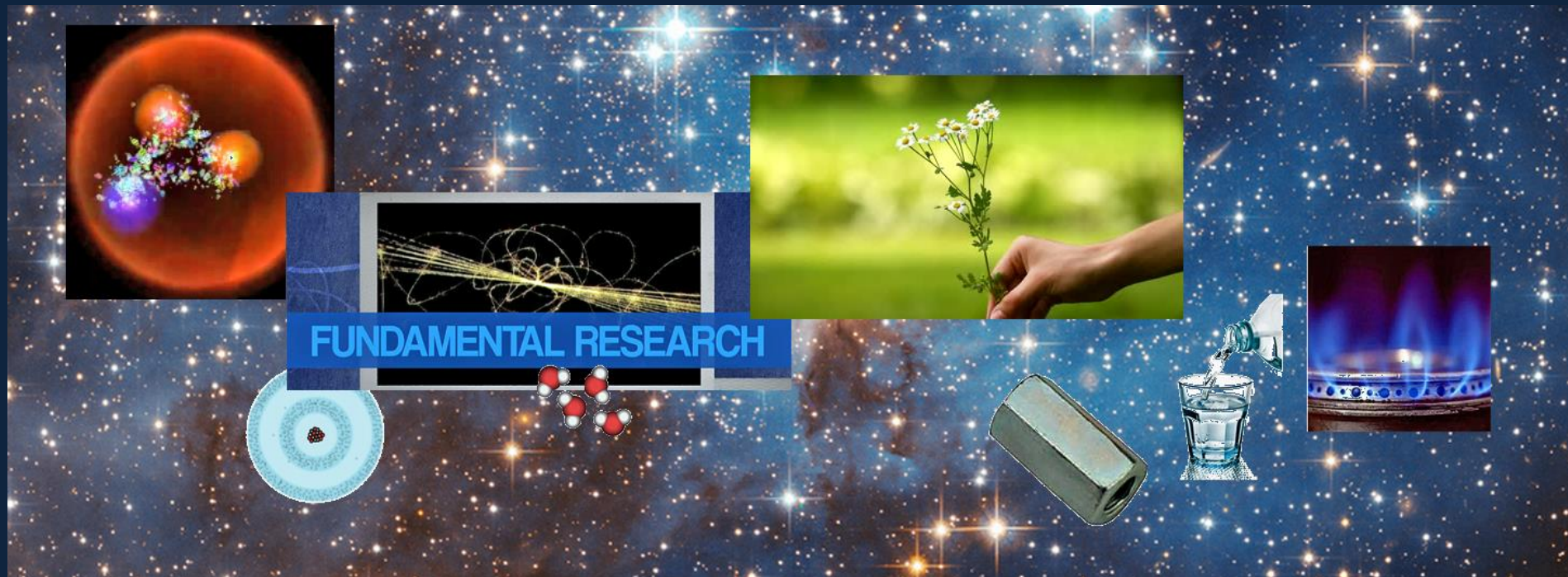
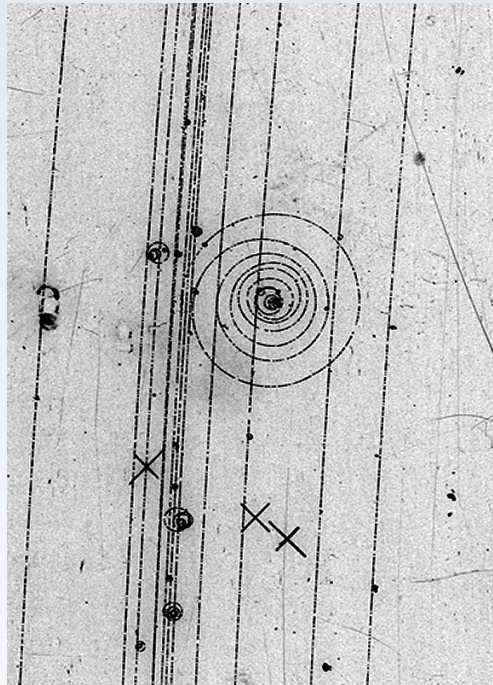
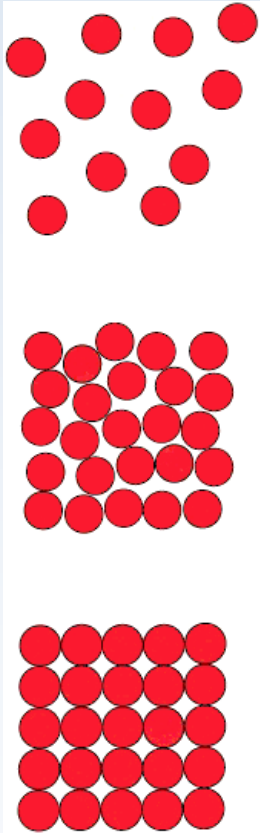


Wat zijn de bouwstenen van materie en wat houdt ze bijeen?



Waaruit bestaat het universum?

Deeltjesfysica



Bellenvatfoto van een elektron. Zie dia 14.

	mass →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0	0
QUARKS		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	GAUGE BOSONS
		0	0	0	±1	
		1/2	1/2	1/2	1	

Standaardmodel. Zie dia 28.

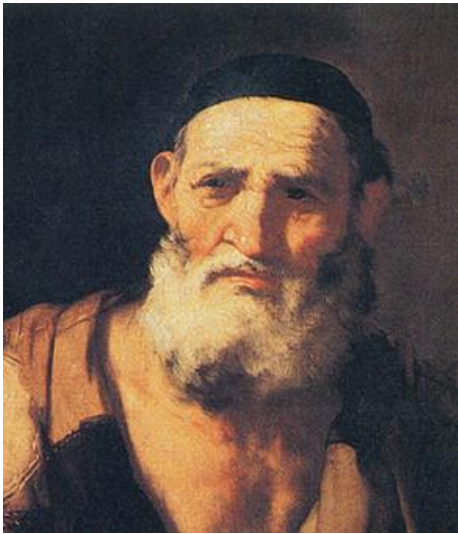


Onderzoek naar deeltjes en hun wisselwerking gebeurt in **deeltjesversnellers**. Daar laat men bundels zeer snelle deeltjes botsen. Daarbij ontstaan andere deeltjes, soms nieuwe. Detectors registreren het precieze verloop en de gevolgen van de botsingen. Dat geeft informatie over alle betrokken deeltjes, hun wisselwerking, hun energie, en de natuurwetten waaraan ze gehoorzamen.

