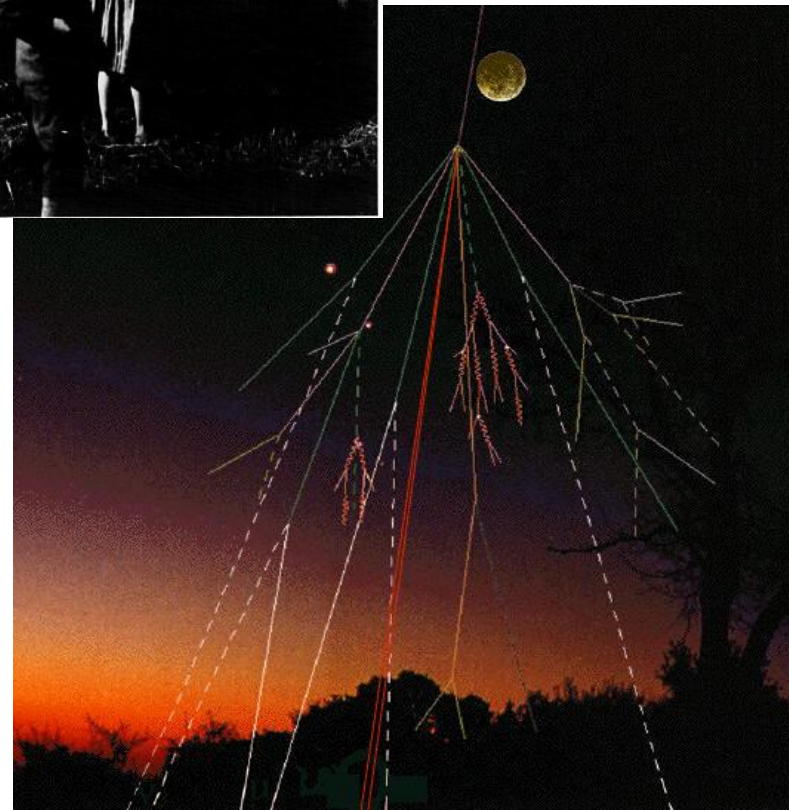
- Alle materie is gemaakt van bijna honderd soorten atomen
- De kern bestaat uit positieve protonen en neutrale neutronen – elk zo'n 2000 keer zwaarder dan het elektron.
- Het elektron lijkt geen interne structuur te hebben. Protonen en neutronen zijn echter samengestelde deeltjes.
- De quarks lijken weer geen structuur te hebben. Enkel twee soorten quarks, 'up' en 'down' genaamd, zijn nodig om het proton en neutron te bouwen (met ladingen  $+2/3$  and  $-1/3$  ten opzichte van de lading van het elektron van  $-1$ ).
- Er is nog een structuurloos deeltje nodig om het beeld compleet te maken. Het elektron-neutrino.



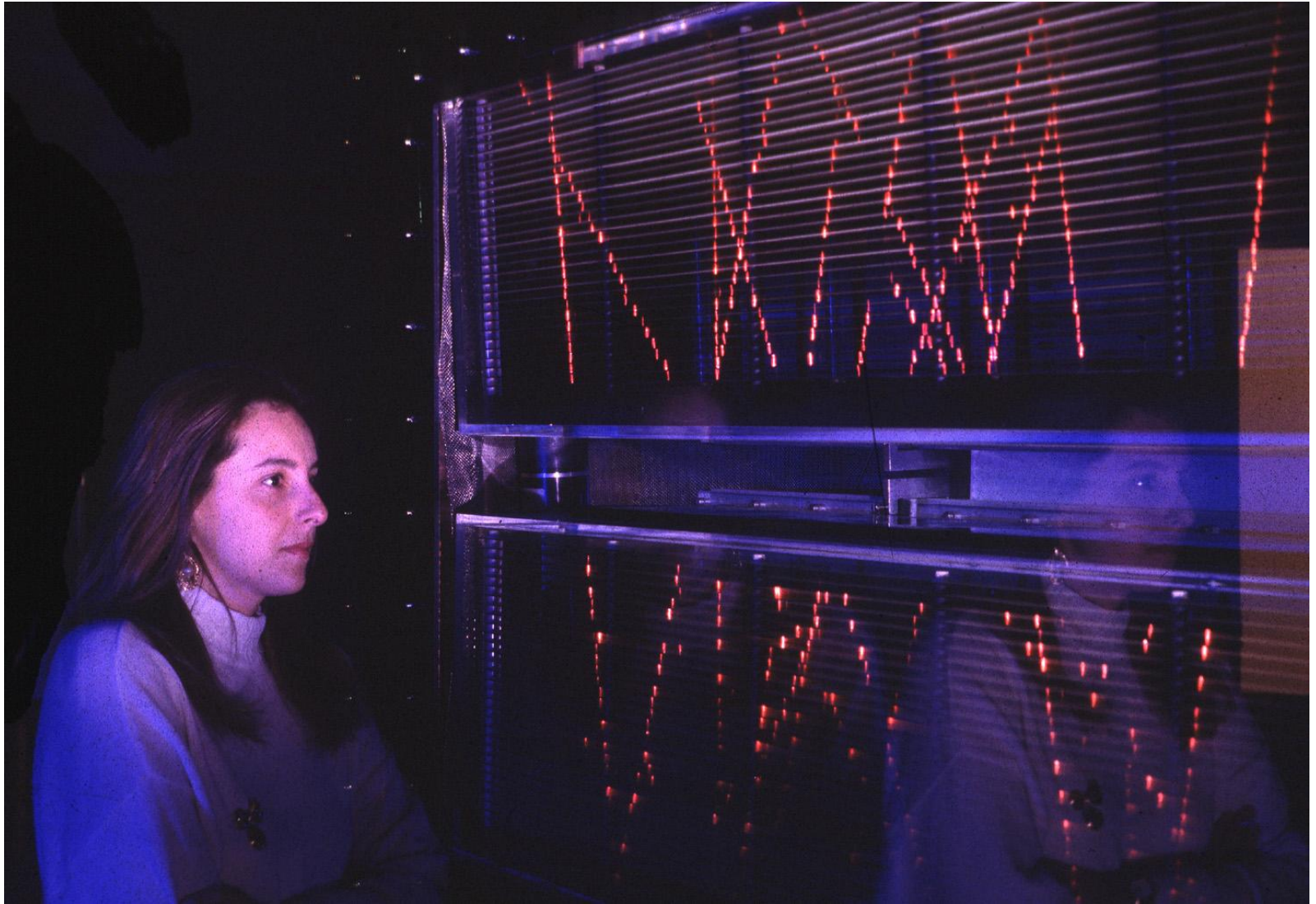


# Kosmische materie

- Theodore Wulf: meer straling in de top van de Eiffel toren dan op de grond.
- Studies op bergtoppen en met ballonnen: 'kosmische' straling door showers van hoog-energetische protonen. Nieuwe soorten deeltjes worden gevonden.
- Op de grond vooral muonen. Dat zijn net elektronen, maar dan 210 keer zwaarder. De muonen komen van het verval van kortlevende deeltjes, die soms een derde type quark bevatten: het vreemde quark.
- Dus behalve het elektron, elektron-neutrino, up quark en down quark, hebben we het muon, muon-neutrino en het vreemde quark nodig.



# ***Muonen zichtbaar maken met vonkenkamer***





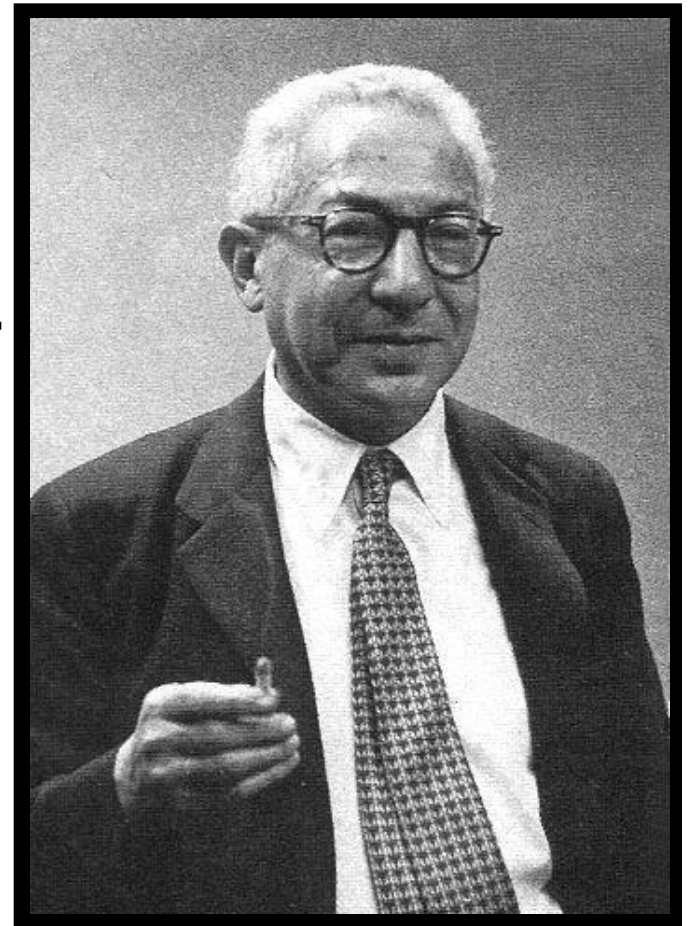
# *Het muon*

Ontdekt in kosmische straling door  
Neddermeyer en Anderson (1936)

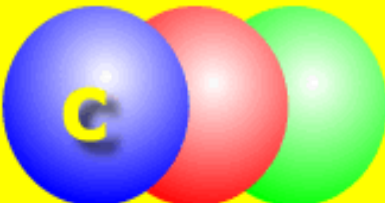
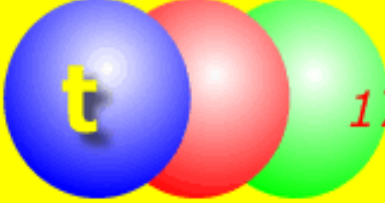
Lijkt identiek aan het elektron, maar  
200 keer zo massief

Vervalt binnen  $2.2 \mu\text{sec}$

‘Who ordered that?’ - I I Rabi



# Drie families: 1897 - 2000

|                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>~3</p>  <p>~6</p>     |  <p>1250</p>  <p>120</p> |  <p>174300</p>  <p>4200</p> <p>quarks</p> |
|  <p>~0</p>  <p>0.511</p> |  <p>~0</p>  <p>106</p>  |  <p>~0</p>  <p>1770</p> <p>leptonen</p>  |

Massa's van deeltjes in MeV;  $1 \text{ MeV} \approx 1.8 \times 10^{-27} \text{ gram}$

# Quarks en leptonen

## Quarks

| Naam    | Symbool | Lading<br>[ e ] | Massa<br>[ GeV/c <sup>2</sup> ] | Spin<br>[ $\hbar$ ] | $B$           | $T_3$          | $S$ | $C$ | $b$ | $t$ |
|---------|---------|-----------------|---------------------------------|---------------------|---------------|----------------|-----|-----|-----|-----|
| Up      | $u$     | $\frac{2}{3}$   | $2 - 8 \times 10^{-3}$          | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{2}$  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Down    | $d$     | $-\frac{1}{3}$  | $5 - 15 \times 10^{-3}$         | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{2}$ | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Strange | $s$     | $-\frac{1}{3}$  | 0.1 - 0.3                       | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | -1  | 0   | 0   | 0   |
| Charm   | $c$     | $\frac{2}{3}$   | 1.0 - 1.6                       | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | 0   | 1   | 0   | 0   |
| Bottom  | $b$     | $-\frac{1}{3}$  | 4.1 - 4.5                       | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | 0   | 0   | -1  | 0   |
| Top     | $t$     | $\frac{2}{3}$   | $180 \pm 12$                    | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | 0   | 0   | 0   | 1   |

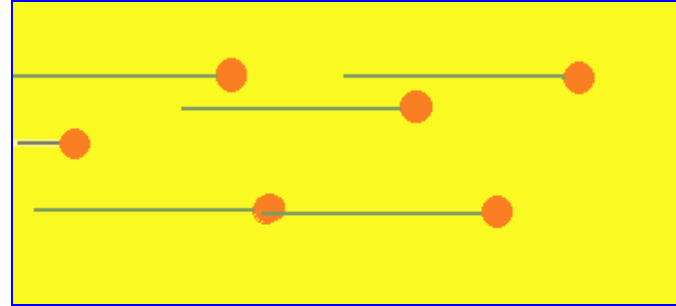
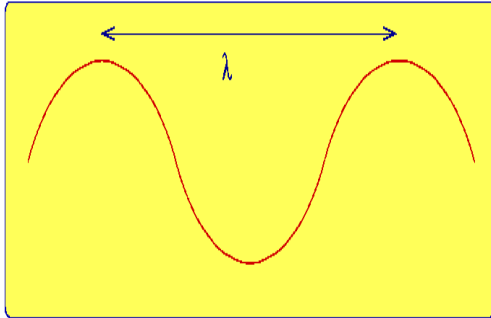
## Leptonen

| Naam             | Symbool    | Lading<br>[ e ] | Massa<br>[ MeV/c <sup>2</sup> ] | Spin<br>[ $\hbar$ ] | Levensduur                  |
|------------------|------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Elektron         | $e^-$      | -1              | 0.511                           | $\frac{1}{2}$       | $> 4.3 \times 10^{23}$ jaar |
| e-Neutrino       | $\nu_e$    | 0               | $< 15 \times 10^{-6}$           | $\frac{1}{2}$       | $\infty?$                   |
| Muon             | $\mu^-$    | -1              | 105.66                          | $\frac{1}{2}$       | 2.197 $\mu$ s               |
| $\mu$ -Neutrino  | $\nu_\mu$  | 0               | $< 0.17$                        | $\frac{1}{2}$       | $\infty?$                   |
| Tau              | $\tau^-$   | -1              | 1777                            | $\frac{1}{2}$       | $2.91 \times 10^{-13}$ s    |
| $\tau$ -Neutrino | $\nu_\tau$ | 0               | $< 24$                          | $\frac{1}{2}$       | $\infty?$                   |



