

# Quantummechanica en Relativiteitsleer bij kosmische straling

Niek Schultheiss

# Krachten en krachtdragers

- Op kerndeeltjes werkt de zwaartekracht.

## Krachten en krachtdragers

- Op kerndeeltjes werkt de zwaartekracht.
- Op kerndeeltjes werkt de elektromagnetische kracht.

## Krachten en krachtdragers

- Op kerndeeltjes werkt de zwaartekracht.
- Op kerndeeltjes werkt de elektromagnetische kracht.
- Kernen kunnen via de zwakke kernkracht vervallen.

## Krachten en krachtdragers

- Op kerndeeltjes werkt de zwaartekracht.
- Op kerndeeltjes werkt de elektromagnetische kracht.
- Kernen kunnen via de zwakke kernkracht vervallen.
- Kerndeeltjes worden bijeen gehouden door de sterke kernkracht.

## Krachten en krachtdragers

- Op kerndeeltjes werkt de zwaartekracht.
- Op kerndeeltjes werkt de elektromagnetische kracht.
- Kernen kunnen via de zwakke kernkracht vervallen.
- Kerndeeltjes worden bijeen gehouden door de sterke kernkracht.
- Krachten worden overgedragen door krachtdragers (bosonen).

## Neutronverval: een voorbeeld van zwakke interactie.

- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$

## Neutronverval: een voorbeeld van zwakke interactie.

- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$
- Het element schuift 1 plaats omhoog in het periodiek systeem.



## Neutronverval: een voorbeeld van zwakke interactie.

- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$
- Het element schuift 1 plaats omhoog in het periodiek systeem.
- Het  $W^-$  boson bepaalt de interactie.

## Neutronverval: een voorbeeld van zwakke interactie.

- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$
- Het element schuift 1 plaats omhoog in het periodiek systeem.
- Het  $W^-$  boson bepaalt de interactie.
- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}W^-$

## Neutronerval: een voorbeeld van zwakke interactie.

- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$
- Het element schuift 1 plaats omhoog in het periodiek systeem.
- Het  $W^-$  boson bepaalt de interactie.
- ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}W^-$
- ${}^0_{-1}W^- \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$

## Materie en anti-materie

- 1928: Theoretisch onderzoek van Dirac leidt tot deeltjes met een negatieve energie.

## Materie en anti-materie

- 1928: Theoretisch onderzoek van Dirac leidt tot deeltjes met een negatieve energie.
- Een negatieve energie heeft geen fysische betekenis.

## Materie en anti-materie

- 1928: Theoretisch onderzoek van Dirac leidt tot deeltjes met een negatieve energie.
- Een negatieve energie heeft geen fysische betekenis.
- De theorie is ook kloppend te maken door anti-materie te introduceren.

## Materie en anti-materie

- 1928: Theoretisch onderzoek van Dirac leidt tot deeltjes met een negatieve energie.
- Een negatieve energie heeft geen fysische betekenis.
- De theorie is ook kloppend te maken door anti-materie te introduceren.
- 1932: Anderson ontdekt het positron (een anti-elektron).

## Materie en anti-materie

- 1928: Theoretisch onderzoek van Dirac leidt tot deeltjes met een negatieve energie.
- Een negatieve energie heeft geen fysische betekenis.
- De theorie is ook kloppend te maken door anti-materie te introduceren.
- 1932: Anderson ontdekt het positron (een anti-elektron).
- Het positron heeft dezelfde eigenschappen als het elektron (ook de massa!). De lading is echter tegengesteld.



## Massa en energie

- Klassiek:  $E_{\text{totaal}} = E_{\text{kinetisch}} (+ E_{\text{potentieel}})$

## Massa en energie

- Klassiek:  $E_{\text{totaal}} = E_{\text{kinetisch}} (+ E_{\text{potentieel}})$
- Einstein:  $E_{\text{totaal}} = E_{\text{kinetisch}} + E_{\text{rust}} = mc^2 = \gamma m_0 c^2.$

## Massa en energie

- Klassiek:  $E_{\text{totaal}} = E_{\text{kinetisch}} (+ E_{\text{potentieel}})$
- Einstein:  $E_{\text{totaal}} = E_{\text{kinetisch}} + E_{\text{rust}} = mc^2 = \gamma m_0 c^2.$
- Energie is massa.