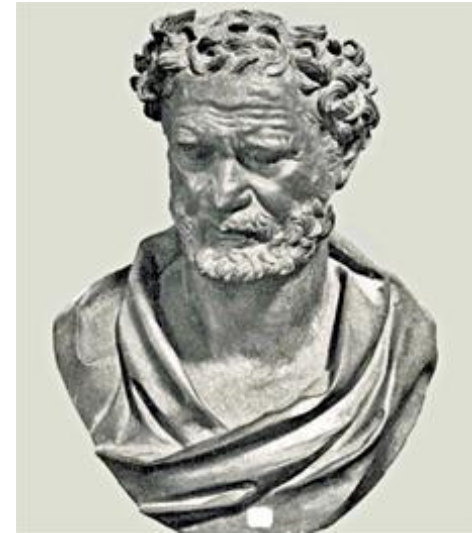
Hierboven zie je een luchtfoto van de **Large Hadron Collider** (LHC) van het [CERN](#) in Genève. Dat is de grootste en sterkste deeltjesversneller ter wereld. Deeltjes worden versneld in grote, ringvormige buizen, op 50 tot 175 m onder de grond. Elke buis is 27 km lang. Rondom de buizen zijn verschillende detectors gemonteerd.

Men versnelt onder andere bundels protonen, in tegengestelde richting, door twee buizen. Supergeleidende magneten houden ze in hun cirkelbaan, tot hun snelheid ruim 99% van de lichtsnelheid is. Dan laat men ze botsen.

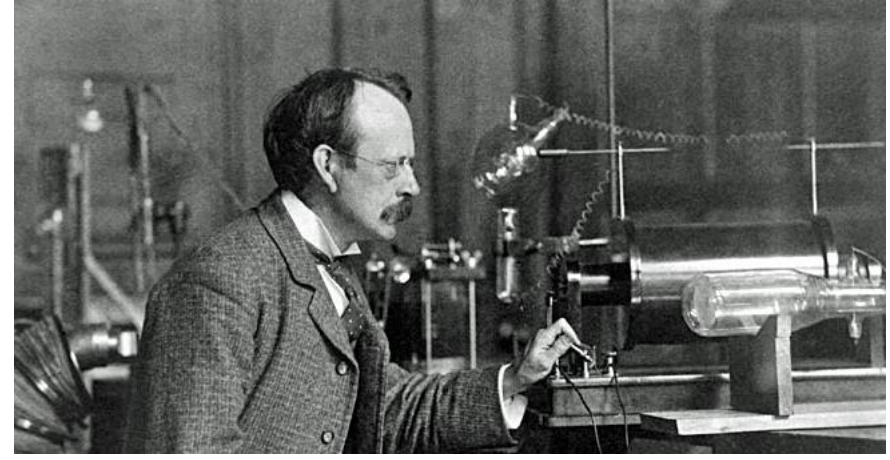
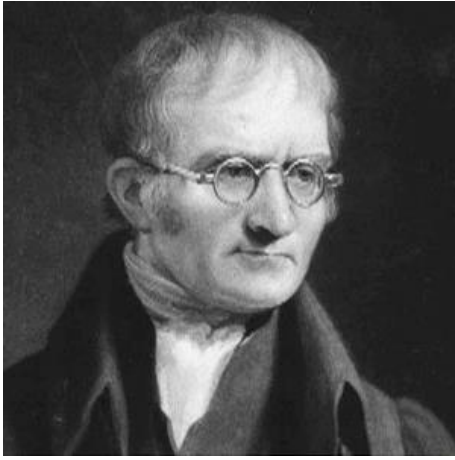
De LHC is in 2008 gestart. In 2012 werd hier het higgsdeeltje ontdekt (zie dia 27).



circa
400 v. Chr.



Het idee dat alle materie bestaat uit héél kleine, ondeelbare en onvergankelijke bouwsteentjes, **deeltjes** genoemd, komt van de Griekse filosoof **Leucippus**. Zijn leerling **Democritus** bedacht de naam *atoom*. Dat is Grieks voor 'ondeelbaar'. De oude Grieken baseerden hun theorieën niet op experimenten. Ze worden daarom geen natuurwetenschappers genoemd maar *natuurfilosofen*.

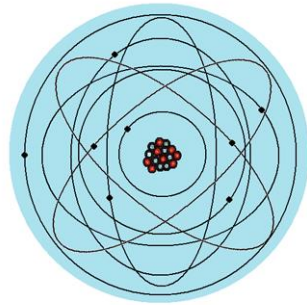


De moderne, natuurwetenschappelijke deeltjestheorie begint met de atoomtheorie van **John Dalton**. In 1808 stelde hij dat stoffen uit **atomen** bestaan, die zijn gegroepeerd tot moleculen. Tijdens chemische reacties hergroeperen de atomen van de deelnemende stoffen zich tot andere moleculen. Die vormen dan andere stoffen.

Dat alle materie op aarde uit atomen bestaat, staat inmiddels vast. Van alle stoffen zijn de eigenschappen uiteindelijk te herleiden tot eigenschappen van de moleculen en atomen waaruit ze bestaan.

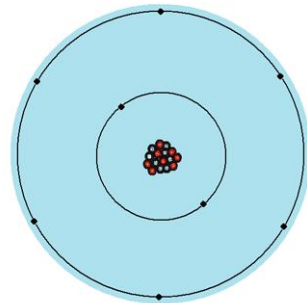
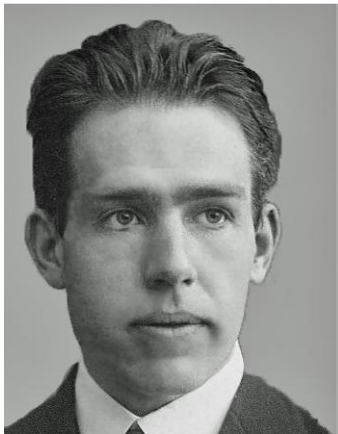


In 1897 vond **Joseph Thomson** het eerste subatomaire deeltje, nóg kleiner dan een atoom dus. Het bleek negatief geladen. Hij suggereerde dat het een universeel bouwsteentje van het atoom was. Later werd het genoemd: **elektron (e^-)**. Hij bedacht het eerste atoommodel, het 'plum puddingmodel'.