# ***Deeltjesversnellers***

# Licht: golven en deeltjes



$$E \text{ (eV)} = \frac{1200}{\lambda \text{ [nm]}}$$

Zichtbaar geel licht:  $\lambda = 600 \text{ nm}$

$$E = 2 \text{ eV}$$

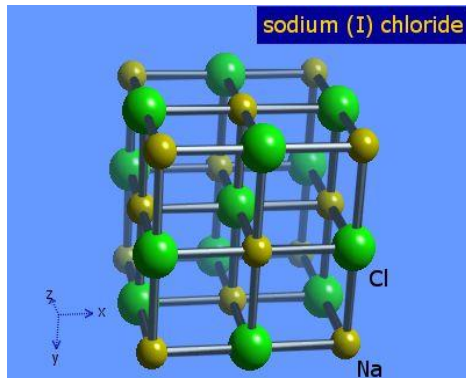
Röntgen straling:  $\lambda = 0,1 \text{ nm}$

$$E = 12 \text{ keV}$$





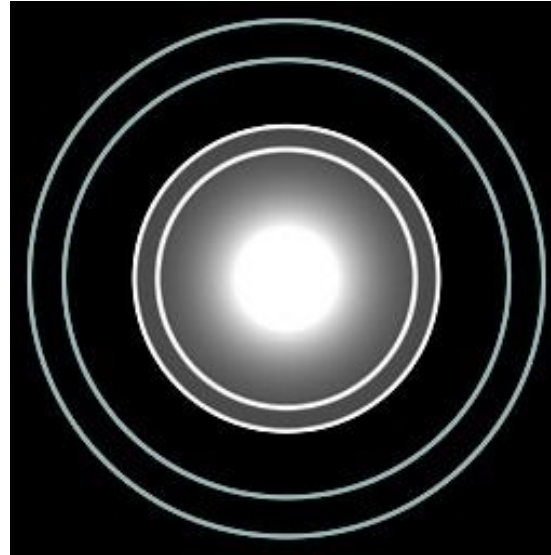
Met zichtbaar licht kun je structuren in een cel ontrafelen ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )



Met Röntgenstraling kun je de structuur van kristallen bepalen ( $\sim 0.1 \text{ nm}$ )



# *Elektronen: deeltjes en golven*

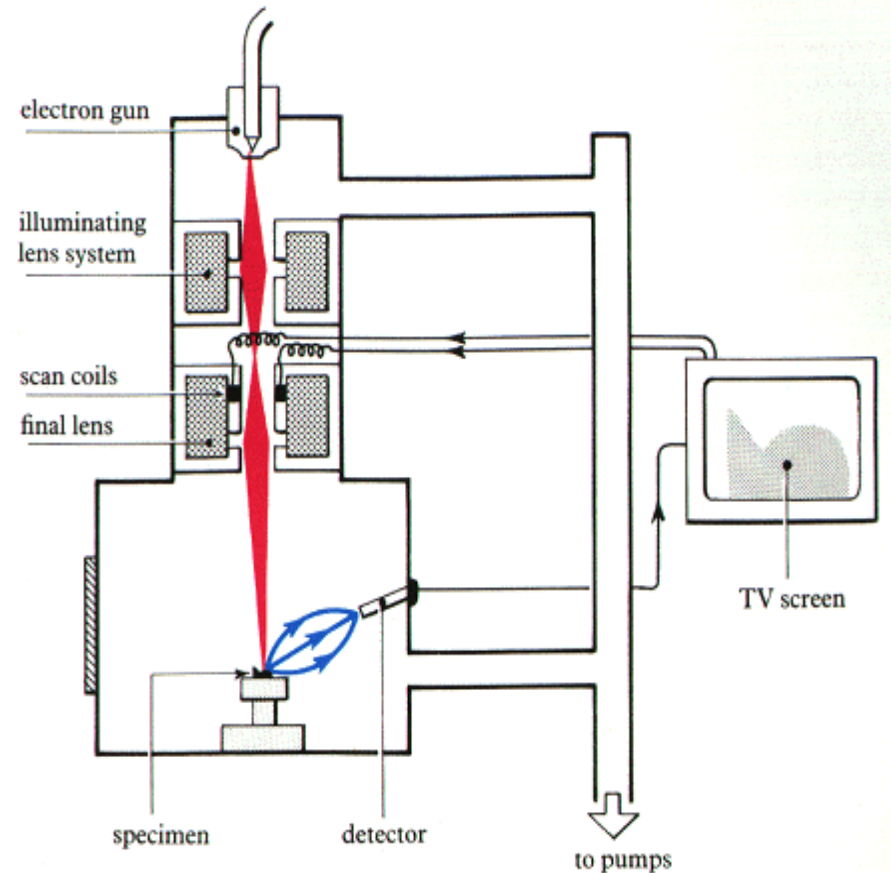


Net als Röntgenstraling  
(links) gedraagt ook een  
elektronenbundel zich  
als een golf (rechts)

$$\lambda \text{ [nm]} = \frac{1200}{E \text{ (eV)}}$$

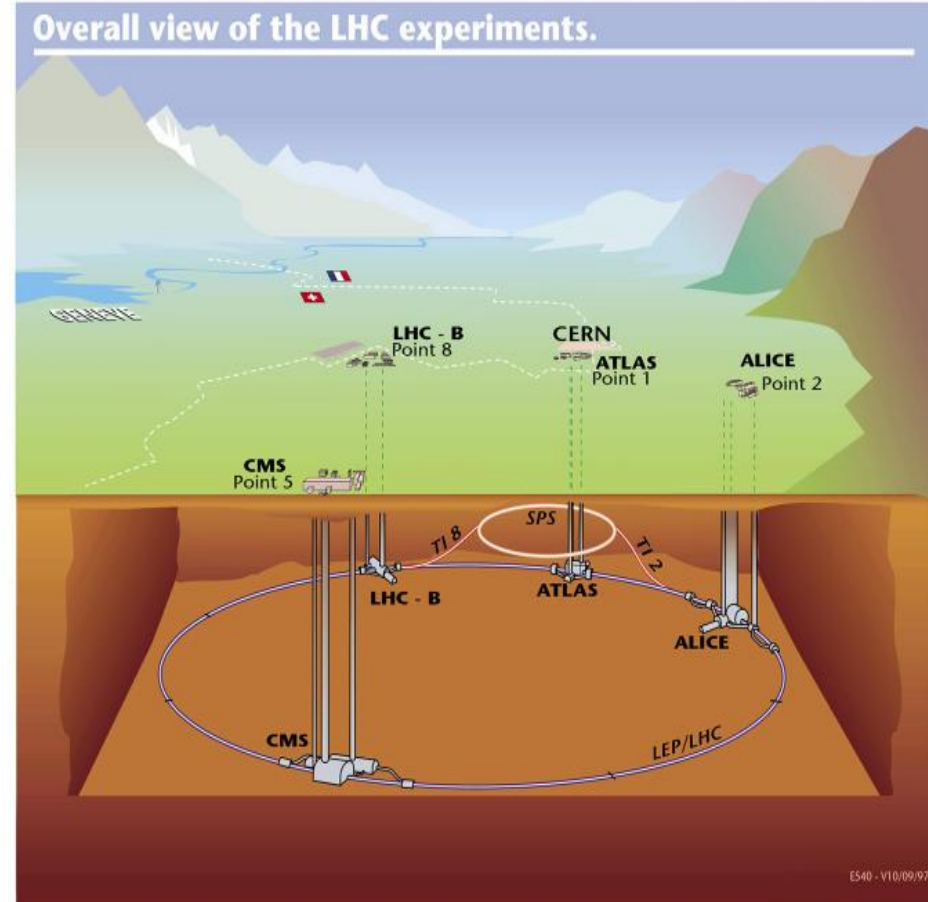


## Toepassing: elektronenmicroscop



Hiermee kun je b.v. de structuur  
van virussen en eiwitten  
bestuderen ( $\lambda \sim 0.01 \text{ nm}$ )

# De grootste microscoop: LHC te CERN

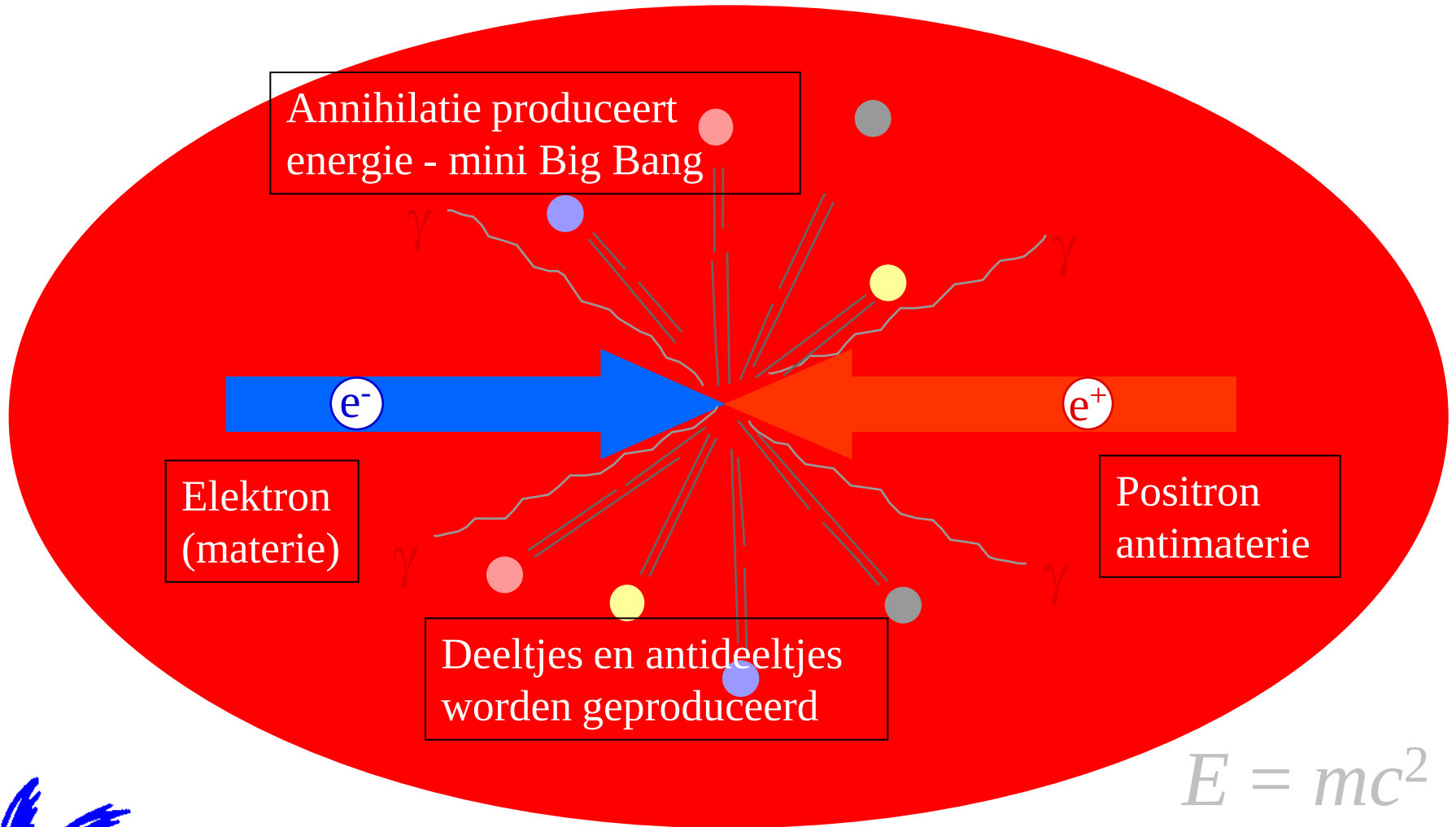


- Ring van 27 km omtrek
- 100 meter onder de grond
- 4 interactie punten waar protonen botsen

