

VAN ATOOM TOT KOSMOS

Wie het kleine niet eert ...

Piet Mulders

pjg.mulders@gmail.com

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



European Research Council

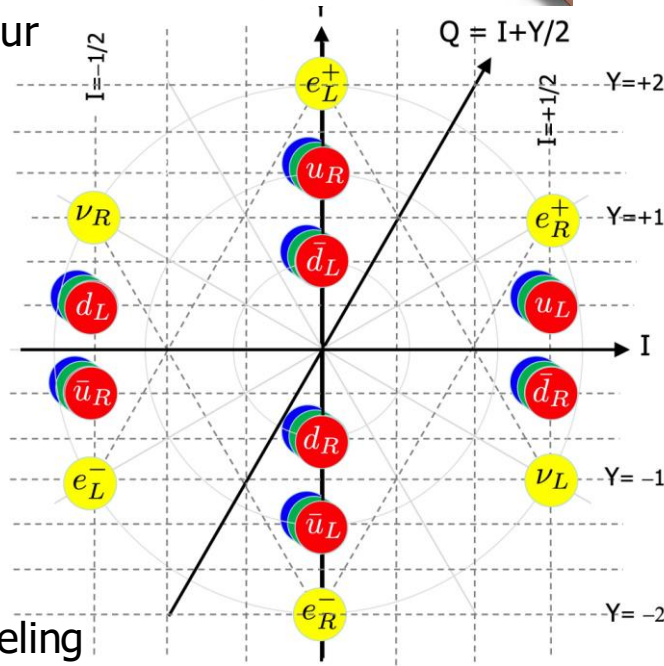


Hoofdstuk 5

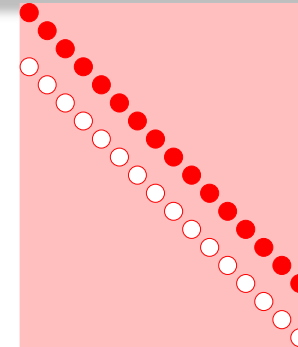
De magie van drie

DE MAGIE VAN DRIE

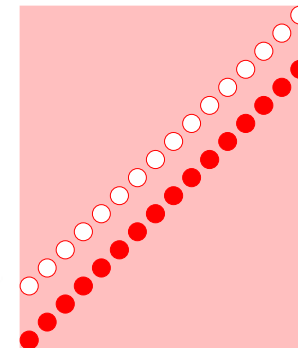
- De discrete CPT symmetrieën
 - Chiraliteit: links/rechts
- Continue symmetrieën
- De multiplet structuur



- Krachtdeeltjes
- Kwantum verstrengeling
- De ijkveldentheorie en het Higgs mechanisme
- Het fundament van het SM
 - 2 is niet genoeg
 - 4 is niet nodig

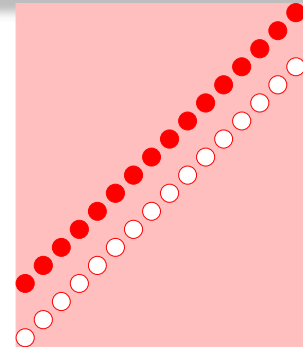


tijdspiegel (T)

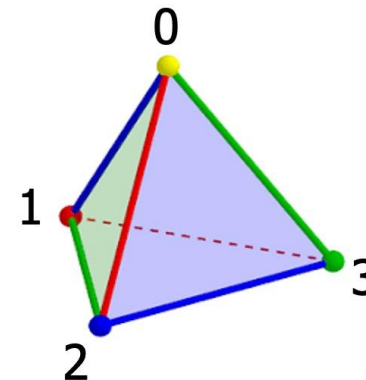
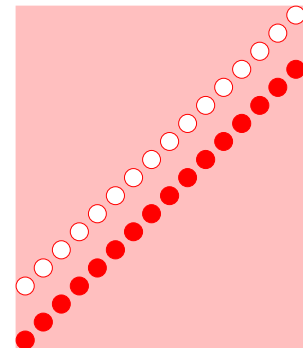


||

ruimtespiegel (P)



ladingspiegel (C)