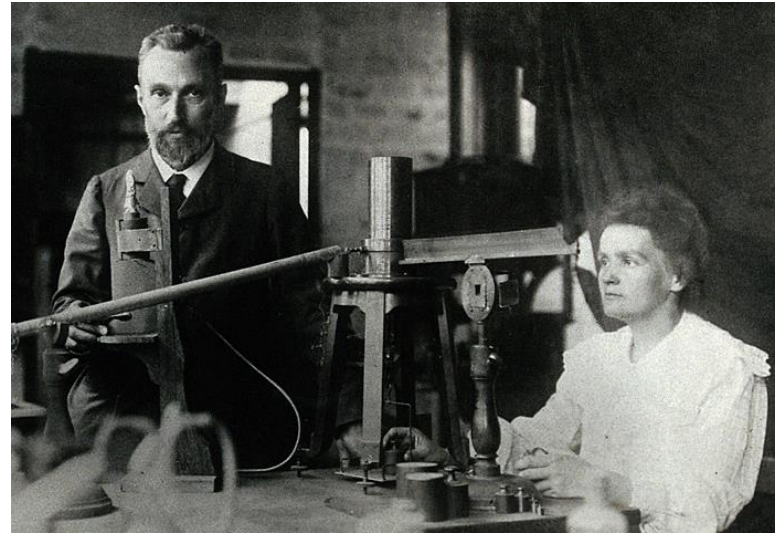


Op basis van experimenten ontwikkelde **Ernest Rutherford** begin vorige eeuw een beter atoommodel: het 'elektronenwolk-model'. Een atoom heeft een zeer kleine, positieve kern waar de negatieve elektronen in een wolk omheen cirkelen.

In 1920 ontdekte hij het **proton (p)** als kerndeeltje, even sterk geladen als het elektron maar positief. Hij voorspelde het bestaan van een tweede, neutraal kerndeeltje.

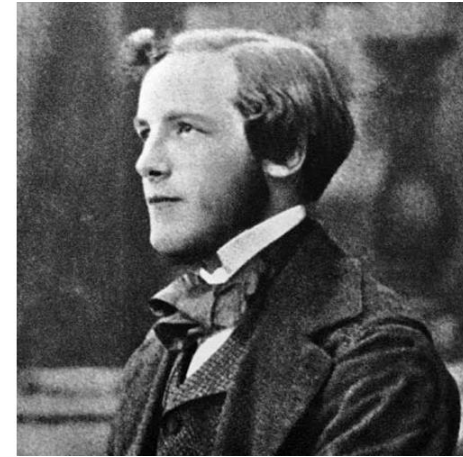
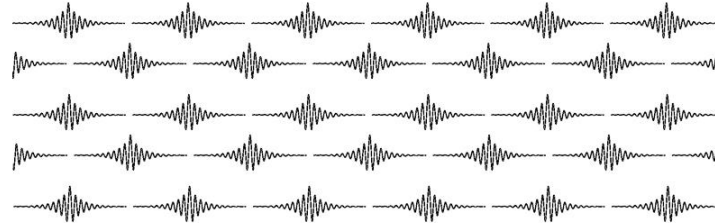


Niels Bohr combineerde het atoommodel van Rutherford met het idee van Max Planck, dat elektromagnetische straling uit fotonen bestaat (dia 8). Uit die combinatie trok hij in 1913 de conclusie dat elektronen niet willekeurig rond de atoomkern bewegen maar in vaste banen, zogeheten 'schillen'.



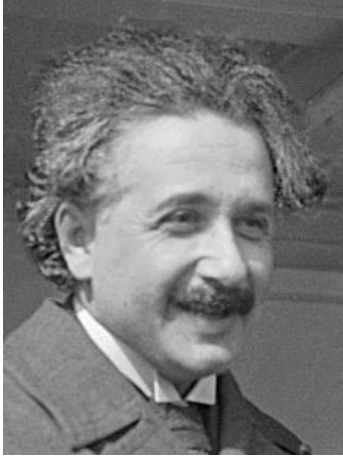
In 1896 ontdekte **Henri Becquerel** dat sommige stoffen continu een tot dan toe onbekende soort straling uitzenden. **Pierre Curie** en **Marie Curie-Sklodowska** noemden dat nieuwe verschijnsel **radioactiviteit**. Rutherford ontdekte later dat er verschillende soorten radioactiviteit zijn.

Radioactiviteit bleek niet te beïnvloeden door verhitting en afkoeling, drukverhoging en -verlaging, enz. Daarom dacht men dat de bron diep in het atoom moest zitten. Later werd duidelijk dat radioactiviteit het gevolg is van het verval van instabiele atoomkernen.



Eerder, in 1865, ontdekte **James Clerk Maxwell** elektromagnetische straling: elektromagnetische velden die zich als golven door de ruimte voortbewegen. Hij voorspelde dat licht ook een elektromagnetische golf is.

Max Planck kwam in 1900 met het idee dat de energie van deze elektromagnetische straling bestaat uit kleine hoeveelheden, 'energiepakketjes'. Alleen zó kon hij de toen raadselachtige metingen aan straling begrijpen. Dit idee zorgde, aanvankelijk onbedoeld, voor een grote verandering in het denken over materie en energie. Later bleek namelijk dat deze energiepakketjes zich gedragen als deeltjes, stralingsdeeltjes dus. Ze werden toen **fotonen (γ)** genoemd.



Albert Einstein voorspelde in zijn speciale relativiteitstheorie (1905) dat fotonen een *impuls* zouden hebben, een eigenschap typerend voor deeltjes.

Hij voorspelde ook dat massa en energie gelijkwaardig zijn.