Jo van den Brand



# Elektron-positron botsingen

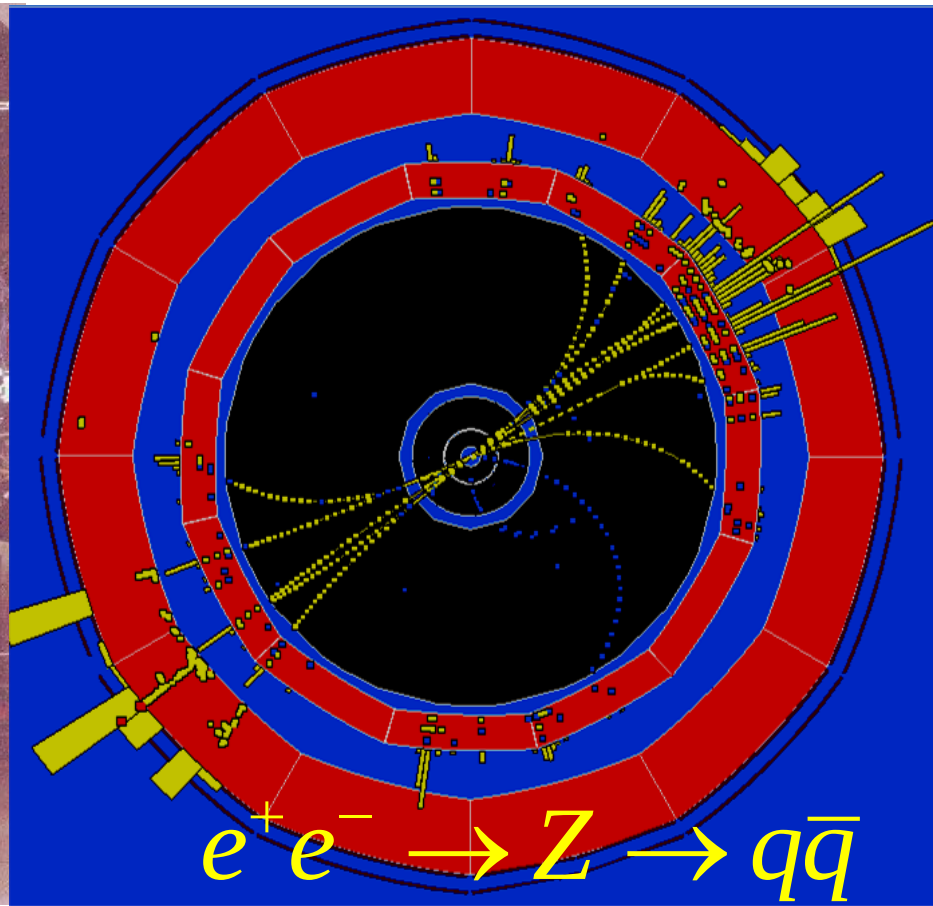
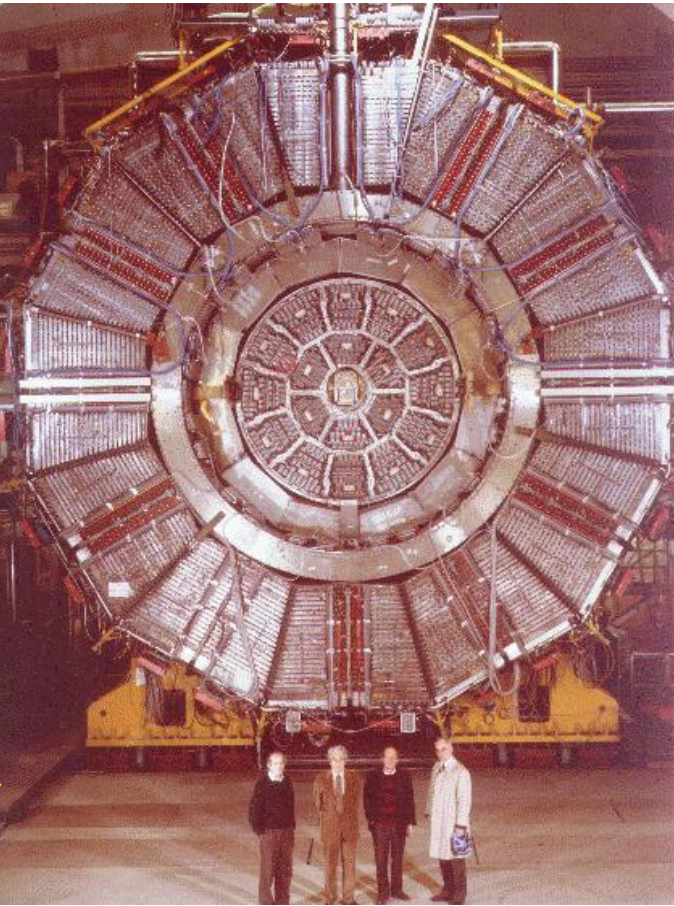
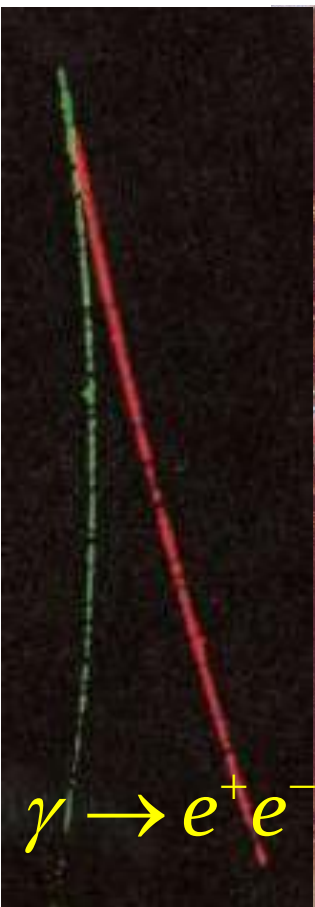


$$E = mc^2$$





# $E=mc^2$ : creatie van materie en antimaterie



Als materie uit energie wordt gemaakt, dan wordt er altijd evenveel antimaterie geproduceerd







# Het foton

## Wat is licht?

- elektromagnetische straling is gekwantiseerd (foton)
- foto-elektrische effect
- Compton scattering

$$E = h\nu$$

$$E \leq h\nu - w$$

## Elektrostatistische afstoting van twee elektronen

- elektrostatisch veld
- deeltjesuitwisseling (boodschappers)

# De mesonen

Waarom zijn atoomkernen stabiel?

- sterke wisselwerking

Yukawa (1934): uitgewisseld meson (analoog aan foton voor EM)

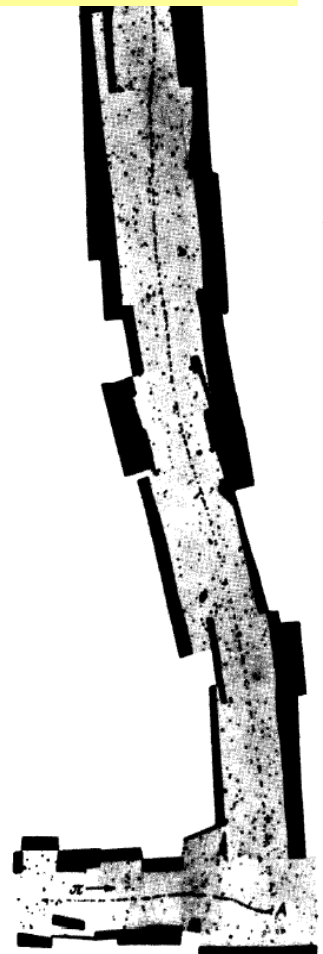
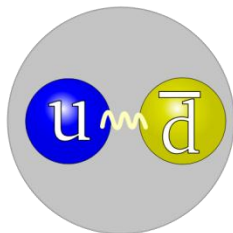
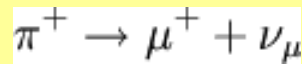


dracht (range)

$$e^{-(r/a)}/r^2 \quad a = 10^{-15} \text{ m}$$

$$m_{\pi} = 140 \text{ MeV}$$

Powell (1947): ontdekking van het pion in kosmische straling



# *Antimaterie*

# *De voorspelling van antimaterie*

Paul Dirac voorspelde het bestaan van het positron in 1928



Dirac

AntiDirac



De enige vergelijking in  
Westminster Abbey?





# deeltjes en antideeltjes

Relativistische golfvergelijking  
Klein-Gordon vergelijking

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$p \rightarrow \frac{\hbar}{i} \nabla \quad \text{en} \quad E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\left[ \square + \left( \frac{mc}{\hbar} \right)^2 \right] \psi(\vec{r}, t) = 0$$

$$\square \equiv \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta, \quad \text{met} \quad \Delta = \nabla \cdot \nabla$$

Twee oplossingen  
voor de energie

$$E^\pm = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Golffunctie met  
positieve energie

$$\psi^+(x, t) = \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} (px - E^+ t) \right\} \quad v_p^+ = \frac{E^+}{p}$$

negatieve energie

$$\begin{aligned} \psi^-(x, t) &= \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} (px - E^- t) \right\} \\ &= \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} (px - E^+ (-t)) \right\} \end{aligned}$$

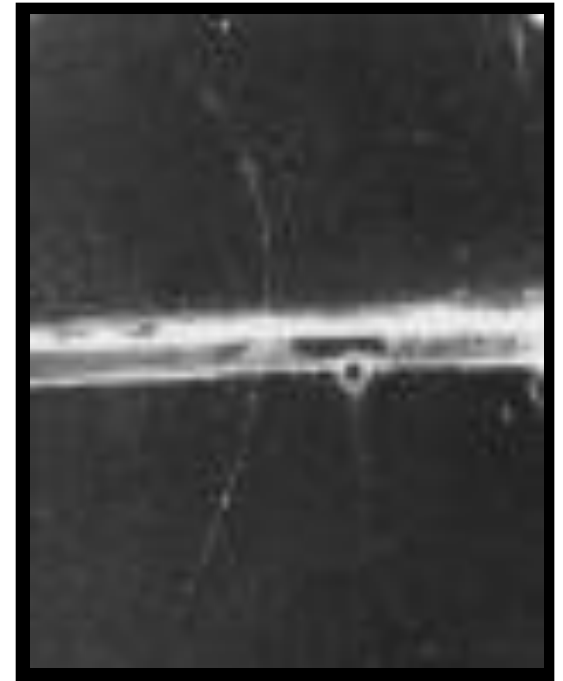
$$t \rightarrow -t$$

Tijdsrichting omkeren komt neer  
op lading omkeren: positron



# Antimaterie

- Elk deeltje heeft antideeltje met dezelfde
  - massa
  - levensduur
  - spin
- maar tegenovergestelde
  - lading
  - magnetisch moment
  - en andere quantumgetallen
- Deeltjes en antideeltjes annihileren
  - $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
- Maar ook gecreeerd worden
  - $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

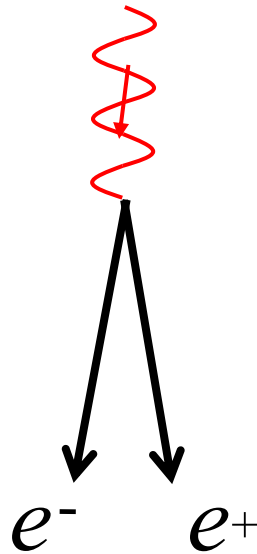


Voorbeeld: positron

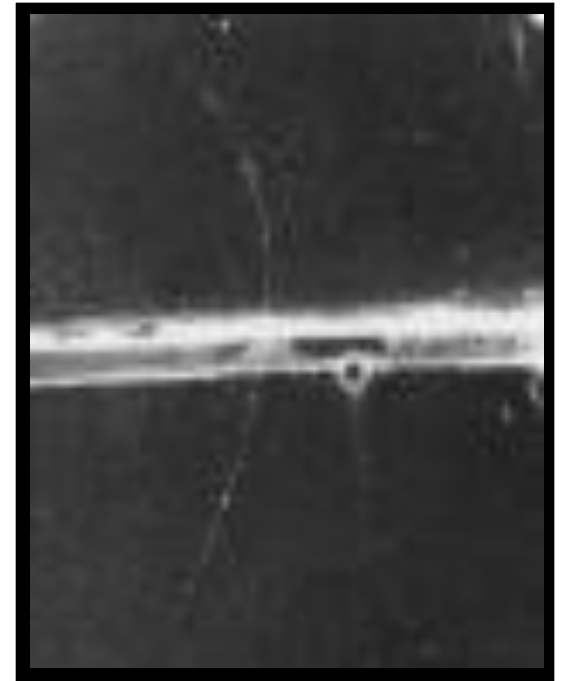


# *Productie van $e^+e^-$ paren*

Het paarcreatie proces, waarbij  $\gamma$ -straling overgaat in een elektron-positron paar



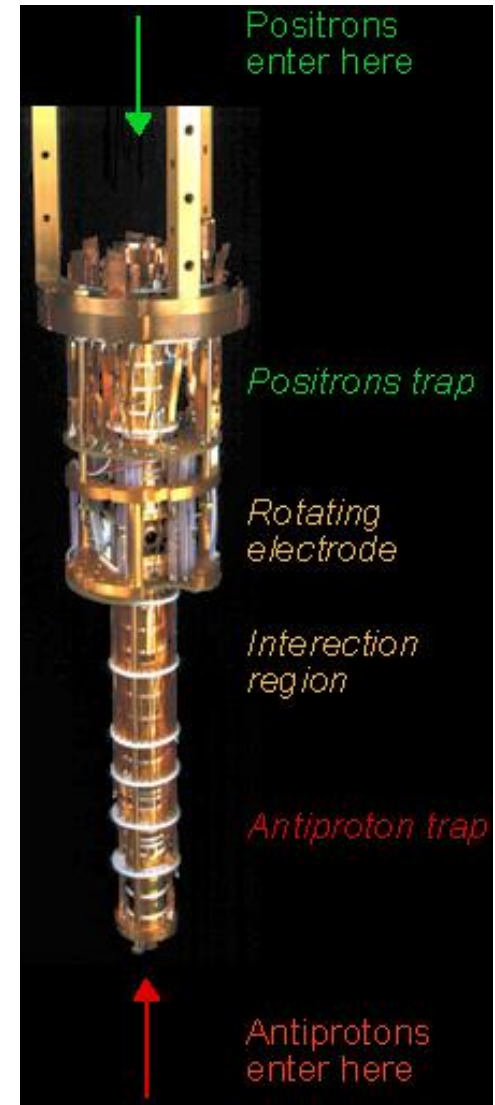
# *De ontdekking van antimaterie*



Anderson (1932) ontdekte het door  
Dirac voorspelde positron

# ***Het ATHENA experiment op CERN***

- CERN 1996: 9 antiatomen gemaakt, maar deze verdwenen snel
- CERN experiment ATHENA in 2002: 50.000 antiatomen waterstof gemaakt
- Start Trek's warp drive?
- Alle antiatomen op CERN gemaakt in een jaar: 100 W lamp, kwartier