De magie van drie

- De discrete CPT symmetrieën
 - Ladingsconjugatie C: deeltje – antideeltje
 - Pariteit P: spiegeling in de ruimte
 - Tijdsomkeer T: spiegeling in de tijd
- Continue symmetrieën in het SM
 - Symmetrie transformaties en generatoren
 - Van orthogonale rotaties naar unitaire transformaties: $SO(N)$ en $SU(N)$
 - Fasedraaiingen van kwantumtoestanden in multipletten
- De multiplet structuur in het SM
 - Elektrozwakke $SU(2) \times U(1)$ symmetrie: isospin en hyperlading (alleen CP)
 - Gekleurde $SU(3)$ symmetrie: kleuren en anti-kleuren (C en P)
- Krachtdeeltjes in het SM
 - Beschrijving met ijkvelden en krachtdeeltjes koppeland aan fermionen
 - Scalaire deeltje(s) via Higgs veld koppeland aan chiraliteit (net als massa)
 - Rol van krachtdeeltjes: emissie en absorptie, creatie en annihilatie
 - De bijzondere rol van het foton en het Higgs deeltje
- Kwantum verstrengeling in het SM
- De ijkveldentheorie en Higgs mechanisme als raamwerk
- Het fundament van het SM

De discrete symmetrieën C P en T

■ De discrete CPT symmetrieën

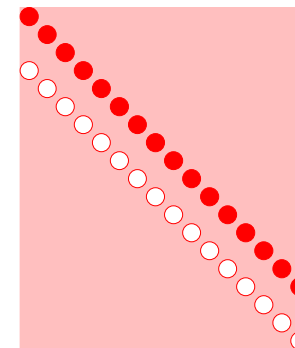
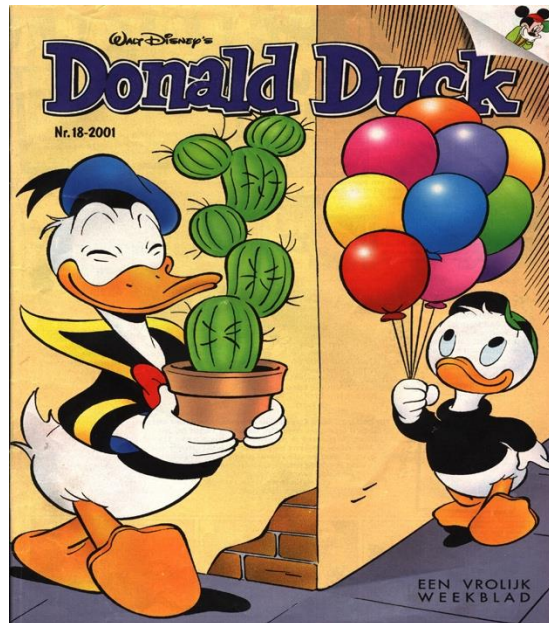
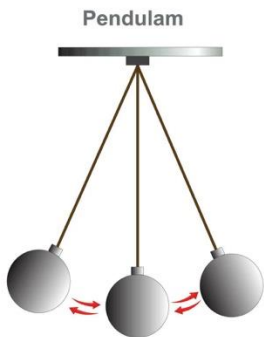
- Ladingsconjugatie C: deeltje – antideeltje
creatie / annihilatie



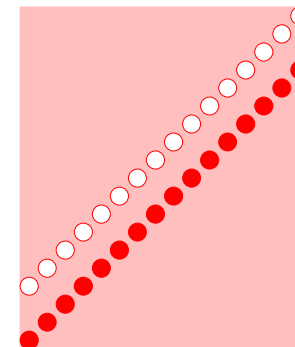
- Pariteit P: spiegeling in de ruimte
chiraliteit (handigheid)