In de jaren 20 van de vorige eeuw bevestigde **Arthur Compton** experimenteel de voorspelling van Einstein dat fotonen een impuls hebben. Fotonen kunnen zich als deeltjes gedragen.

Elektromagnetische straling heeft dus deeltjeseigenschappen én golfeigenschappen.

Je zegt: **elektromagnetische straling is dual.**

Fotonen worden tegenwoordig beschouwd als **wisselwerkingsdeeltjes**: ze 'dragen' de elektromagnetische wisselwerking (zie dia 23 en 24).

Kort daarna kwam **Louis de Broglie** met het idee dat materiedeeltjes, bijvoorbeeld elektronen, zich dan wellicht ook zouden kunnen gedragen als golven.



Het bewijs kwam van twee kanten. In experimenten van **George Thomson** (Engeland) en **Clinton Davisson** met **Lester Germer** (Amerika) gedroeg een bundel elektronen zich inderdaad als een golf.

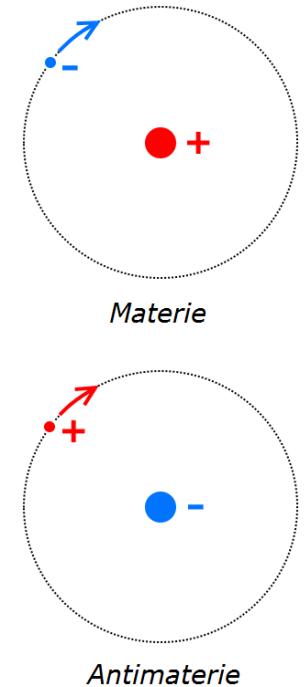
Dus ook materie heeft deeltjeseigenschappen én golfeigenschappen.
Ook materie is dual, net als elektromagnetische straling (dia 9).



Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg en Wolfgang Pauli werkten in de jaren 20 en 30 van de vorige eeuw met vele anderen aan de **quantumfysica**, een nieuwe natuurkundige theorie die het allerkleinste beschrijft: het gedrag en de wisselwerking van materie en energie op moleculaire schaal en kleiner. De **dualiteit golf/deeltje** wordt in deze theorie tot in zijn uiterste consequenties doordacht. Deeltjes gedragen zich soms als 'klassieke' deeltjes, soms als golf, afhankelijk van de omstandigheden. De quantumfysica is buitengewoon succesvol. De theorie heeft bijvoorbeeld de moderne computertechnologie mogelijk gemaakt, inclusief medische apparatuur, navigatie, mobiele telefonie, enz.



Paul Dirac concludeerde uit zijn werk aan de quantumfysica dat er naast 'gewone', negatieve elektronen ook anti-elektronen zouden moeten bestaan: met dezelfde massa maar positief geladen. Dit was de eerste aanwijzing voor het bestaan van **antimaterie**.



James Chadwick ontdekte in 1932 een tweede kerndeeltje: het **neutron (n)**, twaalf jaar eerder voorspeld door Rutherford.



Carl Anderson ontdekte in 1932, na de voorspelling van Dirac, in kosmische straling het **antideeltje** van het elektron: het **positron** (e^+). Inderdaad met dezelfde massa als het elektron maar positief geladen.

Als een elektron en een positron botsen, **annihileren** ze elkaar: de massa van de deeltjes verdwijnt, in plaats daarvan ontstaat energie in de vorm van twee fotonen. Het tegenovergestelde heet **paarvorming**. Zie dia 16.

In 1936 ontdekte Anderson een volkomen nieuw deeltje, negatief, circa 200 keer zo zwaar als het elektron en instabiel: het **muon** (μ).



Lise Meitner ontdekte in 1939 (met anderen) **kern-splijting**: atoomkernen van uraan vielen na beschieting met neutronen in 2 kleinere kernen uiteen.

De nieuwe kernen hadden samen wat minder massa en wat meer energie dan de oorspronkelijke uraankern. Ze begreep als eerste dat er massa was omgezet in energie.

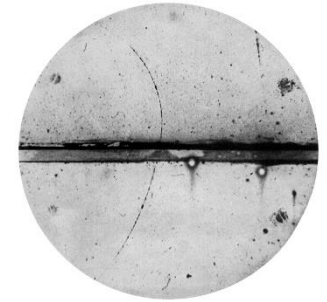
Massa en energie blijken inderdaad **gelijkwaardig**, zoals Einstein in 1905 voorspelde (dia 9).

Nevelvat



Anderson ontdekte het positron en het muon met een **nevelvat**, een uitvinding van **Charles Wilson**.

Een nevelvat is gevuld met onderkoelde, oververzadigde damp. Als een deeltje het vat doorkruist, botst het onderweg tegen dampatomen, waarvan sommige worden geïoniseerd. Op het ionenspoor condenseert de damp. Zo wordt de baan van het deeltje zichtbaar.



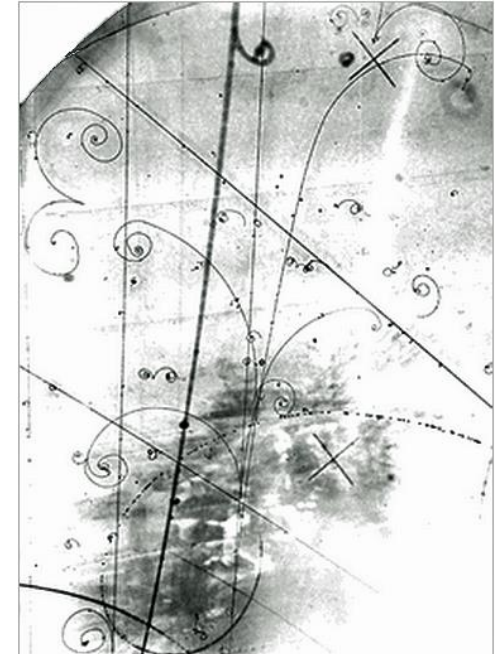
*De ontdekking van het positron.
Zie ook dia 15.*

Bellenvat



Het nauwkeuriger **bellenvat** werd in 1952 uitgevonden door **Donald Glaser**. Een bellenvat is gevuld met een heldere vloeistof, verhit tot vlak onder het kookpunt. Op het ionenspoor van een deeltje ontstaan kookbelletjes, die de baan van het deeltje zichtbaar maken.