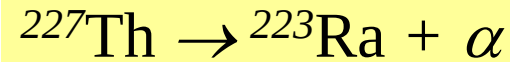




# *Neutrino's*

# Twee-deeltjes verval

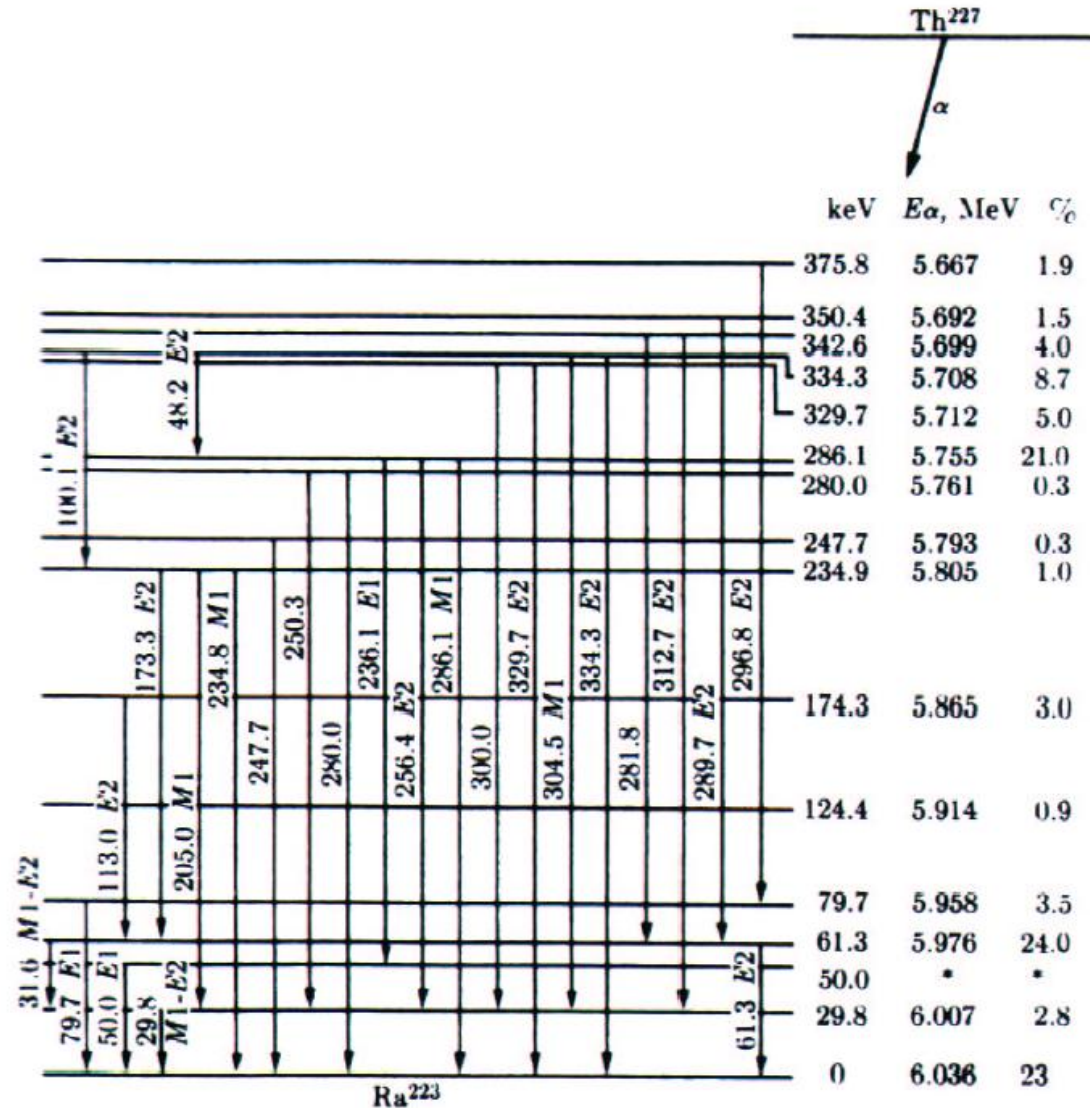
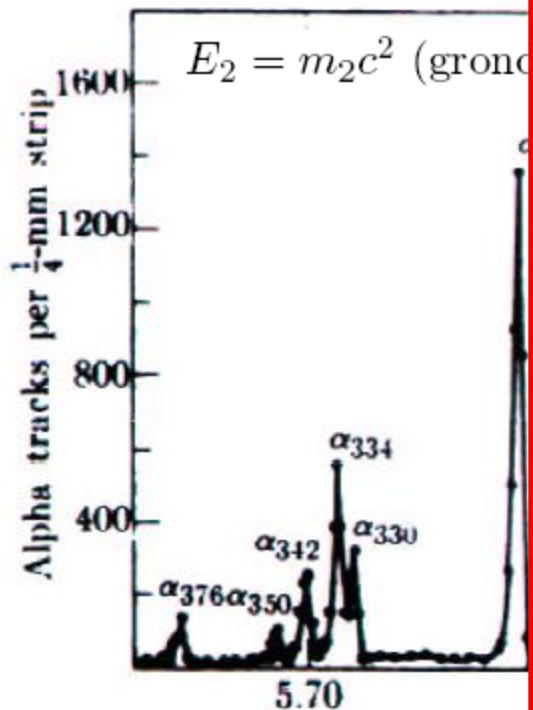
$$d \rightarrow 1 + 2$$



$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0 \text{ en } E_1 + E_2 = E_d = m_d c^2$$

$$T_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_d$$

Discreet spectrum

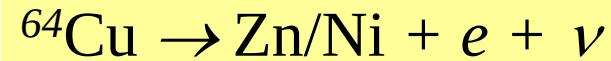


\* Not observed



# Drie-deeltjes verval

$$d \rightarrow 1 + 2 + 3$$

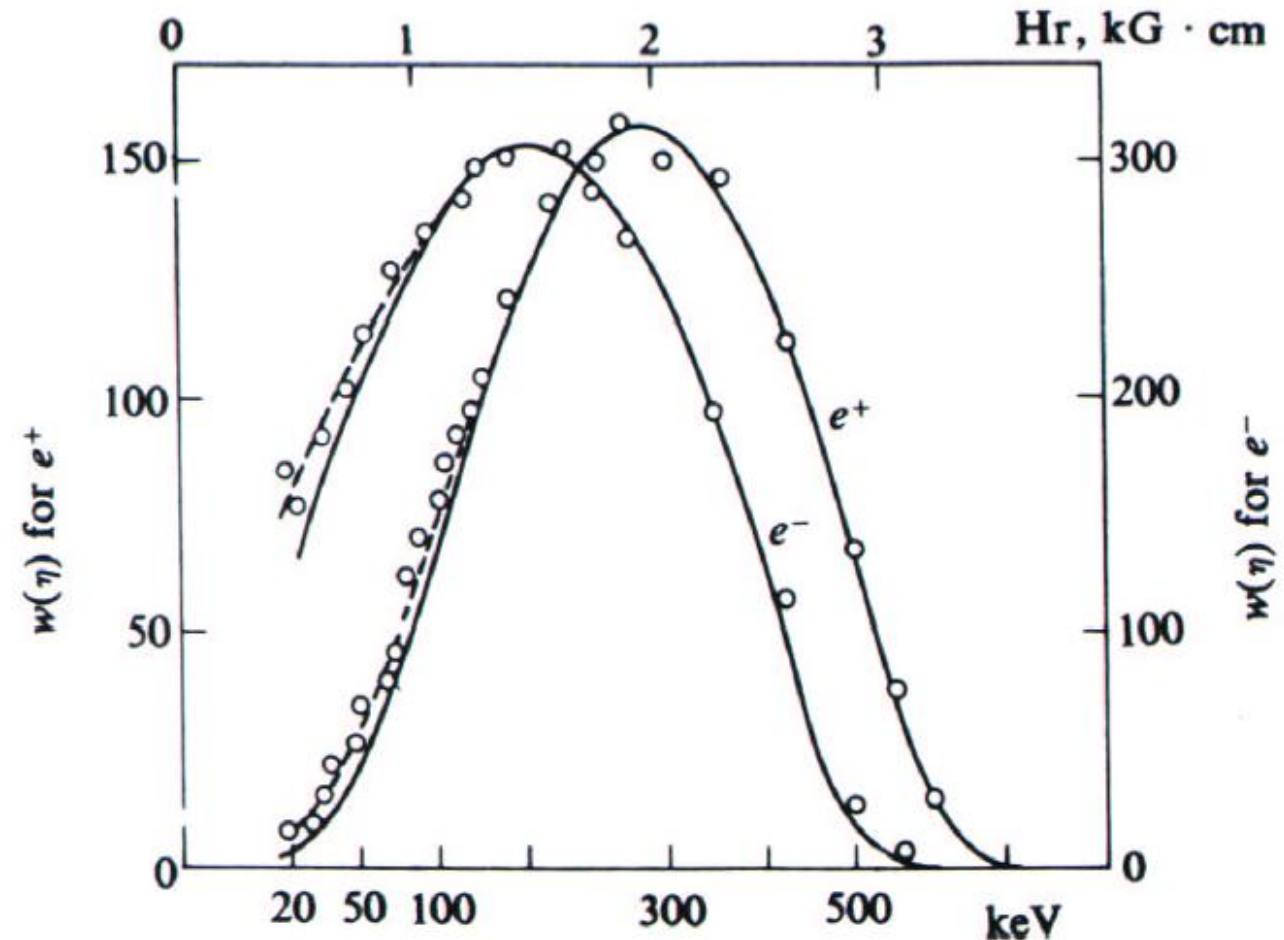


$$dP = \underbrace{(2\pi)^4 \hbar^2}_{\text{Normering}} |M|^2 \underbrace{\frac{d\vec{p}_1}{h^3} \frac{d\vec{p}_2}{h^3} \frac{d\vec{p}_3}{h^3}}_{\text{Faseruimte}} \cdot \underbrace{\delta(\vec{p}_d - \vec{p}_1 - \vec{p}_2 - \vec{p}_3) \delta(E_d - E_1 - E_2 - E_3)}_{\text{Energie- en impulsbehoud}}$$

Energiebehoud  
geschonden?

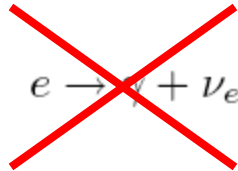
Pauli (1930) postuleert het  
bestaan van een neutrino!

Ontdekt in 1959 door  
Cowan and Reines



# Behoud van lading

Verval van elektron:  
 $\tau > 4.6 \times 10^{26}$  jaar



Lading is  
veelvoud van  $e$   $q = Qe$

$$a + b + \dots + i \rightarrow c + d + \dots + f$$

Additief quantumgetal

$$\sum Q_i = \sum Q_f$$

Ladingsbehoud  $\Leftrightarrow$  corresponderende symmetrie?

Lading quarks:  
 $Q_u = +2/3$  en  
 $Q_d = -1/3$

Isospin:  $u$  en  $d$  quarks hebben isospin  $1/2$   
Up quark heeft projectie  $+1/2$  en down  
quark  $-1/2$



# Behoud van baryongetal

Proton is ook stabiel  
 $\tau > 2.1 \times 10^{29}$  jaar

$$\begin{array}{ll}
 p \rightarrow e^+ \pi^0 & \tau > 5.5 \times 10^{32} \text{ jaar} \\
 p \rightarrow \mu^+ \pi^0 & \tau > 2.7 \times 10^{32} \text{ jaar} \\
 p \rightarrow e^+ \gamma & \tau > 4.6 \times 10^{32} \text{ jaar} \\
 p \rightarrow e^+ \text{ wat dan ook} & \tau > 0.6 \times 10^{30} \text{ jaar}
 \end{array}$$

Baryongetal  $B = 1$   
 voor  $p$  en  $n$

quarks  $B = 1/3$   
 antiquarks  $B = -1/3$

|       |     |               |     |     |       |     |               |
|-------|-----|---------------|-----|-----|-------|-----|---------------|
|       | $n$ | $\rightarrow$ | $p$ | $+$ | $e^-$ | $+$ | $\bar{\nu}_e$ |
| $Q$   | :   | 0             | =   | 1   | -     | 1   | + 0           |
| $B$   | :   | 1             | =   | 1   | +     | 0   | + 0           |
| $L_e$ | :   | 0             | =   | 0   | +     | 1   | - 1           |

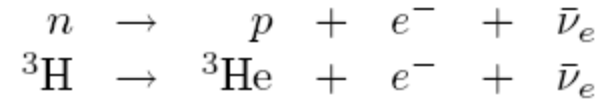
Leptonen, mesonen  
 hebben  $B = 0$

# Behoud van leptongetal

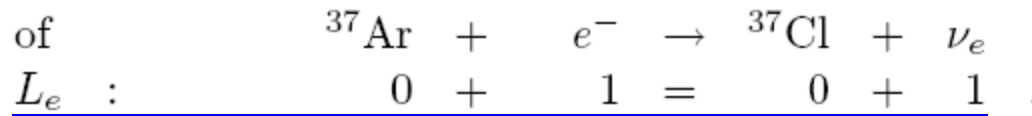
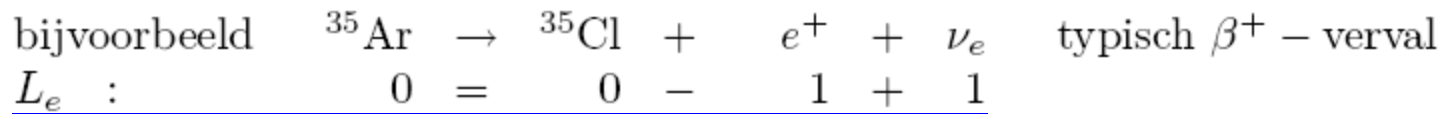
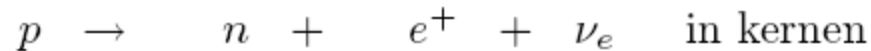
Observatie: verval  
treedt in paren op:  
 $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\tau^+\tau^-$

Voer leptongetallen in

$L_e, L_\mu, L_\tau$



$$\underline{L_e : \quad 0 = \quad 0 + \quad 1 - \quad 1.}$$



spin neutrino: 1/2

Verschil tussen neutrino's en  
antineutrino's?

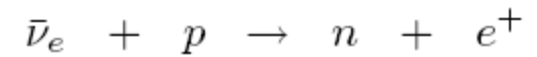




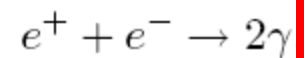
# Cowan en Reines: detectie neutrino

## Basisidee van experiment

- Gebruik antineutrino's
- Kernreactor als bron (700 MW)
- Detector: 200 liter water +  $\text{CdCl}_2$
- Vloeistofscintillatoren (3 - 1400 liter elk)

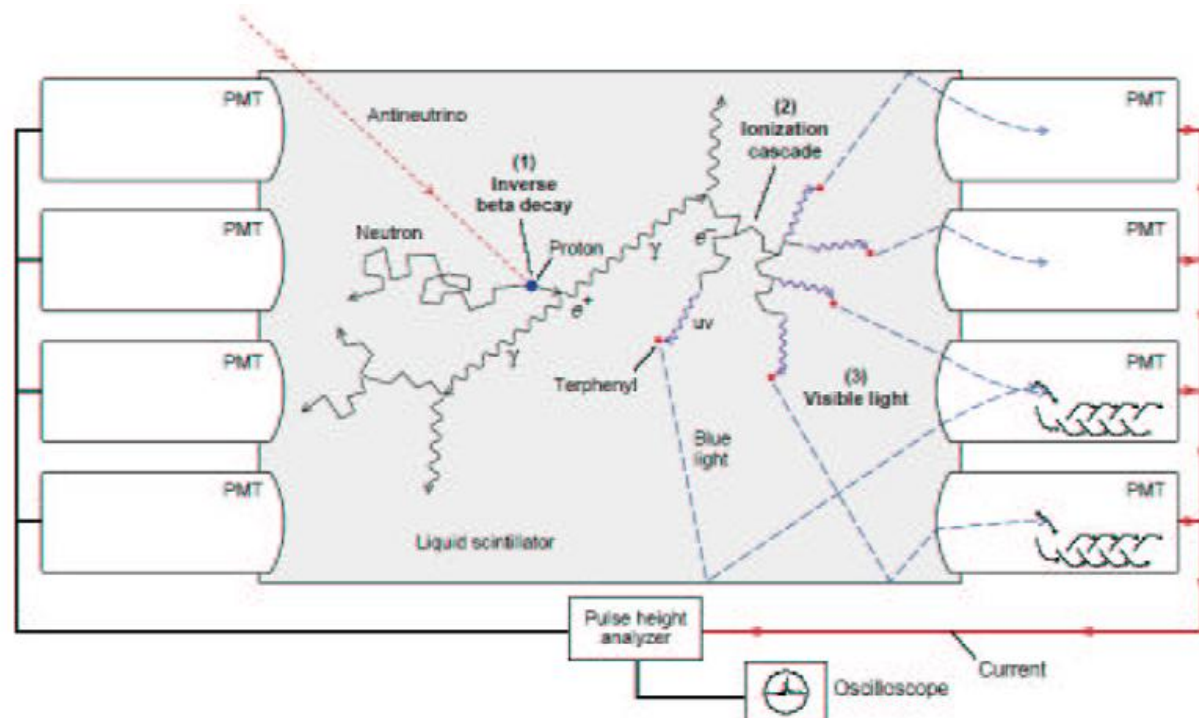


$$\underline{L_e : \quad -1 \quad + \quad 0 \quad \rightarrow \quad 0 \quad - \quad 1.}$$