## De sterke kracht → kleurlading

- Zware elementen → veel protonen en neutronen in de kern.

## De sterke kracht → kleurlading

- Zware elementen → veel protonen en neutronen in de kern.
- Grote afstoting door Coulombse lading (elektromagnetische kracht).

## De sterke kracht → kleurlading

- Zware elementen → veel protonen en neutronen in de kern.
- Grote afstoting door Coulombse lading (elektromagnetische kracht).
- De sterke kracht is veel sterker dan de elektromagnetische kracht.

## De sterke kracht → kleurlading

- Zware elementen → veel protonen en neutronen in de kern.
- Grote afstoting door Coulombse lading (elektromagnetische kracht).
- De sterke kracht is veel sterker dan de elektromagnetische kracht.
- De sterke kracht werkt door uitwisseling van kleurlading.

## Soorten lading

	Materie	Anti-materie	Voorbeeld
Coulomb	positief	negatief	proton
	negatief	positief	elektron
Kleur	rood	anti-rood	
	groen	anti-groen	
	blauw	anti-blauw	



## Soorten lading

	Materie	Anti-materie	Voorbeeld
Coulomb	positief	negatief	proton
	negatief	positief	elektron
Kleur	rood	anti-rood	
	groen	anti-groen	
	blauw	anti-blauw	

- Proton  $\rightarrow$  kleurloos (rood + groen + blauw)

## Soorten lading

	Materie	Anti-materie	Voorbeeld
Coulomb	positief	negatief	proton
	negatief	positief	elektron
Kleur	rood	anti-rood	
	groen	anti-groen	
	blauw	anti-blauw	

- Proton  $\rightarrow$  kleurloos (rood + groen + blauw)
- Anti-proton  $\rightarrow$  kleurloos (anti-rood + anti-groen + anti-blauw)

## Krachtdragers: bosonen

- Gravitatie kracht: graviton? Werkt door de hele kosmos.

## Krachtdragers: bosonen

- Gravitatie kracht: graviton? Werkt door de hele kosmos.
- Elektromagnetische kracht: foton (lichtquantum). Werkt door de hele kosmos.

## Krachtdragers: bosonen

- Gravitatie kracht: graviton? Werkt door de hele kosmos.
- Elektromagnetische kracht: foton (lichtquantum). Werkt door de hele kosmos.
- Zwakke wisselwerking:  $W^-$ ,  $W^+$  en  $Z$  bosonen. Werkt tot  $10^{-15}\text{m}$ .

## Krachtdragers: bosonen

- Gravitatie kracht: graviton? Werkt door de hele kosmos.
- Elektromagnetische kracht: foton (lichtquantum). Werkt door de hele kosmos.
- Zwakke wisselwerking:  $W^-$ ,  $W^+$  en  $Z$  bosonen. Werkt tot  $10^{-15}\text{m}$ .
- Sterke wisselwerking: Gluon. Werkt tot  $10^{-15}\text{m}$ .

## Krachtdragers: bosonen

- Gravitatie kracht: graviton? Werkt door de hele kosmos.
- Elektromagnetische kracht: foton (lichtquantum). Werkt door de hele kosmos.
- Zwakke wisselwerking:  $W^-$ ,  $W^+$  en  $Z$  bosonen. Werkt tot  $10^{-15}\text{m}$ .
- Sterke wisselwerking: Gluon. Werkt tot  $10^{-15}\text{m}$ .
- De sterke wisselwerking neemt toe als de afstand toeneemt.

## Deeltjes

generatie	1	2	3
quarks	$u$	$c$	$t$
	$d$	$s$	$b$
leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$e$	$\mu$	$\tau$



## Deeltjes

generatie	1	2	3
quarks	$u$	$c$	$t$
	$d$	$s$	$b$
leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$e$	$\mu$	$\tau$

- Er zijn drie op elkaar lijkende generaties deeltjes.

## Deeltjes

generatie	1	2	3
quarks	$u$	$c$	$t$
	$d$	$s$	$b$
leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$e$	$\mu$	$\tau$

- Er zijn drie op elkaar lijkende generaties deeltjes.
- De eerste generatie is stabiel.