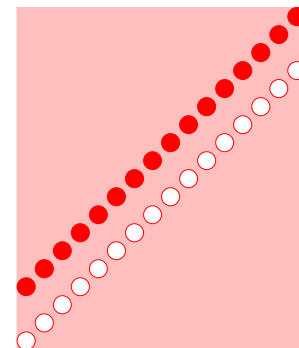
- Tijdsomkeer T: spiegeling in de tijd



tijdspiegel (T)

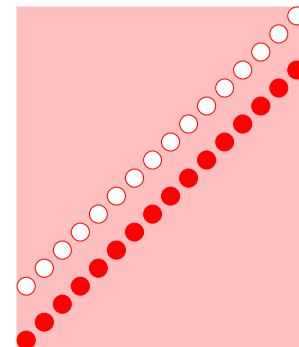


ruimtespiegel (P)



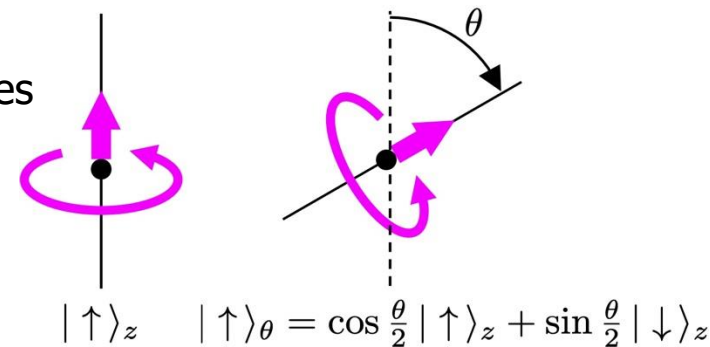
ladingspiegel (C)

||



Continue symmetrieën in het SM

- Continue symmetrieën in het SM met transformaties en generatoren
 - Translatie in ruimte: schuiven en afgeleide d/dx als generator (QM: impulsoperator)
 - Translatie in tijd: evolueren en afgeleide d/dt als generator (QM: Hamiltoniaan)
 - Rotaties: draaien en impulsmomentoperator als generator in QM
- Continue symmetrieën en multipletten in Hilbert ruimte
 - Rotaties voeren impulsmoment toestanden $|l,m\rangle$ met $m = l, l-1, \dots, -l$ in elkaar over
 - Multipletten & reële orthogonale $SO(3)$ rotaties in 3D (vector is $l = 1$ object)
 - Rotatie in Hilbert ruimte voor spin $1/2$ deeltje
 - doublet structuur & complexe $SU(2)_{\text{spin}}$ operaties



- Meervoudige symmetrie voor 'identieke' toestanden
 - doublet van smaken (u,d) en $SU(2)_{\text{isospin}}$
- Fasedraaiingen van kwantumtoestanden
 - Elektrische lading als operator en generator
 - Triplet van kleuren (r,g,b) en $SU(3)_{\text{kleur}}$

$$|\text{toestand}\rangle \longrightarrow e^{ie\alpha Q} |\text{toestand}\rangle$$

De fermionen in het SM

■ De multiplet structuur in het SM:

