

# Hoe quarks hun entree maakten in ons wereldbeeld via kosmische stralen en protonversnellers deel 1

**1964: een nieuwe laag in de structuur der materie**

Zestig jaar geleden introduceerde Murray Gell-Mann, met opvallend veel slagen om de arm, een nieuwe fundamentele laag in de structuur der materie. De bijbehorende deeltjes doopte hij quarks, een naam ontleend aan de psychedelische woordenvloed van de roman *Finnegans Wake* van James Joyce. Onafhankelijk en gelijktijdig kwam George Zweig tot vergelijkbare ideeën. We schetsen de omstandigheden die tot de introductie van quarks leidden. In dit eerste deel van een tweeluik bespreken we hoe een eerste ordening werd aangebracht in de nieuw ontdekte deeltjes – hadronen – in kosmische stralen en bij de eerste protonversnellers, door de introductie van twee nieuwe quantumgetallen: isospin en vreemdheid.

### Een nieuwe wisselwerking, een nieuw quantumgetal: isospin

Met de ontdekking van het neutron (Chadwick, 1932) begon een nieuw vakgebied: de exploratie van de ‘sterke wisselwerkingen’ die proton (p) en neutron (n) binden tot atoomkernen. In een eerste poging deze nieuwe kernkrachten te beschrijven ([1], ook in 1932) voerde Werner Heisenberg een nieuw quantumgetal in, dat hij geen naam gaf, maar dat later ‘isospin’ is gaan heten. Isospin was voor Heisenberg een handigheidje om de interacties tussen de nucleonen (een verzamelnaam voor protonen en neutronen) in een atoomkern te onderscheiden (pn, pp, nn) en compact te noteren. Pas veel later bleek het nieuwe quantumgetal algemener relevant toen meer ‘sterk wisselwerkende’ deeltjes ontdekt werden. Deeltjes die deze wisselwerking ondervinden worden ‘hadronen’ (*hadros* = sterk) genoemd, die voorkomen in twee categorieën, baryonen (*barys* = zwaar) zoals protonen en neutronen (met halfvallige spin: fermionen) en mesonen (*mesos* = midden) (met heeltallige spin, zoals het nog in te voeren pion: bosonen).

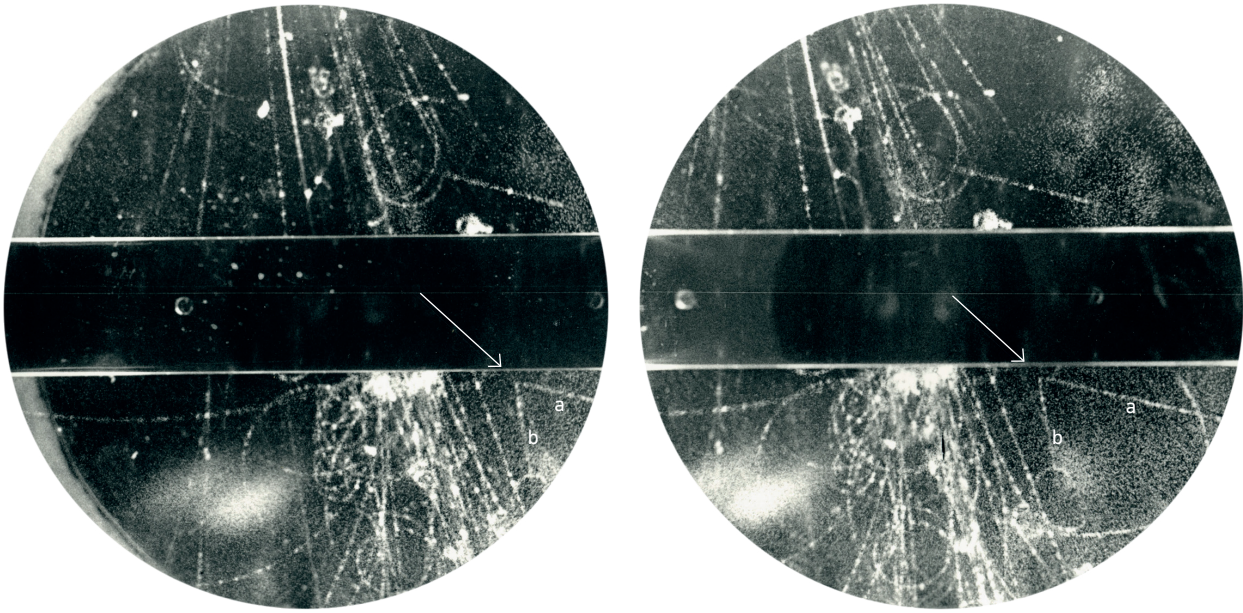
Het proton en neutron waren voor Heisenberg twee toestanden van hetzelfde deeltje in een nieuwe abstracte ruimte, in analogie met de twee spintoestanden van een spin- $1/2$ -deeltje in de gewone ruimte. De aantrekkende kracht tussen proton en neutron werd veroorzaakt door een overspringend deeltje. Dit overspringen leidde volgens Heisenberg tot *Platzwechsel* van proton en neutron, en weer terug, zodat proton en neutron dicht bij elkaar bleven. Ter illustratie gebruikt Heisenberg het  $H_2^+$ -ion waar het elektron op en neer springt tussen de protonen. Ook voor de proton-neutronwisselwerking was het elektron het enige bekende deeltje dat deze rol kon vervullen, maar dan zou behoud van (gewone) spin in het geding komen: proton, neutron en elektron hebben alledrie spin  $1/2$ .