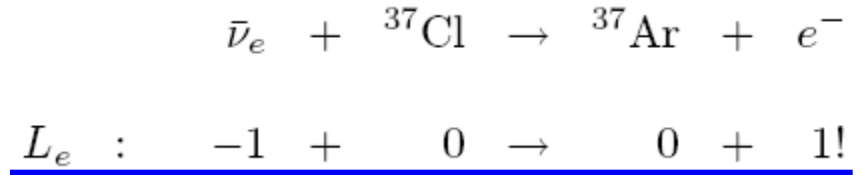
## Resultaat:

$$\langle \sigma \rangle = (12_{-4}^{+7}) \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

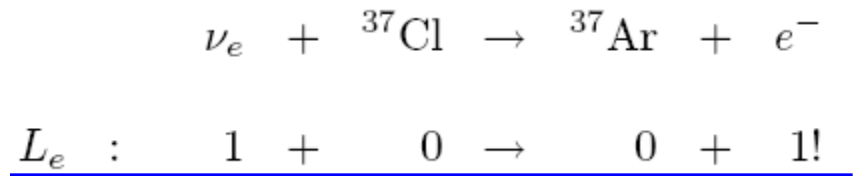


# *Davis: detectie neutrino*

Bij dezelfde reactor gemeten:  
reactie verloopt niet!



Neutrino's van de zon  
induceren de reactie:



Neutrino's en antineutrino's  
zijn verschillende deeltjes

Echter: flux factor 2 – 3 te laag!  
Opgelost: neutrino oscillaties!  
Neutrino's hebben massa!!!

# Zware neutrino's

## Pion verval

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & \text{B.R.} &= 0.999878 \\ \pi^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e & \text{B.R.} &= 1.2 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

Antideeltjes hebben dezelfde levensduur en B.R.

$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e.\end{aligned}$$

## Reacties

|           |           |   |     |               |     |   |         |                  |
|-----------|-----------|---|-----|---------------|-----|---|---------|------------------|
|           | $\nu_e$   | + | $n$ | $\rightarrow$ | $p$ | + | $e^-$   |                  |
| $L_e$ :   | 1         | + | 0   | =             | 0   | + | 1       | <u>treedt op</u> |
| $L_\mu$ : | 0         | + | 0   | =             | 0   | + | 0       |                  |
|           |           |   |     |               |     |   |         |                  |
|           | $\nu_\mu$ | + | $n$ | $\rightarrow$ | $p$ | + | $e^-$   |                  |
| $L_e$ :   | 0         | + | 0   | $\neq$        | 0   | + | 1       | treedt niet op   |
| $L_\mu$ : | 1         | + | 0   | $\neq$        | 0   | + | 0       |                  |
|           |           |   |     |               |     |   |         |                  |
|           | $\nu_\mu$ | + | $n$ | $\rightarrow$ | $p$ | + | $\mu^-$ |                  |
| $L_e$ :   | 0         | + | 0   | =             | 0   | + | 0       | <u>treedt op</u> |
| $L_\mu$ : | 1         | + | 0   | =             | 0   | + | 1       |                  |

$$\text{B.R.} < 10^{-12}$$

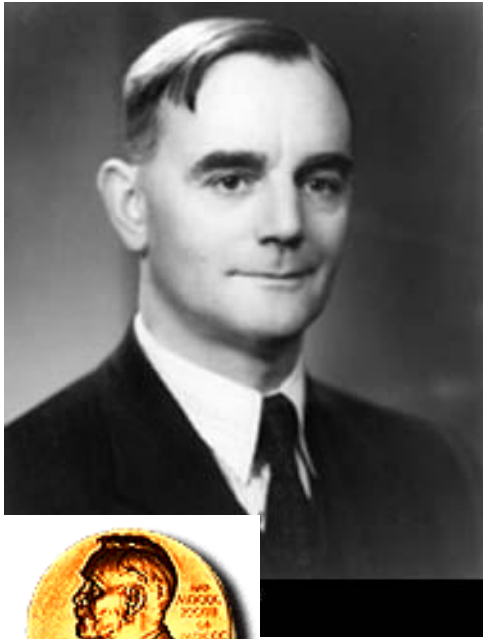
$$\mu^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-$$

$$\begin{aligned}\mu^- + {}^{32}\text{S} &\rightarrow e^- + {}^{32}\text{S}, & \sigma/\sigma_{\nu, \text{capture}} &< 7 \times 10^{-11} \\ \mu^- + {}^{32}\text{S} &\rightarrow e^+ + {}^{32}\text{Si}, & \sigma/\sigma_{\nu, \text{capture}} &< 9 \times 10^{-10}\end{aligned}$$

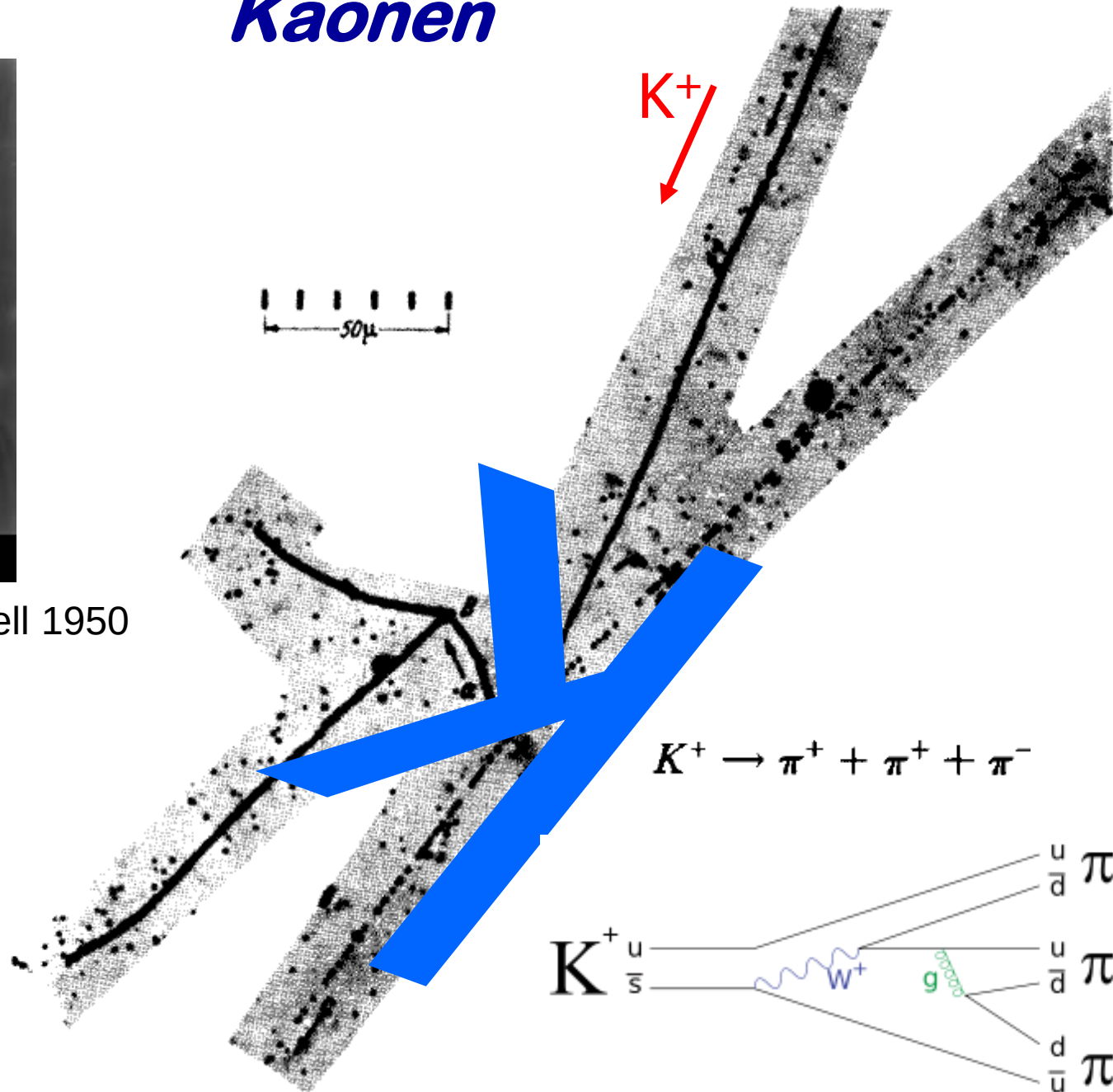
treedt niet op

# *Vreemdheid*

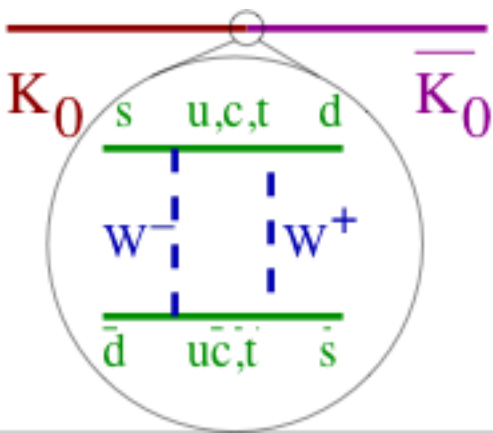
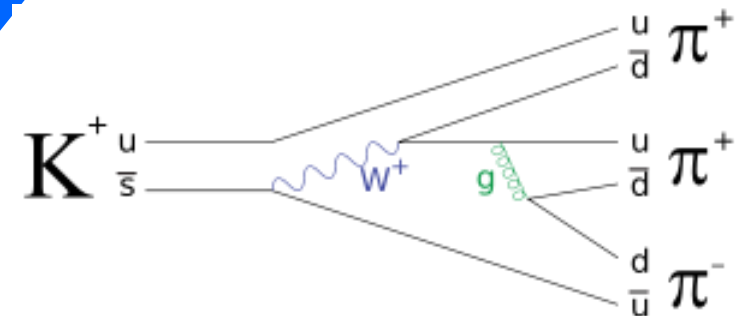
# Kaonen



C.F. Powell 1950



$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$



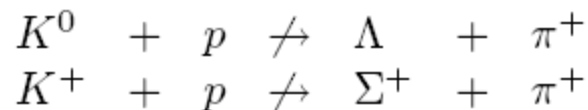
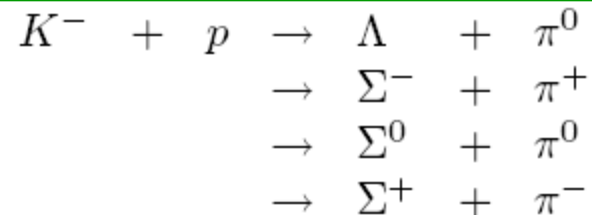
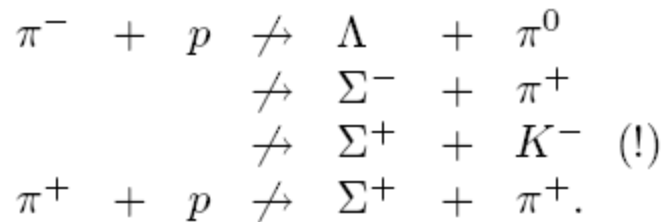
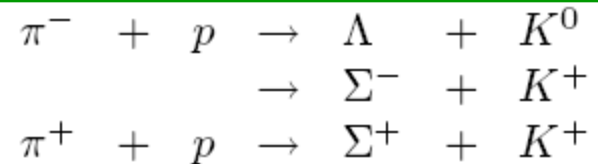
# Vreemdheid

Nieuwe mesonen  
en baryonen

$$K^0, K^+, \bar{K}^0, K^-$$

$$\Lambda^0, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$$

Eenvoudig in paren te produceren  
(`associated production')



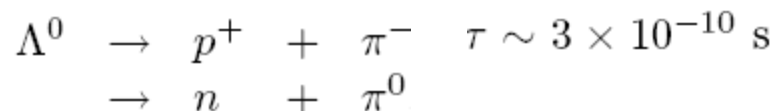
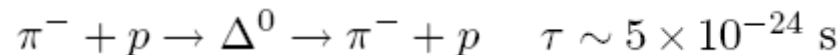
Sterke wisselwerking