Bellenvatfoto van elektronen en positronen. Zie ook dia 16.



The Positive Electron

CARL D. ANDERSON,
*California Institute of Technology,
 Pasadena, California*
 (Received February 28, 1933)

*Oorspronkelijke foto uit bovengenoemd
 artikel, gepubliceerd op 15 maart 1933 in
 het tijdschrift Physical Review.*

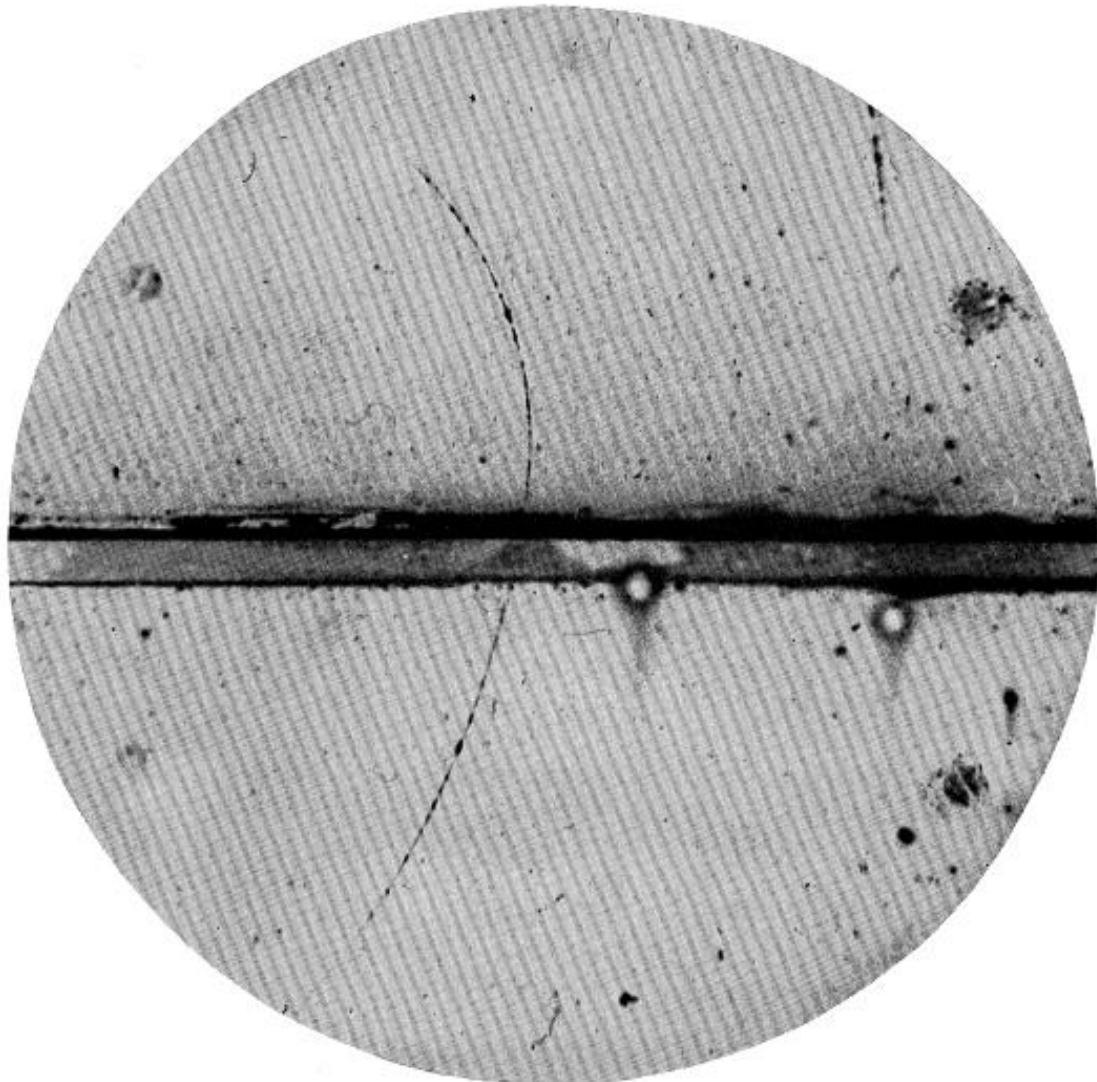


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

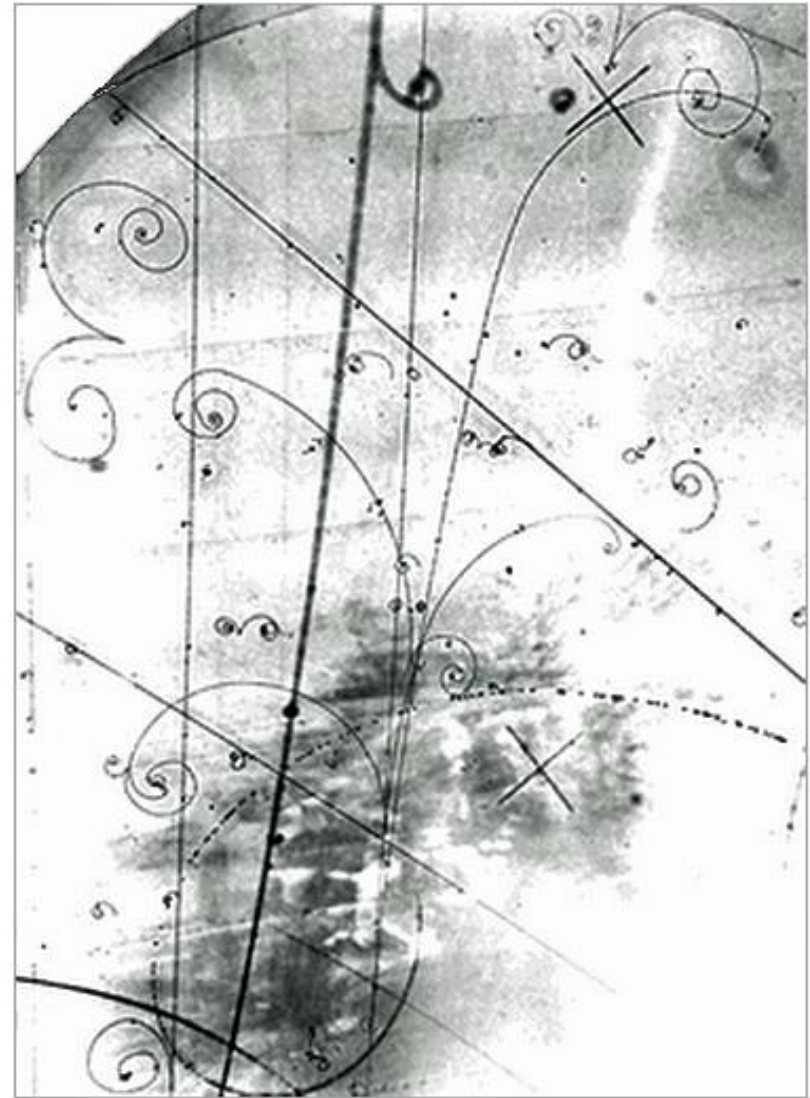
Paarvorming in een bellenvat

Uit een foton (geel) ontstaat een elektron-positronpaar (rood-roze).

De banen van de deeltjes zijn cirkelvormig gekromd door een magneetveld dat over het bellenvat is aangelegd.

De kromtestraal neemt af (dus de cirkel wordt een spiraal) want door botsing verliezen de deeltjes energie.

De krommingen zijn tegengesteld omdat het elektron negatief is en het positron positief.





Hideki Yukawa zocht een quantumfysische theorie van de zogeheten sterke wisselwerking: de aantrekking tussen nucleonen (protonen en neutronen).

Hij stelde in 1935 dat een nucleon continu (andere) deeltjes uitzendt. Als die deeltjes tegen een ander nucleon botsen, veroorzaakt de impulsoverdracht aantrekking.



Cecil Powell vond in 1947 inderdaad zulke deeltjes. Ze werden pi-mesonen of **pionen (π)** genoemd.