Een belangrijke volgende stap werd gezet door Hideki Yukawa (in 1935, [2]). Deze stelde dat een nieuw veld, met korte dracht maar sterke koppeling, voor de kracht tussen proton en neutron verantwoordelijk was en dat het bijbehorende veldquantum het overspringende deeltje was dat voor *Platzwechsel* zorgt. Een ruwe schatting van de massa, die leidt tot de korte dracht, kwam uit op tweehonderd maal de elektronmassa. Zo'n deeltje was niet bekend en Yukawa beredeneerde dat het onobserveerbaar was en niet als vrij deeltje voorkwam. De natuurkundigen van die tijd waren

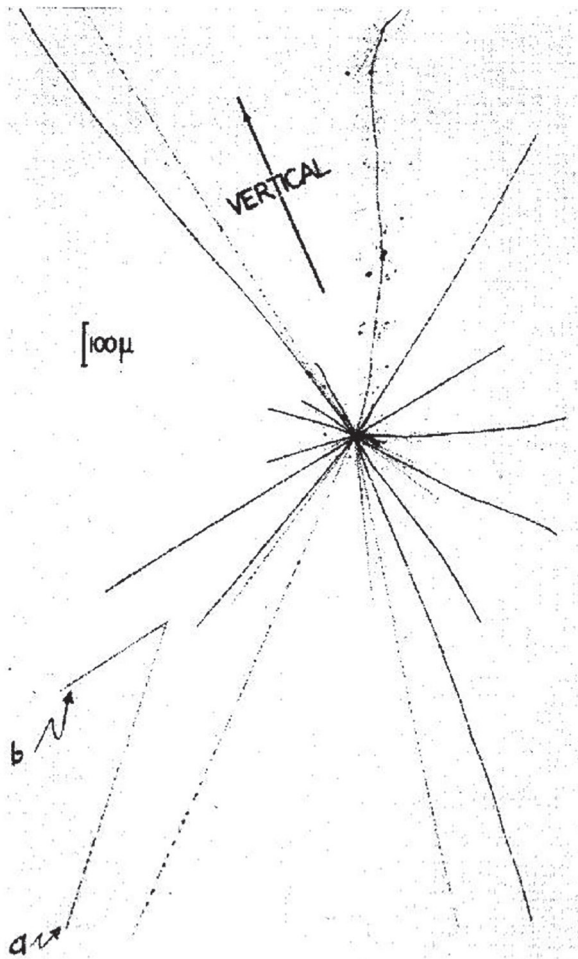
zeer terughoudend met het voorspellen van nieuwe deeltjes! Pas in 1947 werd het eerste deeltje ontdekt dat naast het proton en het neutron de sterke wisselwerking vertoonde: het pion of  $\pi$ -meson [3]. Het pion werd ontdekt door de sporen te analyseren die kosmische stralen achterlieten in fotografische emulsies. De benaming meson werd gekozen om aan te geven dat het bewuste deeltje een massa had ergens tussen het lichte elektron (een lepton, *leptos* = klein) en het zware proton. De massa van het pion bedroeg ongeveer driehonderd elektronmassa's. Het pion droeg lading, aangenomen werd de elementaire lading, en vertoonde wisselwerkingen met atoomkernen. De sporen werden vastgelegd met behulp van fotografische emulsies die ioniserende kosmische straling detecteerden. De ontdekking van een elektrisch neutraal pion volgde enkele jaren later bij de eerste protonversnellers.