Additief quantumgetal  $S$   
(vreemdheid):  $s$ -quark

$K^0$  en  $K^+$  een vreemdheid  $S = 1$

$\Lambda^0, \Sigma^-, \Sigma^+, \Sigma^0, K^-, \bar{K}^0$  vreemdheid  $S = -1$

Lange levensduur



Zwakke  
wisselwerking



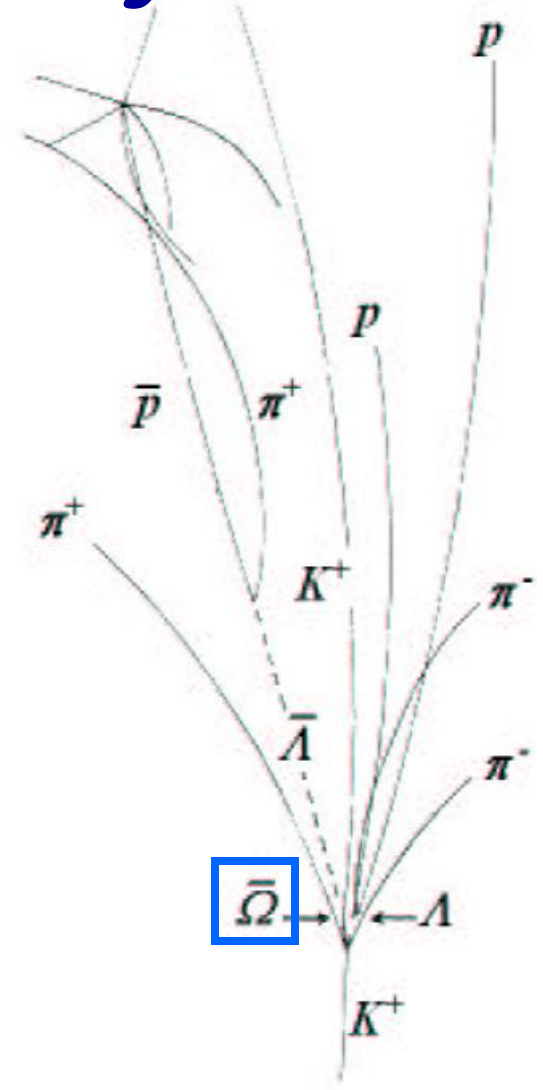
# Ontdekking anti-omega-min baryon

Produceer deeltje met  
vreemdheid  $S = 3$

Verval via

$$\bar{\Omega}^+ \rightarrow \bar{\Lambda} + K^+$$

$$\tau \sim 8.2 \times 10^{-11} \text{ s}$$



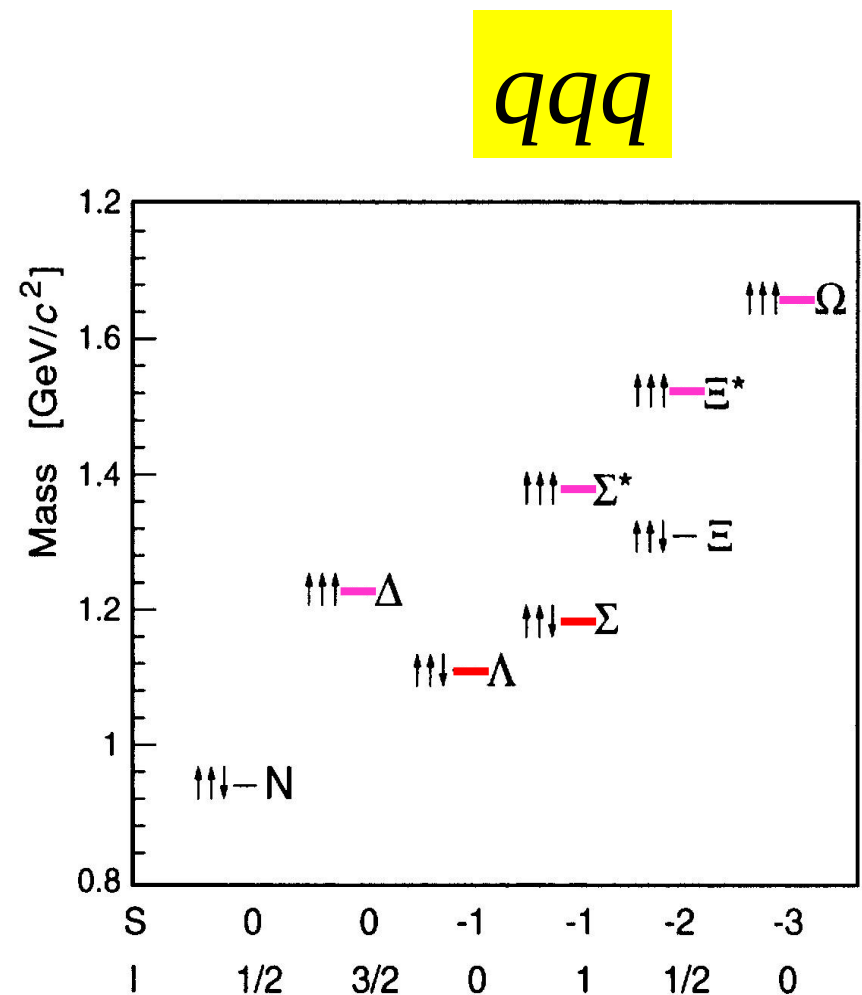
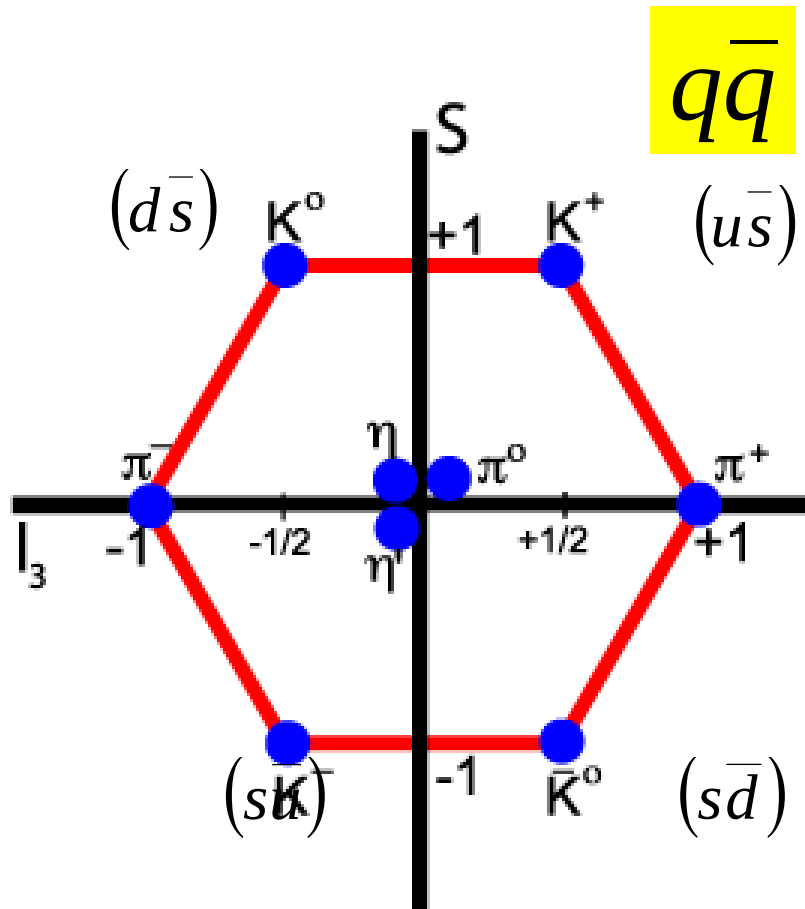
|       |       |   |     |               |                  |   |           |   |           |   |     |   |         |   |         |
|-------|-------|---|-----|---------------|------------------|---|-----------|---|-----------|---|-----|---|---------|---|---------|
|       | $K^+$ | + | $d$ | $\rightarrow$ | $\bar{\Omega}^+$ | + | $\Lambda$ | + | $\Lambda$ | + | $p$ | + | $\pi^+$ | + | $\pi^-$ |
| $B :$ | 0     | + | 2   | $\rightarrow$ | -1               | + | 1         | + | 1         | + | 1   | + | 0       | + | 0       |
| $S :$ | 1     | + | 0   | $\rightarrow$ | 3                | - | 1         | - | 1         | + | 0   | + | 0       | + | 0.      |

# *Quarkmodel: The eighthfold way*



# Quarksystemen: hadronen

## meson en baryon multipletten



pseudoscalar ( $J^P = 0^-$ ) octet + singlet

# Quarkmodel: mesonen

Mesonen  $q\bar{q}$  toestanden

Beschouw  $u$ ,  $d$  en  $s$

Gewichtsdiagram ( $Y, T_3$ )

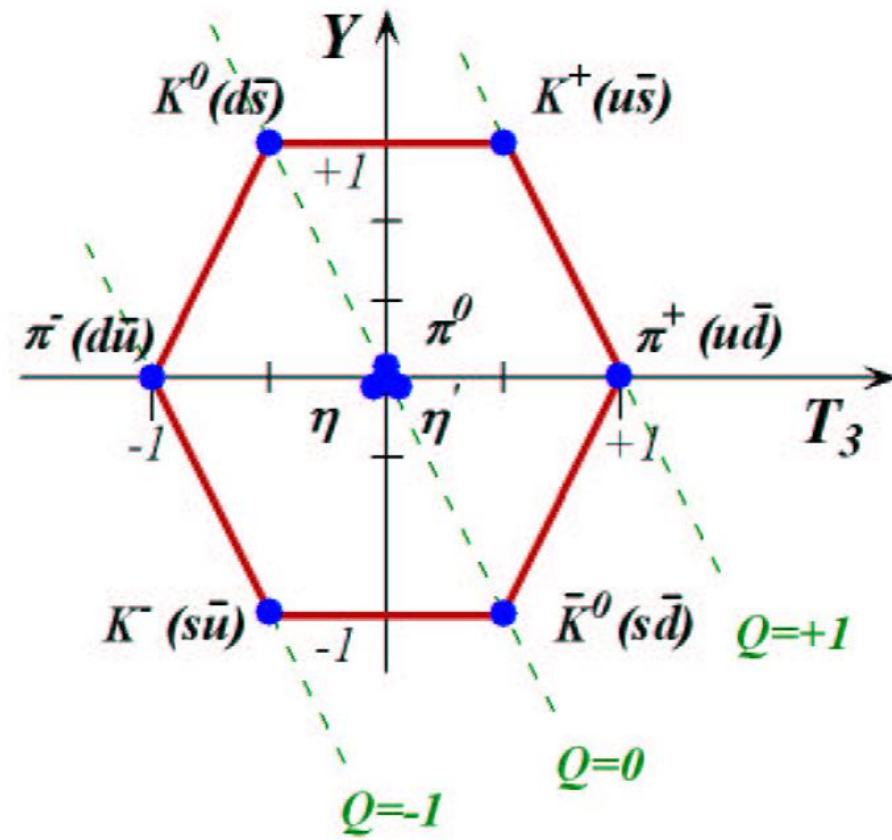
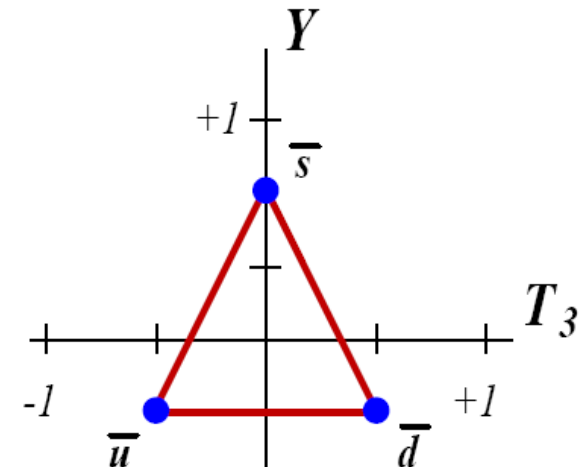
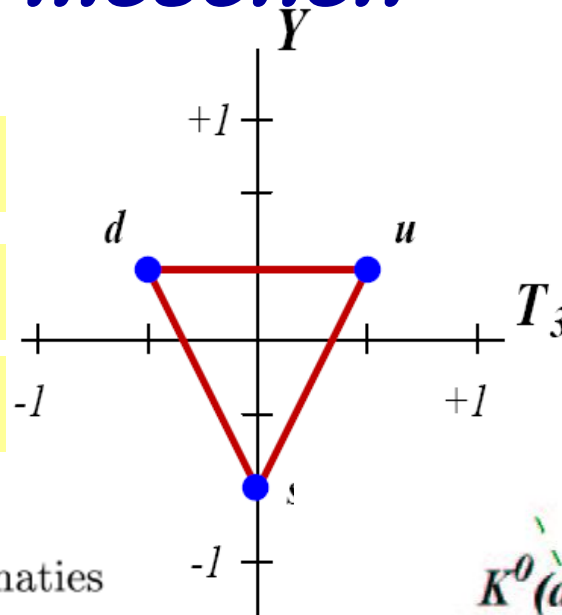
$Y = B + S + [\tilde{C} + \tilde{B} + \tilde{T}]$   
 ( $q\bar{q}$ )-paar zijn er  $9 = 3 \otimes 3$  combinaties

Pseudoscalaire mesonen ( $J^\pi = 0^-$ )

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

Constante lading

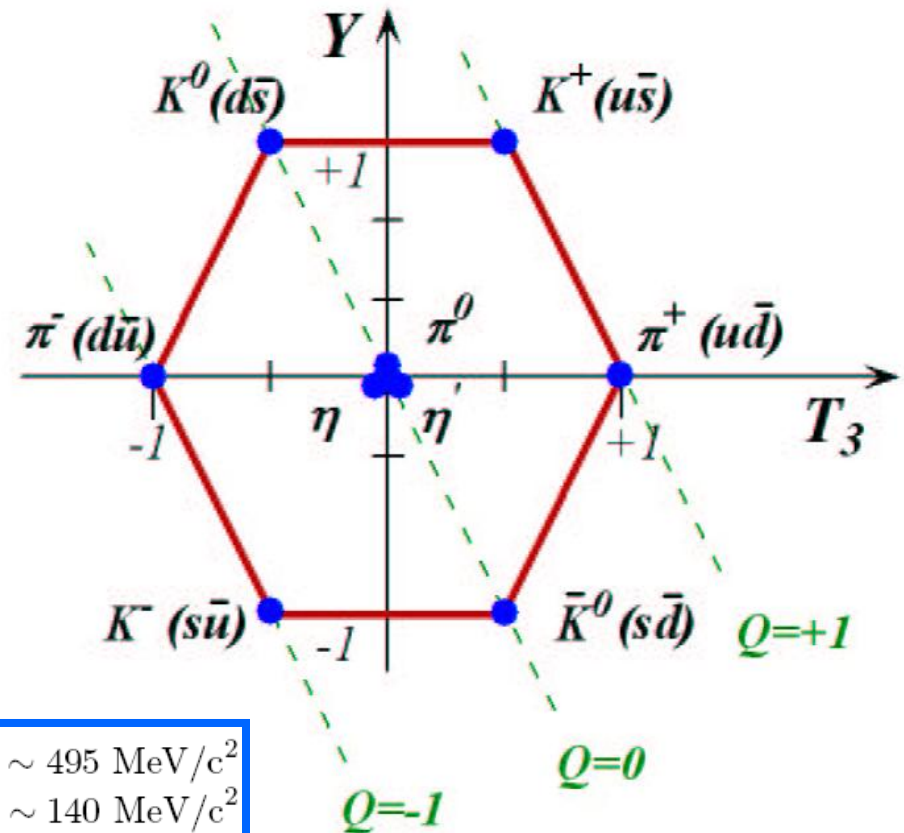
$$Q = \frac{Y}{2} + T_3$$



# Quarkmodel: pseudoscalaire mesonen

Pseudoscalaire mesonen ( $J^\pi = 0^-$ )