Veel later (na 1970) bleken uiteindelijk andere deeltjes de sterke wisselwerking te dragen: **gluonen**.

In de moderne natuurkunde is de beschrijving van krachtwerking door middel van **wisselwerkingsdeeltjes** inmiddels algemeen. Daarom zegt men wel dat de deeltjesfysica in 1935 met Yukawa is begonnen. Zie de dia's 9 en 24.



Clyde Cowan en **Frederic Reines** vonden in 1956 het **neutrino (ν)**: een neutraal, vrijwel massaloos deeltje, al in 1930 door Pauli voorspeld om β -verval mee te verklaren. (Later bleek het een anti-neutrino te zijn. Gewone neutrino's zijn daarna ook gezien). Zie dia 26.

Neutrino's zijn moeilijk te detecteren want ze reageren nauwelijks met materie. Ze zijn alleen gevoelig voor de zwakke wisselwerking (zie dia 24).

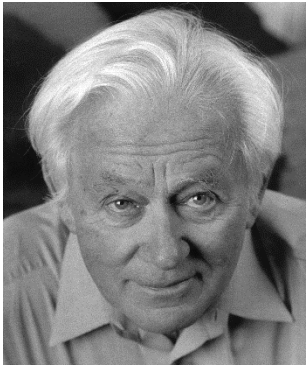


In de jaren 50 en 60 van de twintigste eeuw ontdekte men bij botsingsexperimenten en in kosmische straling steeds meer deeltjes, uiteindelijk meer dan honderd.

Murray Gell-Mann schiep orde in deze **Particle Zoo**.

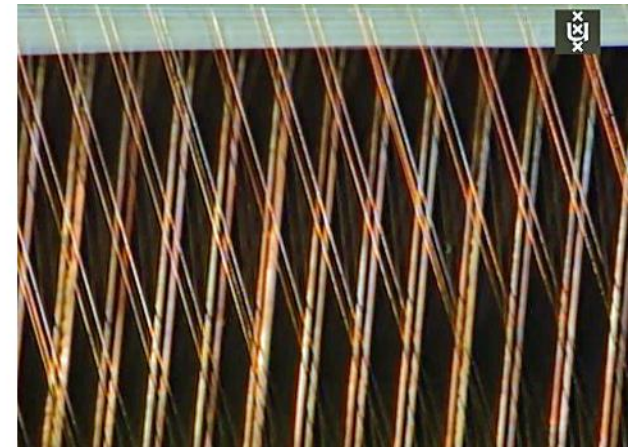
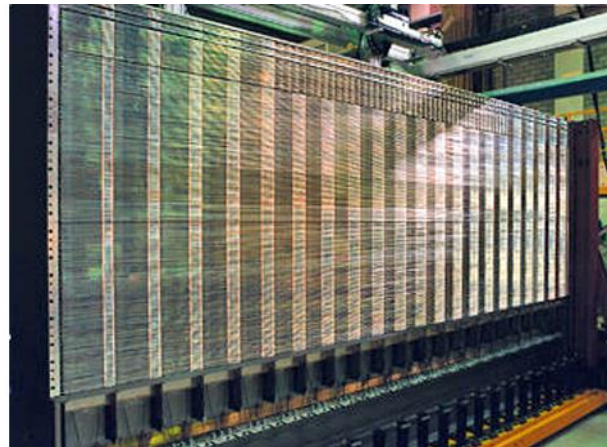
Hij suggereerde dat al die nieuwe deeltjes niet elementair zijn, maar opgebouwd uit nog kleinere, echt elementaire deeltjes. Die noemde hij **quarks**. De wisselwerkingsdeeltjes die de aantrekking tussen quarks verzorgen heten **gluonen (g)**.