## “De natuurkundigen van die tijd waren zeer terughoudend met het voorspellen van nieuwe deeltjes!”

Het oorspronkelijke idee van Yukawa, de beschrijving van de proton-neutronwisselwerking door een overspringend geladen pion, werd uitgebreid tot sterke p-p- en n-n-wisselwerkingen via uitwisseling van een neutraal pion. Dit leidde tot het beeld van de ladingsonafhankelijkheid van de sterke wisselwerkingen. Behalve aan proton en neutron werd ook aan het pion isospin toegekend en wel met waarde 1 zodat de drie projecties 1, 0, -1 (denk weer aan de analogie met gewone spin) overeenkwamen met de drie ladingstoestanden van het pion. Ladingsonafhankelijkheid van de sterke wisselwerking is dan synoniem met isospinsymmetrie en dus met behoud van isospin.



Figuur 1. Stereo-nevelvatopname van  $K^0$ -verval. De brede band in het midden is een loodplaat van drie centimeter dik om doordringende deeltjes te herkennen. Het  $K^0$  verval in twee sporen a en b, die uit het niets lijken te komen: de witte pijl wijst naar het punt waar het neutrale kaon vervalft [4]. Met dank aan Robin Marshall voor het verstrekken van de foto.



De drie pionen,  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ , en het proton en het neutron vormen isospinmultipletten (een triplet respectievelijk een doublet). De deeltjes binnen een multiplet hebben vrijwel, maar niet precies gelijke massa hetgeen er op duidt dat isospinsymmetrie in de natuur niet perfect is, maar een beetje 'gebroken'. Bij de eerste protonversnellers die in het begin van de jaren vijftig van de twintigste eeuw in bedrijf kwamen, was het mogelijk geladen pionbundels te maken en die vervolgens aan protonen (vloeibaar waterstof) te verstrooien – zo voerde Enrico Fermi (begenadigd theoreticus én experimentator) experimenten uit bij het cyclosynchrotron van de universiteit van Chicago. Daar werd de eerste 'resonantie' gevonden: het aantal pion-protonbotsingen (de werkzame doorsnede) vertoonde een sterk maximum bij een bundelenergie overeenkomend met 1230 MeV in het zwaartepuntsysteem. Dit maximum had een breedte op halve hoogte van 100 MeV. Deze 'resonantie' is een deeltje met een massa van 1230 MeV en een levensduur van  $1/100 \text{ MeV}^{-1} = 10^{-23} \text{ s}$ . Het deeltje kreeg de naam  $\Delta$ . De data zijn consistent met isospin 3/2, dat wil zeggen de  $\Delta$  komt voor in vier ladingstoestanden ( $++$ ,  $+$ ,  $0$ ,  $-$ ). Het isospinformalisme is samengevat in het kader. Bij protonversnellers met hogere energie werden in de jaren vijftig en zestig (het protosynchrotron van CERN kwam in 1959 in bedrijf) veel meer resonanties gevonden, zowel behorend tot de bary-

Figuur 2. Facsimile van registratie in fotografische emulsie van een kosmische straal (proton) die een zware kern (zilver of broom) 'opblaast'. Daarnaast en onafhankelijk daarvan zijn er twee sporen zichtbaar die uit het niets lijken te komen. Op basis van de korrel dichtheid ('ionisatie') wordt spoor b als proton geïdentificeerd. We zien hier  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ . Uit [5].