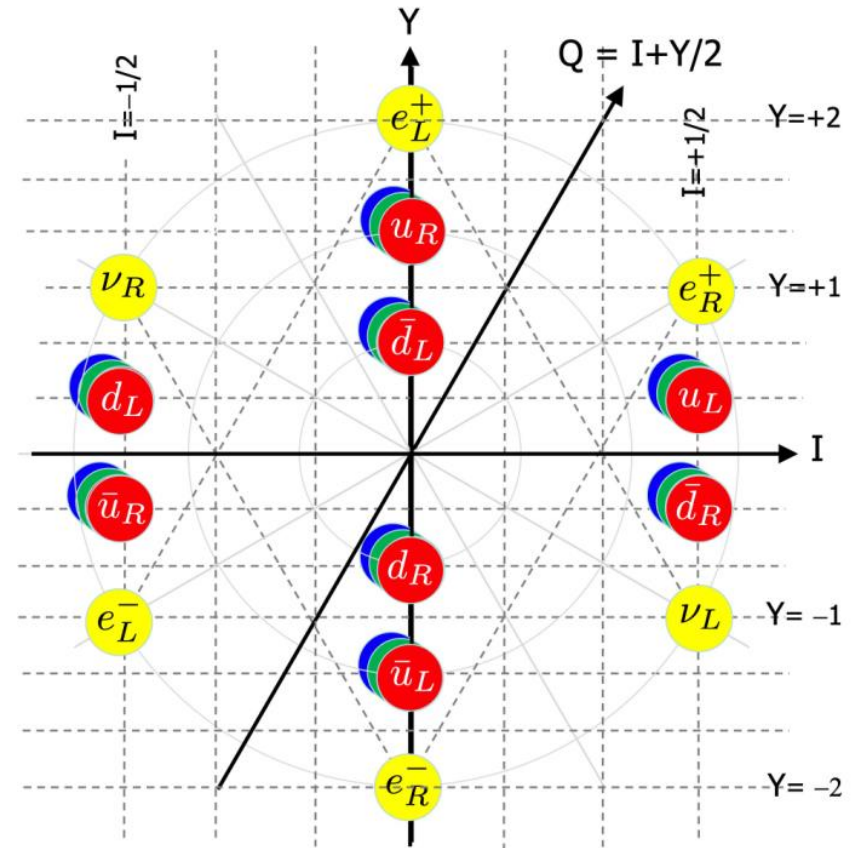
- Elektrozwakke $SU(2) \times U(1)$ symmetrie: isospin en hyperlading (alleen CP) voor zowel quarks als leptonen
- Gekleurde $SU(3)$ symmetrie: kleuren en anti-kleuren (C en P) alleen voor quarks

■ Verder zijn er drie families van fermionen in het SM