Hoekpunten



|                   |                                                                        |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $Y = 1, S = 1:$   | $K^0 = (d\bar{s}), K^+ = (u\bar{s}), m \sim 495 \text{ MeV}/c^2$       |
| $Y = 0, S = 0:$   | $\pi^- = (d\bar{u}), \pi^+ = (u\bar{d}), m \sim 140 \text{ MeV}/c^2$   |
| $Y = -1, S = -1:$ | $K^- = (s\bar{u}), \bar{K}^0 = (s\bar{d}), m \sim 495 \text{ MeV}/c^2$ |

Centrum

$$Y = 0, S = 0: \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}), m_{\pi^0} \sim 135 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = 0, S = 0: \eta_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}), m_{\eta_1} \sim 958 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = 0, S = 0: \eta_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(2s\bar{s} - u\bar{u} - d\bar{d}), m_{\eta_8} \sim 549 \text{ MeV}/c^2$$

# Quarkmodel: vector mesonen

Pseudoscalaire mesonen ( $J^\pi = 1^-$ )

Menghoek  $35^\circ$

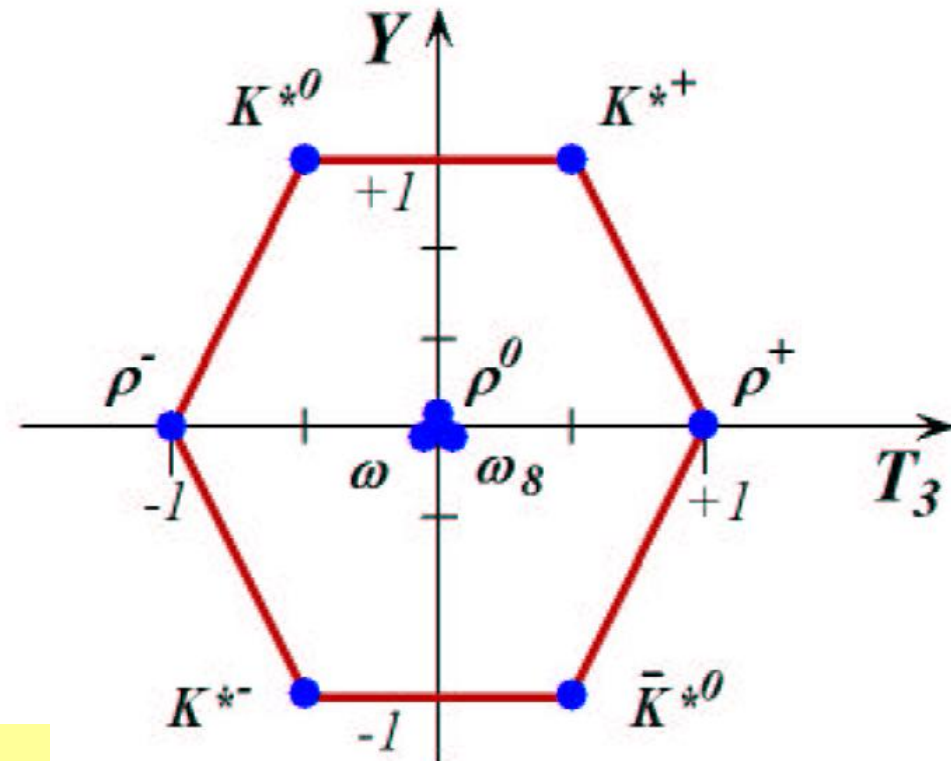
$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}),$$

$$\omega_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$$

$$\phi = -\omega_8 \cos \theta + \omega_1 \sin \theta$$

$$\omega = \omega_8 \sin \theta + \omega_1 \cos \theta$$

Deeltjes hebben grotere massa



$$Y = 1, S = 1 : K^{*0} = (d\bar{s}),$$

$$K^{*+} = (u\bar{s}), \quad m \sim 896 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = 0, S = 0 : \rho^- = (d\bar{u}),$$

$$\rho^+ = (u\bar{d}), \quad m \sim 770 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = -1, S = -1 : K^{*-} = (s\bar{u}),$$

$$\bar{K}^{*0} = (s\bar{d}), \quad m \sim 892 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = 0, S = 0 : \rho^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}),$$

$$m \sim 768 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = 0, S = 0 : \underline{\phi} \simeq (s\bar{s}), \quad m \sim 1020 \text{ MeV}/c^2$$

$$Y = 0, S = 0 : \omega \simeq \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d}), \quad m \sim 783 \text{ MeV}/c^2.$$



# Quarkmodel: baryonen

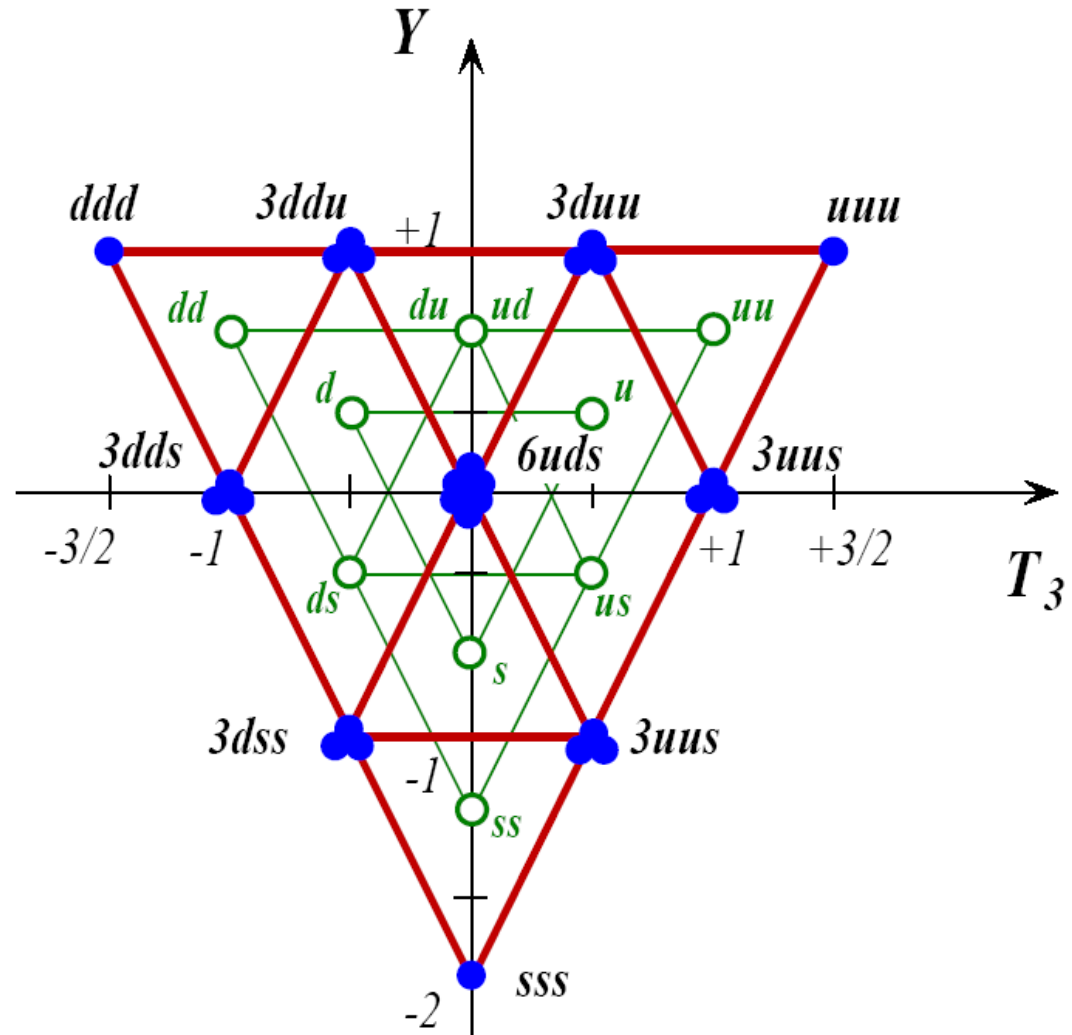
Baryonen  $qqq$  toestanden

Enkel deeltjes,  
geen antideeltjes

Geen baryonen met  
positieve vreemdheid

Groepentheorie

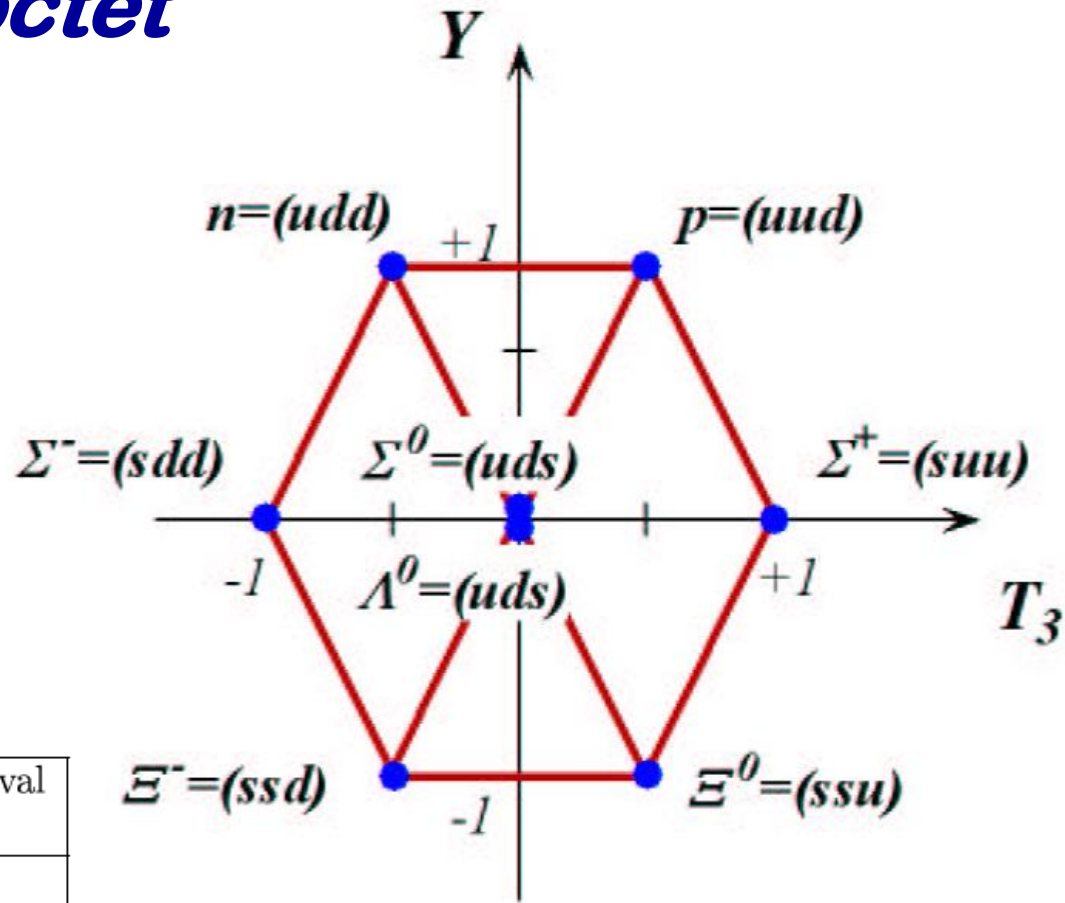
$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 27 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$