## HET ISOSPINFORMALISME

$|\pi^+\rangle = |1, I_3\rangle = |1, 1\rangle$ ,  $|\rho^+\rangle = |1/2, 1/2\rangle$ , dan is  $|\pi^+\rho^+\rangle = |3/2, 3/2\rangle$ . De  $\Delta^{++}$ -resonantie werd ontdekt in de reactie  $\pi^+\rho^+ \rightarrow \Delta^{++} \rightarrow \pi^+\rho^+$  en heeft dus  $|1, I_3\rangle = |3/2, 3/2\rangle$ .

Net zo:  $\pi^+\rho^+ \rightarrow \Delta^0 \rightarrow \pi^+\rho^+$ . Maar hier is er nog een tweede mogelijkheid:  $\pi^+\rho^+ \rightarrow \Delta^0 \rightarrow \pi^0\rho^+$ .

In termen van isospin schrijven we

$|\Delta^0\rangle = |3/2, -1/2\rangle \rightarrow A|1, -1; 1/2, 1/2\rangle + B|1, 0; 1/2, -1/2\rangle$ .

Hier zijn A en B de Clebsch-Gordancoëfficiënten, bekend uit de quantummechanica van impulsmoment. In meer mathematische termen zijn het de coëfficiënten die voorkomen in de directe som van de ontbinding van het product van twee irreducibele representaties van de symmetriegroep van impulsmoment: SU(2). In ons voorbeeld is  $A = \sqrt{1/3}$  en  $B = \sqrt{2/3}$ , en dat betekent dat behoud van isospin impliceert dat de  $\Delta^0$  in 1/3 van de gevallen verval naar  $\pi^+\rho^+$  en in 2/3 van de gevallen naar  $\pi^0\rho^+$ , hetgeen experimenteel geverifieerd is.

onen als de mesonen. Hier komen we later op terug. Eerst introduceren we een tweede nieuw quantumgetal dat ontdekt werd in het kader van de sterk wisselwerkende deeltjes, zoals het pion, die in kosmische straling werden gevonden.

### Nog een nieuw quantumgetal: vreemdheid

Behalve de geladen pionen hadden kosmische stralen nog meer nieuwe deeltjes in petto, die geproduceerd werden in botsingen van energetische ( $> 1$  GeV) protonen.

Naast de fotografische emulsies, met ballonnen hoog in de atmosfeer gebracht, werden ook nevelvaten op hoge bergtoppen, zoals de Pic du Midi (2885 m) in de Franse Pyreneeën gebruikt om kosmische stralen, c.q. de door kosmische stralen geproduceerde deeltjes, te detecteren.

Aanvankelijk werden nevelvaten alleen in laboratoria op zee-niveau gebruikt – het transporteren naar en in bedrijf stellen van de apparatuur op hoge bergtoppen, zeker de zware magneten, was een hele onderneming. In figuur 1 zien we een nevelvatopname, gemaakt in Manchester, waarop ‘uit het niets’ twee sporen van geladen deeltjes uit een en hetzelfde punt komen. Na zorgvuldige analyse was geen andere conclusie mogelijk dan dat het hier om een nieuw, ongeladen, deeltje ging dat verviel in twee geladen pionen. Behalve de ‘vorken’ (‘V-deeltjes’) van figuur 1 werden ook sporen met een duidelijke knik gevonden, geïnterpreteerd als het verval van een nieuw geladen deeltje in een geladen en een neutraal pion. De massa van deze nieuwe deeltjes was ongeveer duizendmaal de elektronmassa. Ze werden aangeduid als ‘kaonen’ en kwamen voor in drie ladingstoestanden:  $K^0$ ,  $K^+$  en  $K^-$ . Deze deeltjes waren aanvankelijk een groot raadsel. Ze werden in hoogerenergetische botsingen van kosmische protonen overvloedig geproduceerd hetgeen duidde op dezelfde sterke wisselwerking als aan de productie van pionen ten grondslag lag. De kaonen vervielen naar twee pionen. De levensduur was echter van de orde van  $10^{-10}$  s, minstens elf ordes van grootte langer dan verwacht mocht worden op basis van de sterke wisselwerking. Aan de oplossing van