- Eén van de families heeft fermionen met zware massa's

$$m_{\text{top}} \gg m_{\text{quarks}}$$

$$m_{\text{tau}} \gg m_{\text{leptonen}} \gg m_{\text{neutrinos}}$$



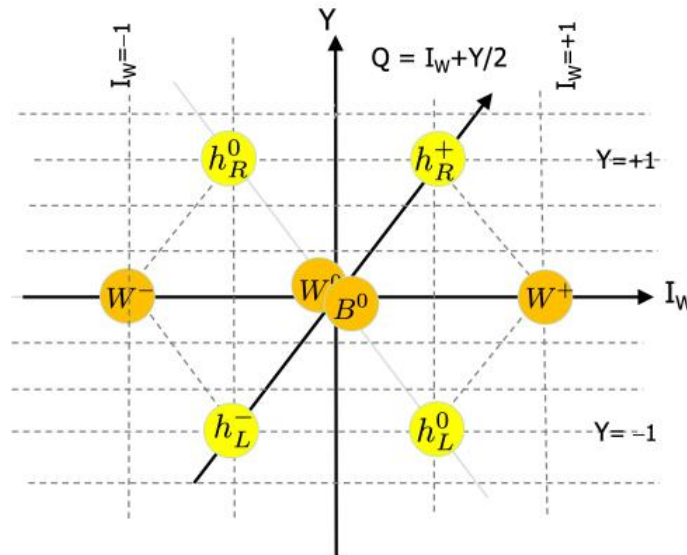
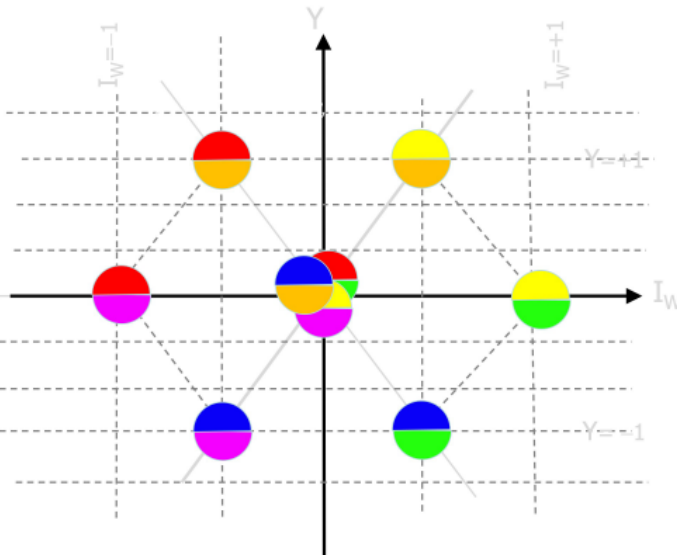
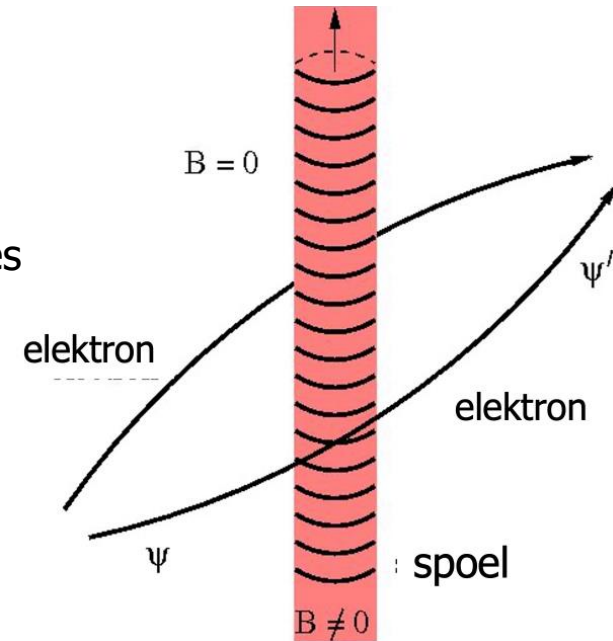
De bosonen en hun rol in het SM