# Quarkmodel: octet

Octet spin  $J = \frac{1}{2}$  en even pariteit

Deeltjes stabiel in sterke wisselwerking



Massaformule

$$M = a + bY + c[T(T + 1) - \frac{Y^2}{4}]$$

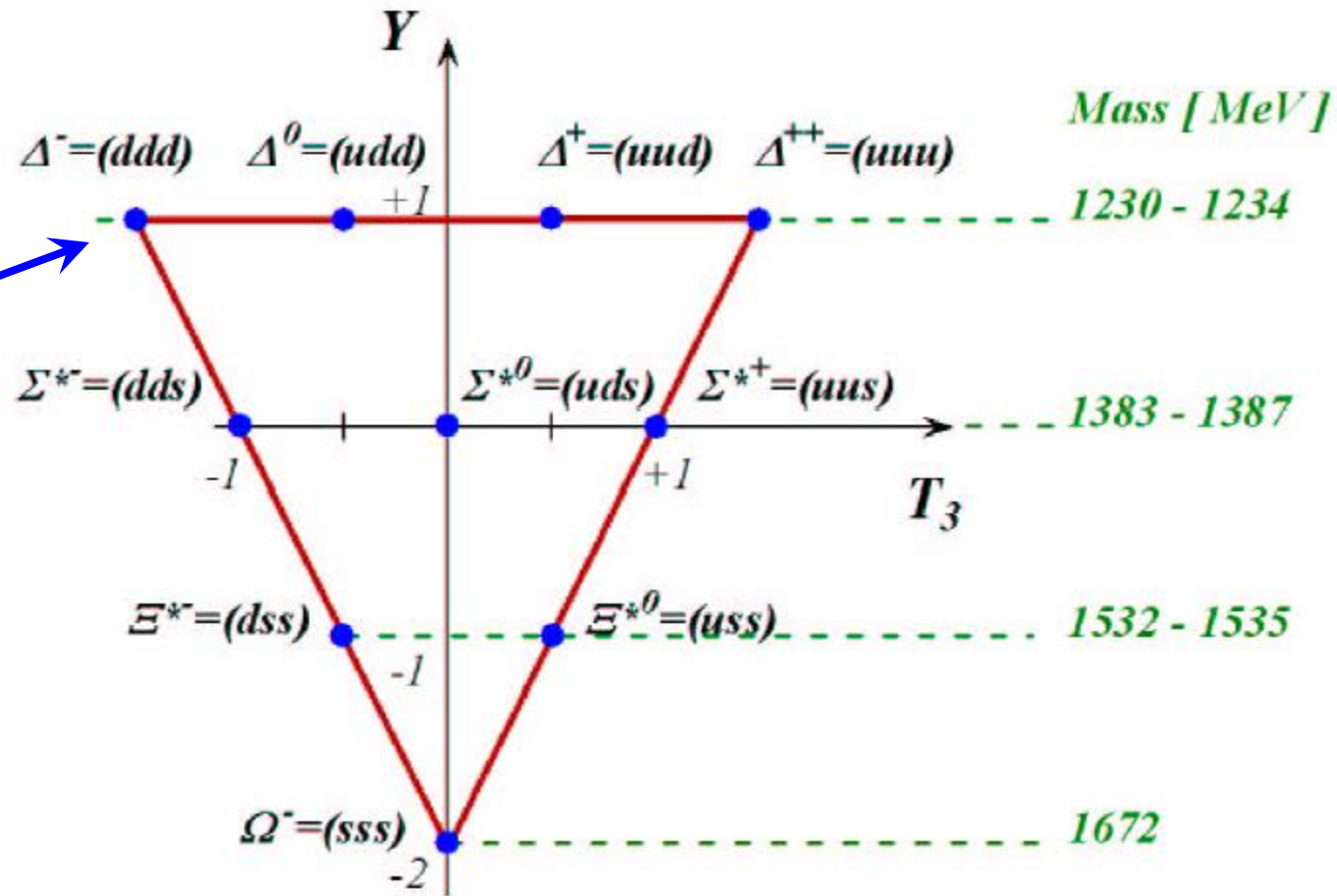
| Deeltje     | Massa<br>[ MeV ] | Levensduur<br>[ s ]   | Dominant verval    |
|-------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| p           | 938.3            | $\infty$              |                    |
| n           | 939.6            | 887                   | $pe^- \bar{\nu}_e$ |
| $\Lambda^0$ | 1115.6           | $2.6 \times 10^{-10}$ | $p\pi^-$           |
| $\Sigma^-$  | 1197.4           | $1.5 \times 10^{-10}$ | $n\pi^-$           |
| $\Sigma^0$  | 1192.6           | $7.4 \times 10^{-20}$ | $\Lambda^0 \gamma$ |
| $\Sigma^+$  | 1189.4           | $8.0 \times 10^{-17}$ | $p\pi^0$           |
| $\Xi^-$     | 1321             | $1.6 \times 10^{-10}$ | $\Lambda^0 \pi^-$  |
| $\Xi^0$     | 1321             | $2.9 \times 10^{-10}$ | $\Lambda^0 \pi^0$  |

# Quarkmodel: decouplet

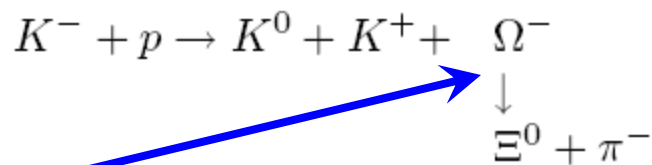
Decouplet

$$J^{\pi} = \frac{3}{2}^{+}$$

SU(3) kleur  
Pauli principe



Omega-min



$$\tau = 8.2 \times 10^{-11} \text{ s}$$

# Meson massa's

Berekend met constituent quark massa's  
en kleur-magnetische massa splitsing:

$$M_{q\bar{q}} = m_q + m_{\bar{q}} + \Delta M_{JJ'}$$

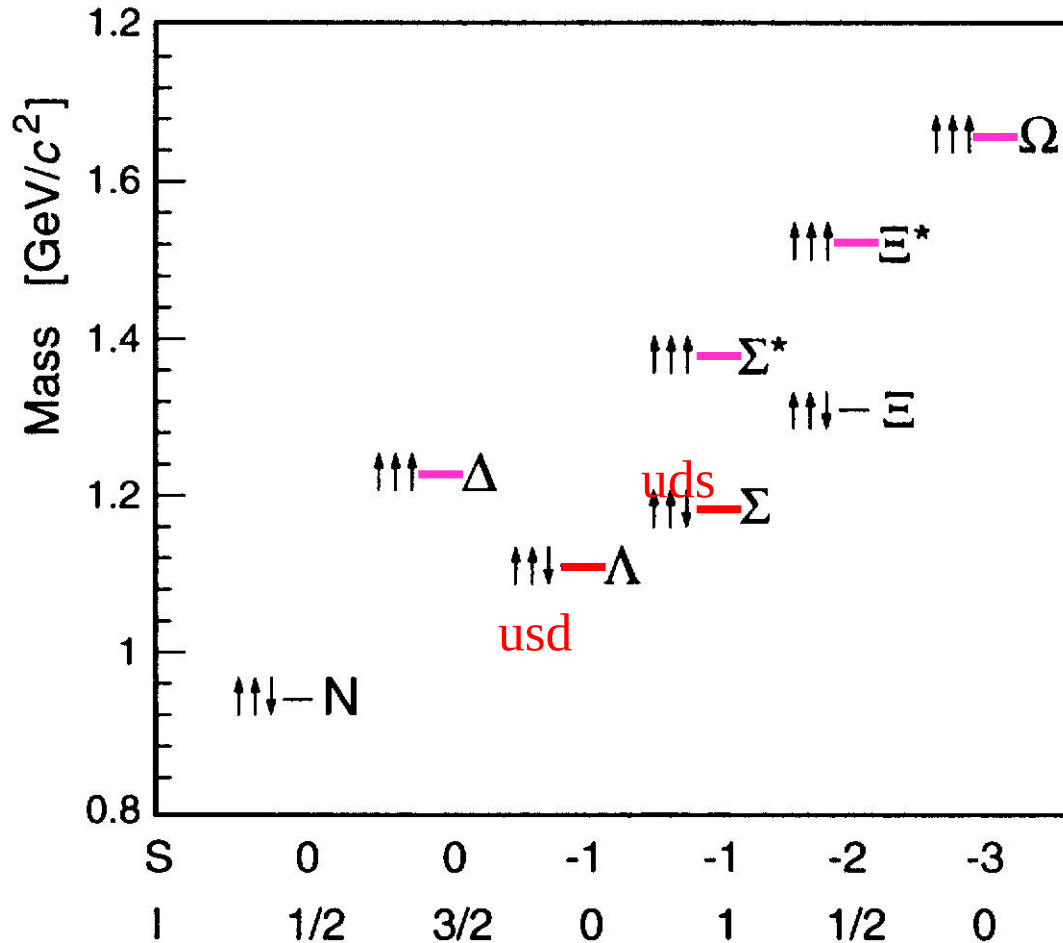
vrije parameters:  
constituent q massa's:

$$m_{u,d} \approx 310 \text{ MeV} / c^2$$

$$m_s \approx 483 \text{ MeV} / c^2$$

| Meson    | $J^P$ | $I$ | Mass [MeV/c <sup>2</sup> ] |                                                                                  |
|----------|-------|-----|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|          |       |     | Calculated                 | Experiment                                                                       |
| $\pi$    | $0^-$ | 1   | 140                        | $\left\{ \begin{array}{ll} 135.0 & \pi^0 \\ 139.6 & \pi^\pm \end{array} \right.$ |
| K        | $0^-$ | 1/2 | 485                        | $\left\{ \begin{array}{ll} 497.7 & K^0 \\ 493.7 & K^- \end{array} \right.$       |
| $\eta$   | $0^-$ | 0   | 559                        | 547.3                                                                            |
| $\eta'$  | $0^-$ | 0   | —                          | 957.8                                                                            |
| $\rho$   | $1^-$ | 1   | 780                        | 770.0                                                                            |
| $K^*$    | $1^-$ | 1/2 | 896                        | $\left\{ \begin{array}{ll} 896.1 & K^{*0} \\ 891.7 & K^{*-} \end{array} \right.$ |
| $\omega$ | $1^-$ | 0   | 780                        | 781.9                                                                            |
| $\phi$   | $1^-$ | 0   | 1032                       | 1019.4                                                                           |

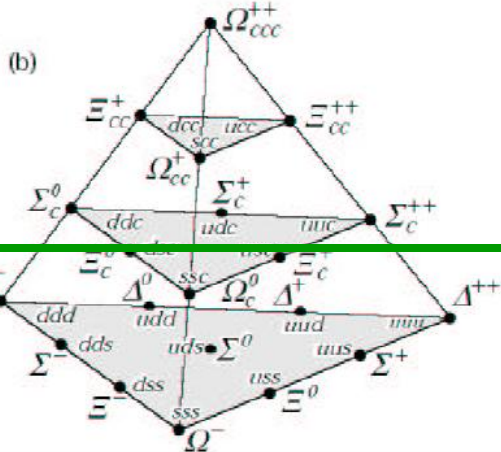
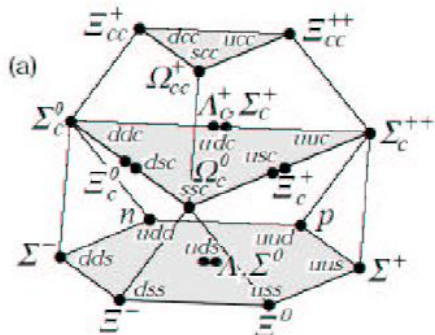
# Baryon massa spectrum



$\Lambda$ -  $\Sigma$  mass splitting  
 $80 \text{ MeV}/c^2$   
 vanwege  
 spin-spin interactie

Systematiek leidt tot  
 empirische massa formules

## J/Ψ - meson



BNL: Aubert u. a.  
28 GeV/c pBe  $\rightarrow e^+e^-X$

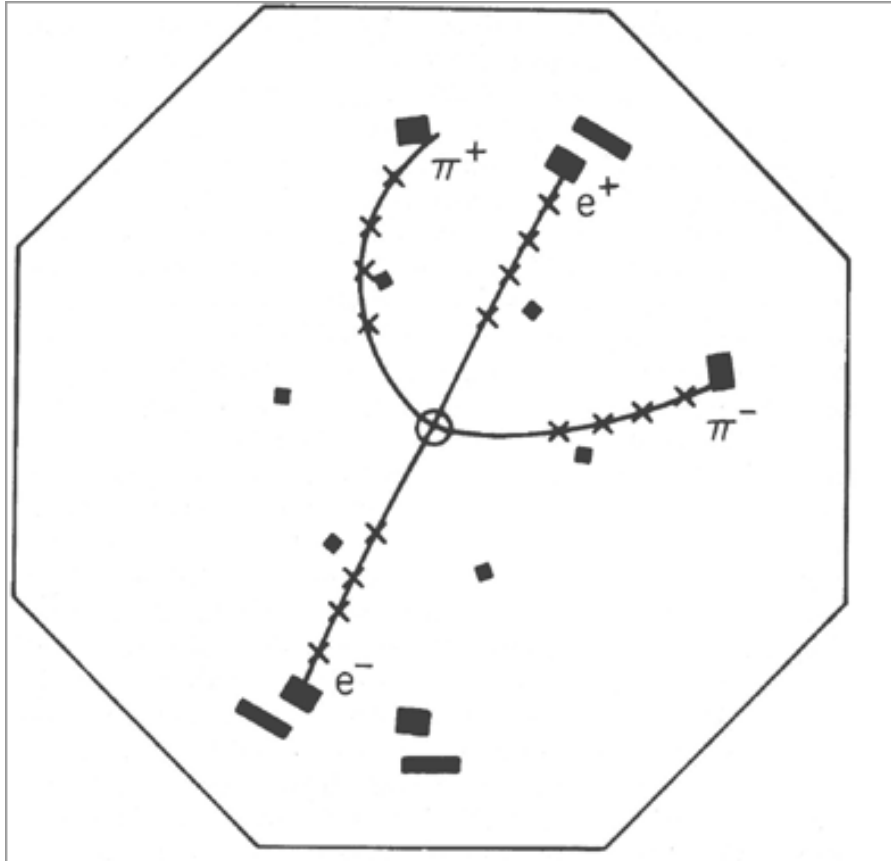
242 Ereignisse

Zahl der Ereignisse / (25 MeV/c<sup>2</sup>)

$m_{e^+e^-} / (\text{GeV}/c^2)$



# $\psi$ meson



Why  $J \dots$



# ***Samenvattend: de acteurs***



# Quarks en leptonen

## Quarks

| Naam    | Symbool | Lading<br>[ e ] | Massa<br>[ GeV/c <sup>2</sup> ] | Spin<br>[ $\hbar$ ] | $B$           | $T_3$          | $S$ | $C$ | $b$ | $t$ |
|---------|---------|-----------------|---------------------------------|---------------------|---------------|----------------|-----|-----|-----|-----|
| Up      | $u$     | $\frac{2}{3}$   | $2 - 8 \times 10^{-3}$          | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{2}$  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Down    | $d$     | $-\frac{1}{3}$  | $5 - 15 \times 10^{-3}$         | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{2}$ | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Strange | $s$     | $-\frac{1}{3}$  | 0.1 - 0.3                       | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | -1  | 0   | 0   | 0   |
| Charm   | $c$     | $\frac{2}{3}$   | 1.0 - 1.6                       | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | 0   | 1   | 0   | 0   |
| Bottom  | $b$     | $-\frac{1}{3}$  | 4.1 - 4.5                       | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | 0   | 0   | -1  | 0   |
| Top     | $t$     | $\frac{2}{3}$   | $180 \pm 12$                    | $\frac{1}{2}$       | $\frac{1}{3}$ | 0              | 0   | 0   | 0   | 1   |

## Leptonen

| Naam             | Symbool    | Lading<br>[ e ] | Massa<br>[ MeV/c <sup>2</sup> ] | Spin<br>[ $\hbar$ ] | Levensduur                  |
|------------------|------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Elektron         | $e^-$      | -1              | 0.511                           | $\frac{1}{2}$       | $> 4.3 \times 10^{23}$ jaar |
| e-Neutrino       | $\nu_e$    | 0               | $< 15 \times 10^{-6}$           | $\frac{1}{2}$       | $\infty?$                   |
| Muon             | $\mu^-$    | -1              | 105.66                          | $\frac{1}{2}$       | $2.197 \mu s$               |
| $\mu$ -Neutrino  | $\nu_\mu$  | 0               | $< 0.17$                        | $\frac{1}{2}$       | $\infty?$                   |
| Tau              | $\tau^-$   | -1              | 1777                            | $\frac{1}{2}$       | $2.91 \times 10^{-13} s$    |
| $\tau$ -Neutrino | $\nu_\tau$ | 0               | $< 24$                          | $\frac{1}{2}$       | $\infty?$                   |