## Stabiele deeltjes

- $u$ : up-quark, Coulombse lading is  $\frac{2}{3}e$ .

## Stabiele deeltjes

- $u$ : up-quark, Coulombse lading is  $\frac{2}{3}e$ .
- $d$ : down-quark, Coulombse lading is  $-\frac{1}{3}e$ .

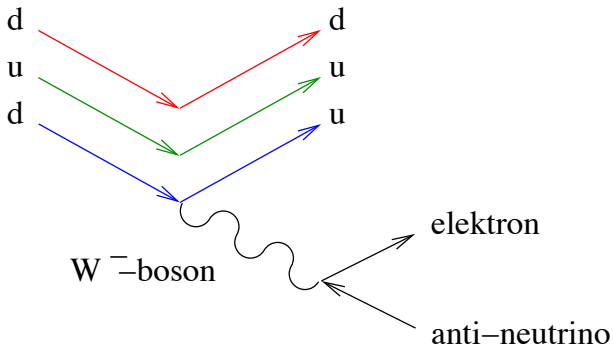
## Stabiele deeltjes

- $u$ : up-quark, Coulombse lading is  $\frac{2}{3}e$ .
- $d$ : down-quark, Coulombse lading is  $-\frac{1}{3}e$ .
- $e$ : elektron, Coulombse lading is  $-e$ .

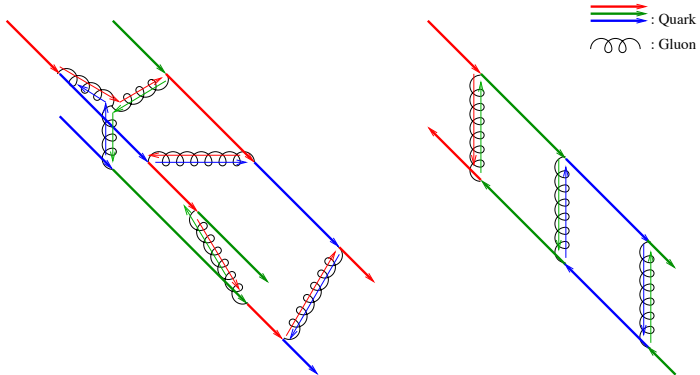
## Stabiele deeltjes

- $u$ : up-quark, Coulombse lading is  $\frac{2}{3}e$ .
- $d$ : down-quark, Coulombse lading is  $-\frac{1}{3}e$ .
- $e$ : elektron, Coulombse lading is  $-e$ .
- $\bar{\nu}$ : anti-neutrino, Coulombse lading is  $0e$

## Het Feynmandiagram voor neutronverval



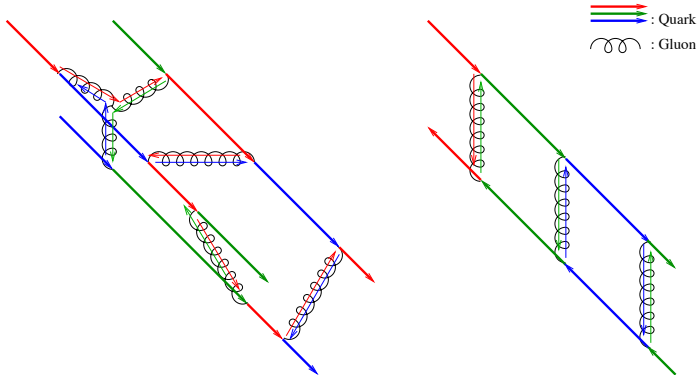
# Baryonen (proton en neutron) en mesonen (pion)





## Baryonen (proton en neutron) en mesonen (pion)

- Gluonen houden de quarks in een proton, neutron of pion door uitwisseling van kleur samen.



## Processen in een airshower

- Hadronisch deel: interacties van baryonen (o.a. proton of neutron) maken door de sterke kernkracht mesonen (o.a. pionen).

## Processen in een airshower

- Hadronisch deel: interacties van baryonen (o.a. proton of neutron) maken door de sterke kernkracht mesonen (o.a. pionen).
- Overgangsdeel: pionen worden omgezet in lepton / anti-lepton of foton paren.