■ Rol van ijkvelden bij fase van deeltjes

$$e^{ip \cdot x} \longrightarrow e^{i \int ds \cdot (p + eA(s))} \quad B = \nabla \times A$$

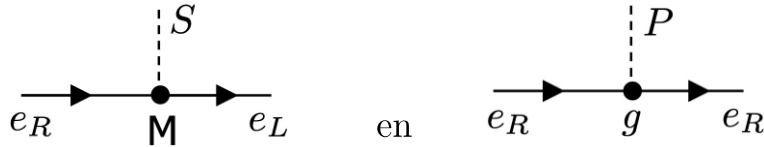
- Plaatsafhankelijke A-Velden $\rightarrow$ bewegende krachtdeeltjes
- Elektrische lading $\rightarrow$ één foton (massaloos)
- Kleurladingen $\rightarrow$ 8 gluonen (massaloos)
- Elektrozwakke multipletten $\rightarrow W^+ W^- \underbrace{W^0 B^0}_{Z^0 \gamma}$ (zwaar)

Aharonov-Bohm experiment

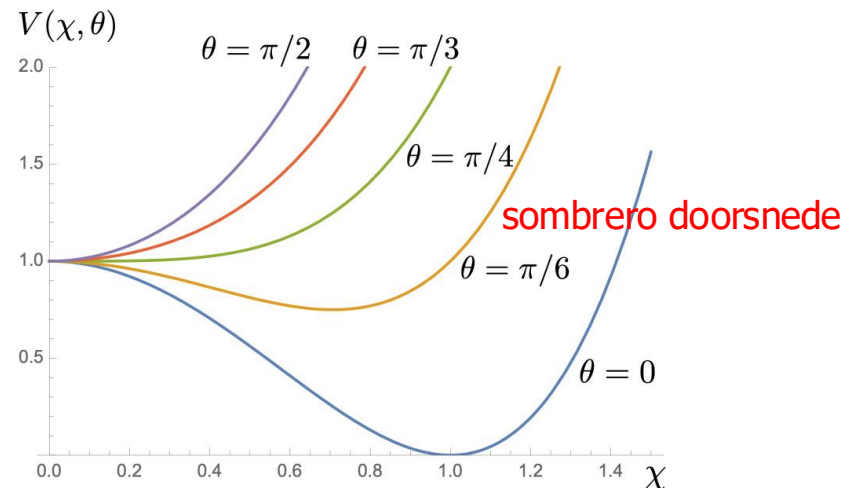
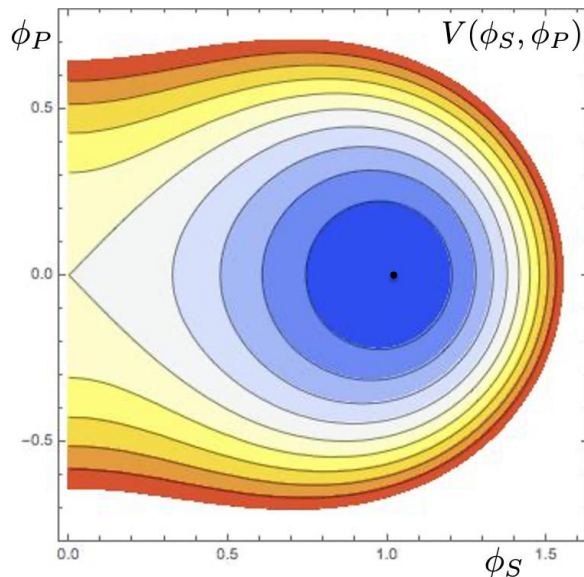


Spontane symmetriebreking

- Bosonen met even (scalair Higgs) en oneven pariteit (pseudoscalaire krachtdeeltjes)



- Zelfinteractie Higgs veld met specifieke vacuum verwachtingswaarde (Higgs potentiaal)
 - links: potentiaallandschap voor complexe velden $\phi = \chi e^{i\theta}$
 - rechts: dwarsdoorsnedes vanaf oorsprong met voor $\theta < \pi/4$ spontane symmetriebreking



$$V(\phi) = \frac{1}{8}M^2(2\phi^2 - 1)(2\phi^{*2} - 1) \quad \text{of} \quad V(\chi, \theta) = \frac{1}{8}M^2 \left(\chi^4 \sin^2(2\theta) + (\chi^2 \cos(2\theta) - 1)^2 \right)$$

■ Tweeledige (bipartite) ruimte $H \times H$

■ Verstregelde Bell toestanden

representant: $RL + LR$ (of $RR + LL$)

■ Verstregeling verdwijnt na een meting

$$|\text{Bell}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|RL\rangle + |LR\rangle) \xrightarrow{\text{meting}} |RL\rangle$$

$$RL + RR = R(L+R)$$

$$RL + LR =$$

■ Drieledige (tripartite) ruimte $H \times H \times H$

■ GHZ toestanden: $RRR + LLL$ (fragiele toestand)

LEPTONEN

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|RRR\rangle + |LLL\rangle) \xrightarrow{\text{meting}} |RRR\rangle$$

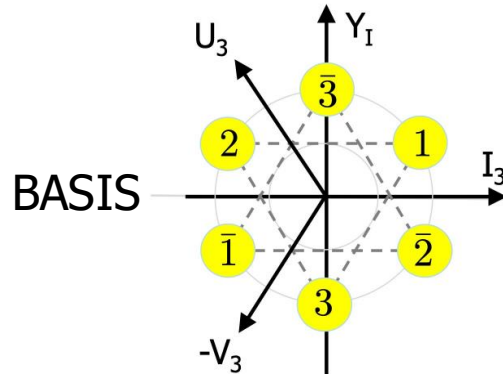
■ W toestanden: $LRR + RLR + RRL$ (robuuste toestand)

QUARKS

$$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} (|RRL\rangle + |RLR\rangle + |LRR\rangle) \xrightarrow{\text{meting}} \frac{1}{\sqrt{2}} |R\rangle \otimes (|RL\rangle + |LR\rangle)$$