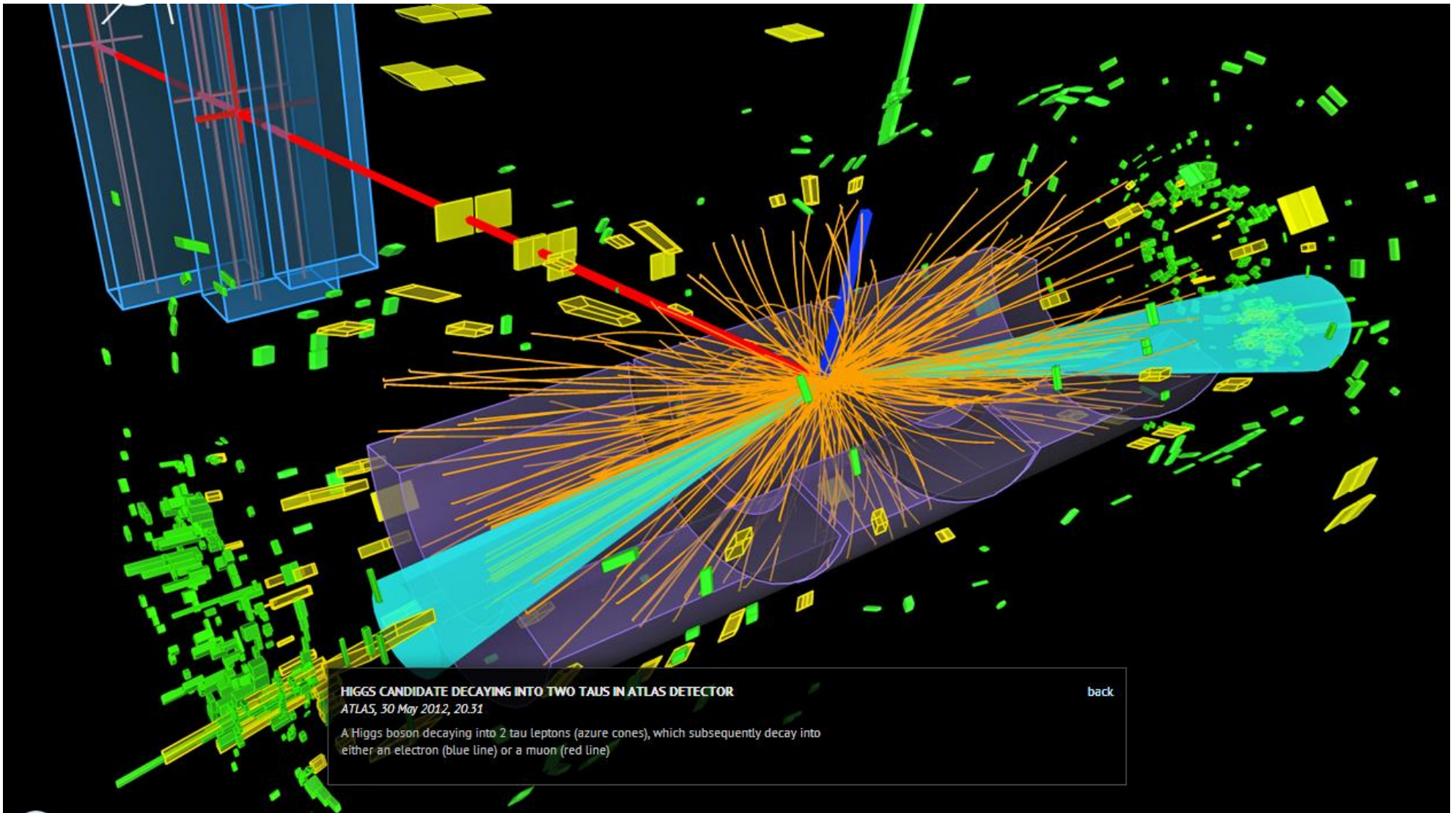
Dradenkamer



Bij moderne deeltjesversnellers (dia 3) worden onder andere **dradenkamers** als detectors gebruikt, in 1968 uitgevonden door **Georges Charpak**. Een dradenkamer is een gearde, metalen kast met daarin een raster van evenwijdige, metalen draden onder hoogspanning. Ionen, die ontstaan langs het spoor van een deeltje, worden aangetrokken door de dichtstbijzijnde draad. Uit de posities van draden die een stroompuls voelen berekent een computer de baan van het deeltje. Van reacties en andere gebeurtenissen kan een animatie worden gemaakt. Zie de volgende dia.

19/29



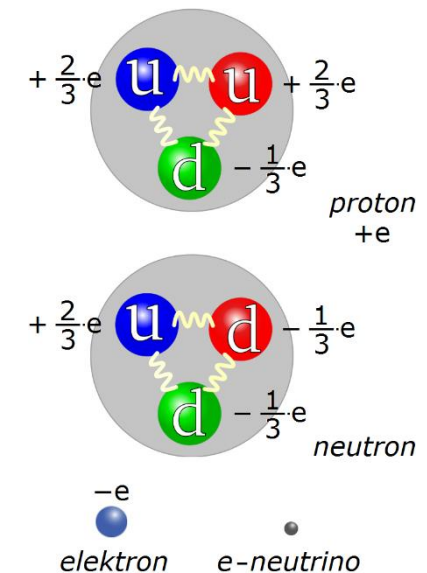


'A Higgs boson decaying into 2 tau leptons (azure cones), which subsequently decay into either an electron (blue line) or a muon (red line).'