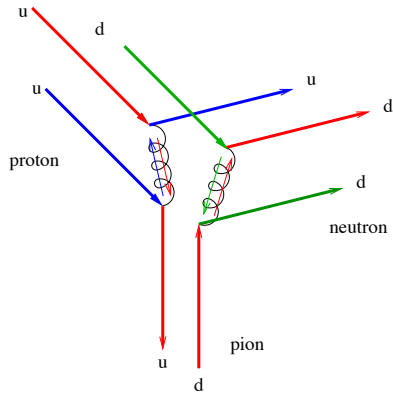
## Processen in een airshower

- Hadronisch deel: interacties van baryonen (o.a. proton of neutron) maken door de sterke kernkracht mesonen (o.a. pionen).
- Overgangsdeel: pionen worden omgezet in lepton / anti-lepton of foton paren.
- Elektromagnetisch deel: Door creatie en annihilatie van lepton anti-leptonparen wordt de energie verdeeld over een toenemende hoeveelheid fotonen.

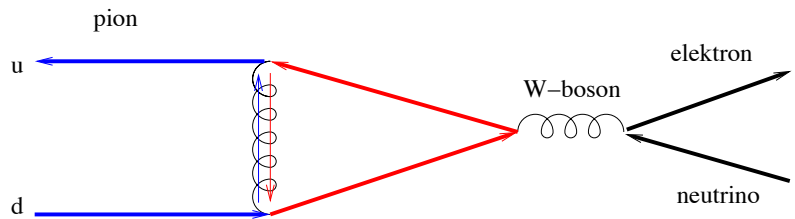
## Processen in een airshower

- Hadronisch deel: interacties van baryonen (o.a. proton of neutron) maken door de sterke kernkracht mesonen (o.a. pionen).
- Overgangsdeel: pionen worden omgezet in lepton / anti-lepton of foton paren.
- Elektromagnetisch deel: Door creatie en annihilatie van lepton anti-leptonparen wordt de energie verdeeld over een toenemende hoeveelheid fotonen.
- De energie wordt grotendeels omgezet in deeltjes.

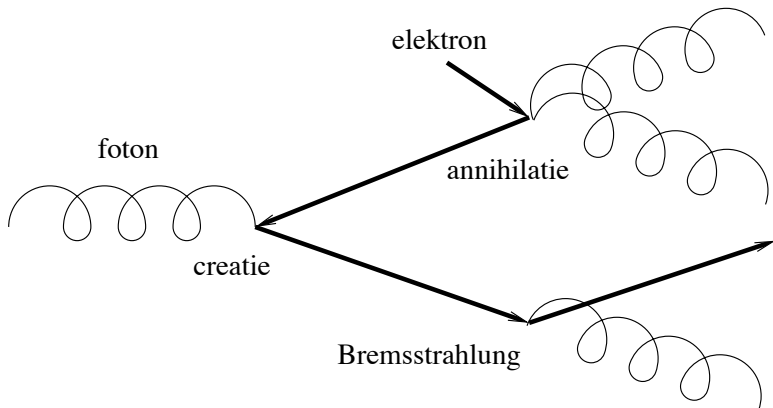
## Pion creatie



# Pion verval



## Paarproductie, annihilatie en bremsstraling





# Muonen

- Muonen en anti-muonen maken deel uit van de tweede generatie en lijken op elektronen.

# Muonen

- Muonen en anti-muonen maken deel uit van de tweede generatie en lijken op elektronen.
- Muonen hebben een gemiddelde levensduur van  $2,2\mu\text{s}$ .

# Muonen

- Muonen en anti-muonen maken deel uit van de tweede generatie en lijken op elektronen.
- Muonen hebben een gemiddelde levensduur van  $2,2\mu\text{s}$ .
- Omdat  $c = 299792458\text{m/s}$  verwachten we een gemiddelde maximale weglengte van 660m.

## Muonen

- Muonen en anti-muonen maken deel uit van de tweede generatie en lijken op elektronen.
- Muonen hebben een gemiddelde levensduur van  $2,2\mu\text{s}$ .
- Omdat  $c = 299792458\text{m/s}$  verwachten we een gemiddelde maximale weglengte van  $660\text{m}$ .
- Een groot deel van de muonen bereikt echter het aardoppervlak. De luchtlaag is veel dikker dan  $660\text{m}$ .