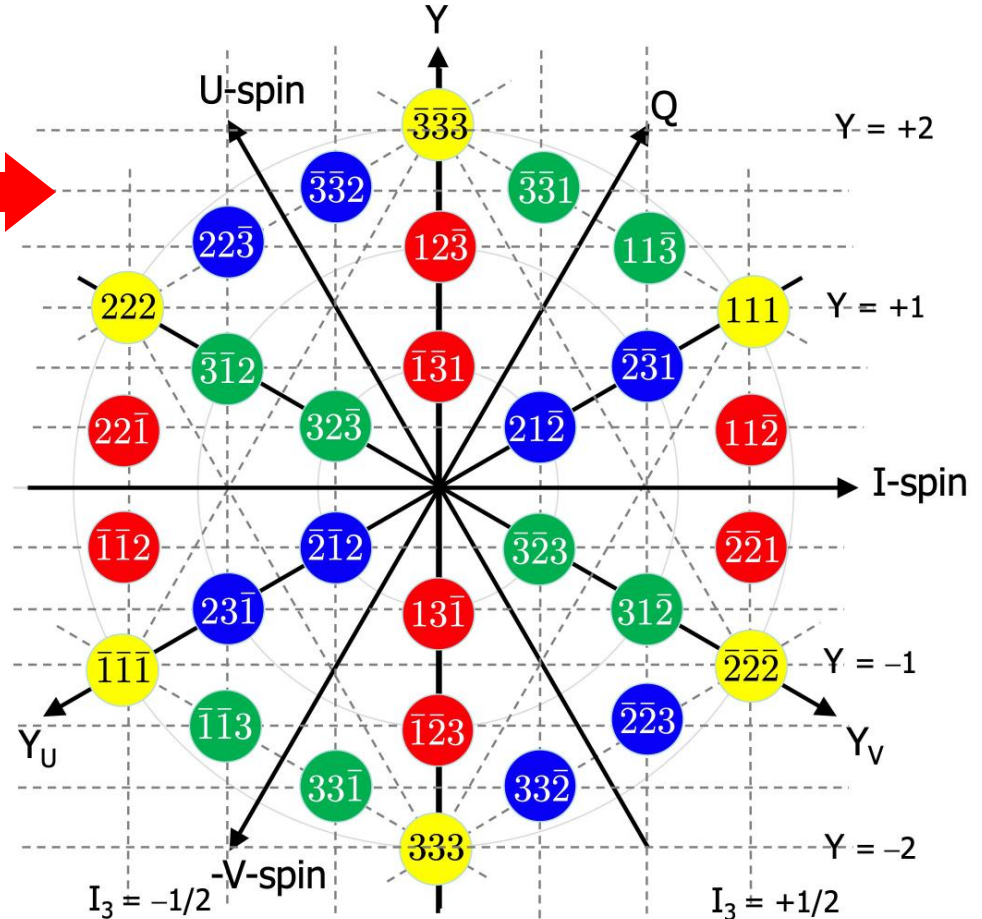
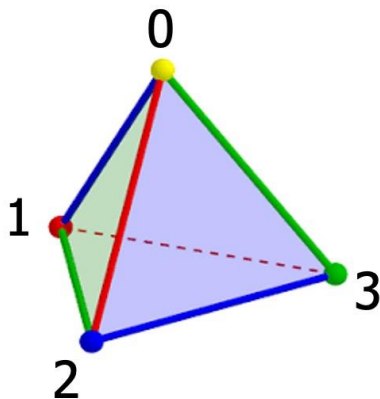
FERMIONEN IN TRIPARTITE WERELD

- Kwantum verstrengeling in driedigge (3-partite) Hilbert ruimte (mijn favoriete aanpak)



- Speciale rol van 'drie'