de puzzel werden baanbrekende bijdragen geleverd door de onmiddellijk na de Tweede Wereldoorlog uit Nederland geëmigreerde Abraham Pais, werkzaam in Princeton. In essentie stelde hij voor dat de kaonen een nieuw ‘scalair’ quantumgetal droegen dat behouden bleef in sterke wisselwerkingen. De kaonen werden daarom in kaon-antikaonparen geproduceerd (*associate production*) waarbij de som van dit nieuwe quantumgetal nul was. Voor ieder individueel kaon had het een waarde +1 of -1, zodat verval volgens de sterke wisselwerking in pionen, waarvoor dit quantumgetal 0 was, verboden was. Het verval  $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , zoals op de historische opname van figuur 1, moest dus volgens een nieuwe, nader te onderzoeken zwakke wisselwerking plaatsvinden, die aanleiding gaf tot een veel grotere levensduur. Dit nieuwe quantumgetal kreeg de naam vreemdheid. Uit *as-associate production* volgt dat  $K^+$  en  $K^-$  tegengestelde vreemdheid hebben, antideeltjes zijn van elkaar, maar *inter alia* ook dat naast het  $K^0$  ook een antideeltje  $\bar{K}^0$  voorkomt, met tegengestelde vreemdheid.

In 1950 werd vanuit Australië de waarneming gerapporteerd van een ‘V-deeltje’ zoals het kaon maar met een proton als een van de vervaldeeltjes [5]. In figuur 2 is de opname weer gegeven waarop het  $\Lambda$ -verval is vastgelegd. Het betreft een fotografische emulsie, blootgesteld aan kosmische stralen op een hoogte van zo’n 21 kilometer. De typische ‘ster’ veroorzaakt door een invallend proton is niet waar het om gaat. De uit het niets komende sporen a en b, waar de korreldichtheid van spoor b duidt op een proton, vormen de basis van de ontdekking van het  $\Lambda$ -baryon. Het centrum van de ‘ster’ ligt niet in het vlak van a en b, het  $\Lambda$ -deeltje houdt dus geen verband met de nucleaire reactie die de ster veroorzaakt. Ook het  $\Lambda$ -deeltje vervalde dus, net als  $K^0$ , in deeltjes die de sterke wisselwerking kennen,  $\Lambda \rightarrow \pi\rho^+$ , maar heeft een grote levensduur die duidt op een ‘zwak’ verval. Ook  $\Lambda$  draagt dus vreemdheid.

In deel twee zullen we zien dat isospin en vreemdheid de basis vormden voor een succesvolle klassificatie van hadronen en, uiteindelijk, voor de introductie van quarks als de ultieme bouwstenen daarvan.

**Jos Engelen is emeritus hoogleraar hoge-energiefysica van de Universiteit van Amsterdam/Nikhef. Hij was betrokken bij het wetenschappelijke programma van CERN en DESY en bij de beginfase van Antares (astrodeeltjesfysica). Hij bekleedde onder andere het directoraat van Nikhef, het wetenschappelijke directoraat van CERN en het voorzitterschap van NWO.**  
engelen@nikhef.nl

#### REFERENTIES

1. W. Heisenberg, Über den Bau der Atomkerne. I, Z. Physik 77, 1-11 (1932).
2. H. Yukawa, On the Interaction of Elementary Particles. I. Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan 17, 48-57 (1935); Reprinted in: Progress of Theoretical Physics Supplement 1, 1-10 (1955).
3. C. Lattes, et al., Processes Involving Charged Mesons, Nature 159, 694-697 (1947). <https://doi.org/10.1038/159694a0>.
4. G.D. Rochester en C.C. Butler, Evidence for the existence of new unstable elementary particles, Nature 160 (1947) 855-857.
5. V.D. Hopper en S. Biswas, Evidence Concerning the Existence of the New Unstable Elementary Neutral Particle, Physical Review 80-6, 1099-1100 (1950). [doi:10.1103/physrev.80.1099](https://doi.org/10.1103/physrev.80.1099).