## Tijddilatatie

- Muonen met een energie van  $10^{10}$  eV of meer komen veel in airshowers voor.

## Tijddilatatie

- Muonen met een energie van  $10^{10}$  eV of meer komen veel in airshowers voor.
- Volgens Einstein is de energie te schrijven als:  $E = \gamma m_0 c^2$ .

## Tijddilatatie

- Muonen met een energie van  $10^{10}$  eV of meer komen veel in airshowers voor.
- Volgens Einstein is de energie te schrijven als:  $E = \gamma m_0 c^2$ .
- De rustmassa van een muon is ongeveer 100 MeV.

## Tijddilatatie

- Muonen met een energie van  $10^{10}\text{eV}$  of meer komen veel in airshowers voor.
- Volgens Einstein is de energie te schrijven als:  $E = \gamma m_0 c^2$ .
- De rustmassa van een muon is ongeveer  $100\text{MeV}$ .
- De massa wordt door de Lorentz factor  $\gamma = 10^{10}\text{eV}/10^8\text{eV} = 10^2$  maal de rustmassa.



## Tijddilatatie

- Muonen met een energie van  $10^{10}\text{eV}$  of meer komen veel in airshowers voor.
- Volgens Einstein is de energie te schrijven als:  $E = \gamma m_0 c^2$ .
- De rustmassa van een muon is ongeveer  $100\text{MeV}$ .
- De massa wordt door de Lorentz factor  $\gamma = 10^{10}\text{eV}/10^8\text{eV} = 10^2$  maal de rustmassa.
- De tijd gaat door deze snelheid langzamer. Hier werkt dezelfde Lorentz factor. De gemiddelde weglengte van  $660\text{m}$  wordt dus  $66\text{km}$ .

## Tijddilatatie

- Muonen met een energie van  $10^{10}\text{eV}$  of meer komen veel in airshowers voor.
- Volgens Einstein is de energie te schrijven als:  $E = \gamma m_0 c^2$ .
- De rustmassa van een muon is ongeveer  $100\text{MeV}$ .
- De massa wordt door de Lorentz factor  $\gamma = 10^{10}\text{eV}/10^8\text{eV} = 10^2$  maal de rustmassa.
- De tijd gaat door deze snelheid langzamer. Hier werkt dezelfde Lorentz factor. De gemiddelde weglengte van  $660\text{m}$  wordt dus  $66\text{km}$ .
- Een groot deel van de muonen komt dus op het aardoppervlak.

## Lengtecontractie

- Een waarnemer die met het muon meereist heeft een klok die synchroon loopt met de klok van het muon.

## Lengtecontractie

- Een waarnemer die met het muon meereist heeft een klok die synchroon loopt met de klok van het muon.
- Toch zal het muon op dezelfde plaats vervallen.

## Lengtecontractie

- Een waarnemer die met het muon meereist heeft een klok die synchroon loopt met de klok van het muon.
- Toch zal het muon op dezelfde plaats vervallen.
- De door de waarnemer gemeten verplaatsing is dus 660m.

## Lengtecontractie

- Een waarnemer die met het muon meereist heeft een klok die synchroon loopt met de klok van het muon.
- Toch zal het muon op dezelfde plaats vervallen.
- De door de waarnemer gemeten verplaatsing is dus 660m.
- Volgens een waarnemer op Aarde is de afstand echter 66km.

## Lengtecontractie

- Een waarnemer die met het muon meereist heeft een klok die synchroon loopt met de klok van het muon.
- Toch zal het muon op dezelfde plaats vervallen.
- De door de waarnemer gemeten verplaatsing is dus 660m.
- Volgens een waarnemer op Aarde is de afstand echter 66km.
- Nu is er ook sprake van dezelfde Lorentz factor.

## Lengtecontractie

- Een waarnemer die met het muon meereist heeft een klok die synchroon loopt met de klok van het muon.
- Toch zal het muon op dezelfde plaats vervallen.
- De door de waarnemer gemeten verplaatsing is dus 660m.
- Volgens een waarnemer op Aarde is de afstand echter 66km.
- Nu is er ook sprake van dezelfde Lorentz factor.
- Een waarnemer die met het muon meereist ziet de Aarde dus als een ellipsoïde en niet als een bol.