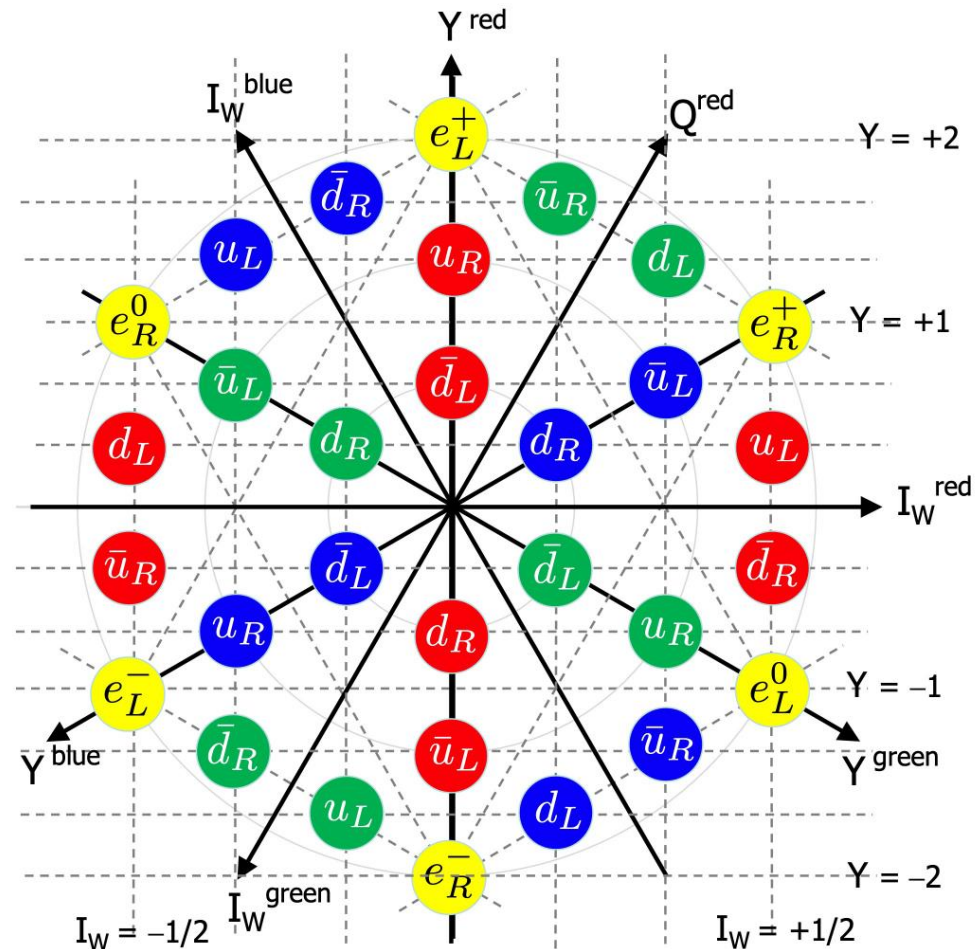
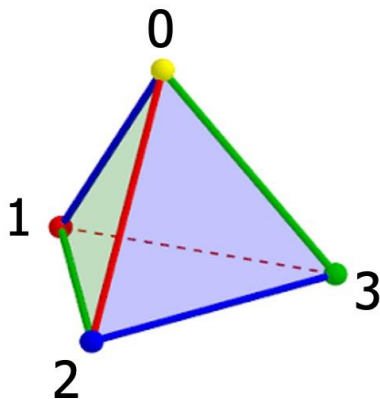
- Kleur
- Ruimte
- Elektrozwakke structuur
- families



IDENTIFICATIE VAN QUARKS EN LEPTONEN

- Leptonen (GHZ) zonder kleur, levend in 3D wereld
- Quarks (W) met voor iedere kleur eigen isospin en hyperlading (triality), levend in 1D wereld
- Hadronen zonder kleur, levend in 3D wereld

- Symmetrieën als in tetraeder



Uitbreidingen van het SM met nieuwe deeltjes en/of dimensies

- Meest gezocht in de richting van extra deeltjes
 - Supersymmetrie? Voor ieder fermion een sfermion en ieder boson een bosino
 - Meerdere Higgs velden?
 - Meerdere dimensies
 - Snaartheorie
 -

- Maar geen experimentele aanwijzingen!