Materie: elementaire deeltjes

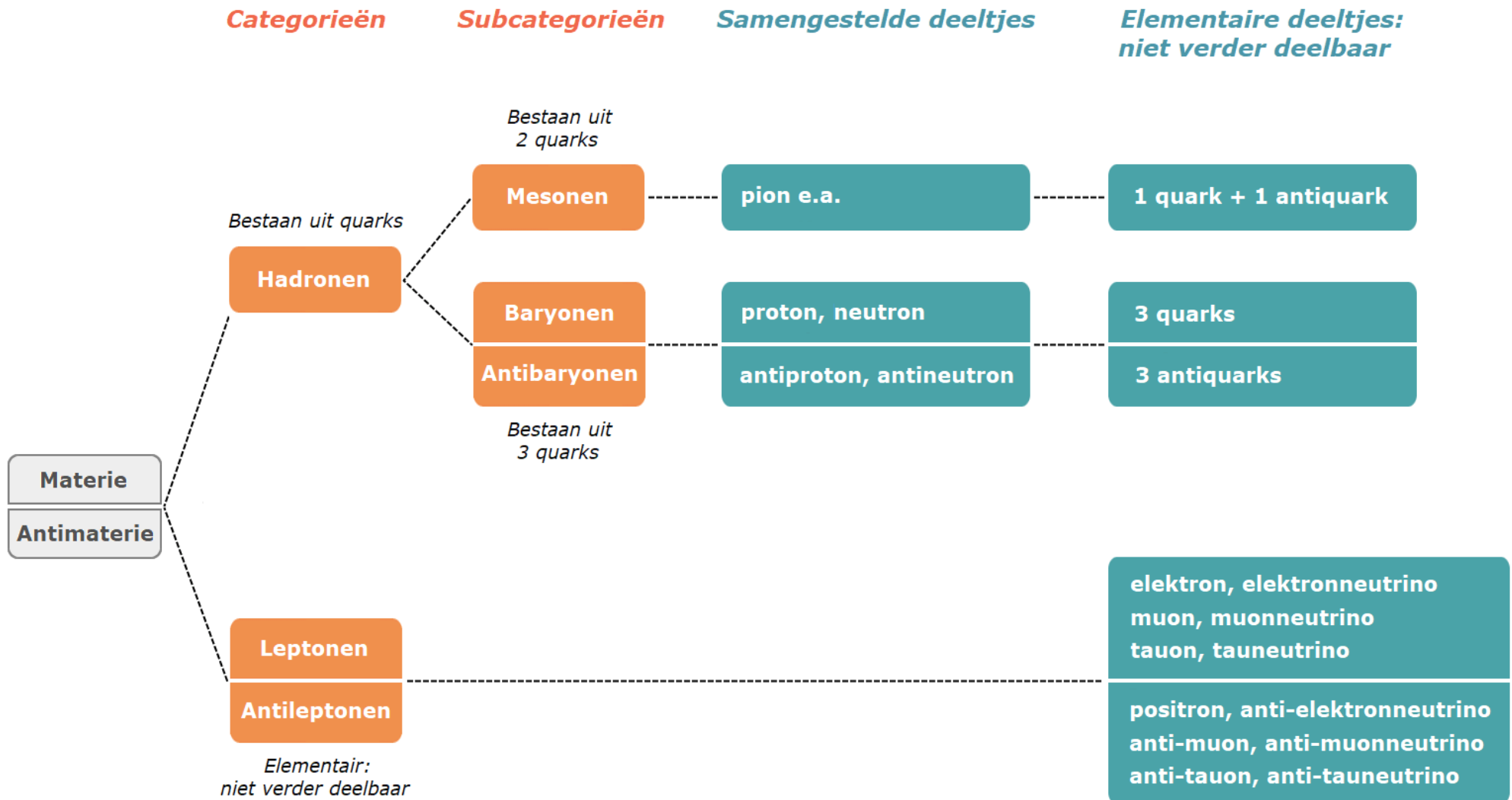
Quarks, elektronen en neutrino's zijn, voor zover we nu weten, **elementaire deeltjes**. Ze hebben geen interne structuur en geen meetbare afmeting. Er zijn zes soorten ('smaken') quarks, verdeeld in drie generaties (groepen). De andere elementaire deeltjes heten leptonen. Daarvan zijn er ook zes.

- **Quarks** hebben een gebroken lading en bijzondere namen:
 - 1e generatie: up ($+\frac{2}{3}\cdot e$) en down ($-\frac{1}{3}\cdot e$).
 - 2e generatie: charm ($+\frac{2}{3}\cdot e$) en strange ($-\frac{1}{3}\cdot e$).
 - 3e generatie: top ($+\frac{2}{3}\cdot e$) en bottom ($-\frac{1}{3}\cdot e$).
 - **Leptonen**:
 - 1e generatie: het elektron (e^-) en het e-neutrino (ν_e).
 - 2e generatie: het muon (μ) en het μ -neutrino (ν_μ).
 - 3e generatie: het tauon (τ) en het τ -neutrino (ν_τ).
 - Elk elementair materiedeeltje heeft ook een **antideeltje**.
- Quarks komen in gebonden twee- of drietallen voor, niet afzonderlijk. Leptonen komen wel afzonderlijk voor.



Gewone materie bestaat uit quarks en leptonen van de eerste generatie. Protonen en neutronen bestaan elk uit drie quarks: $p = uud$, $n = udd$. De deeltjes van de 2e en 3e generatie zijn instabiel, door hun te grote massa. Ze komen voor in kosmische straling en in deeltjesversnellers.

Materie en antimaterie – overzicht



Deeltjes, verzamelnamen

Subatomaire deeltjes zijn deeltjes kleiner dan een atoom.

Elementaire deeltjes: quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes.

Leptonen: het elektron, het muon, het tauon en de neutrino's.

Hadronen: deeltjes die uit quarks bestaan. Hadronen kunnen energie opnemen en in een aangeslagen toestand raken.

- Baryonen bestaan uit 3 quarks. Protonen en neutronen bijvoorbeeld.
- Mesonen bestaan uit 2 quarks: een quark en een antiquark.

Pionen (dia 17) zijn mesonen: $\pi^+ = u\bar{d}$, $\pi^0 = u\bar{u}/d\bar{d}$, $\pi^- = \bar{u}d$.

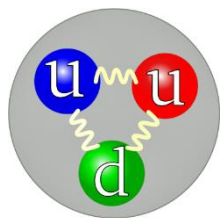
Nucleonen: protonen en neutronen.

Wisselwerkingsdeeltjes: krachtvoerende (of -dragende) deeltjes (zie dia 24).

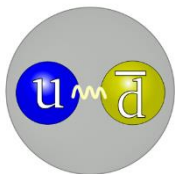
Fermionen hebben een halftallige spin, **bosonen** een heeltallige.

Quarks en leptonen zijn bijvoorbeeld fermionen. Fotonen zijn bosonen.

23/29



Het proton is een baryon.



π^+ is een meson.

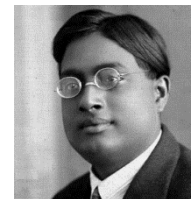
Het Griekse woord...

'hadros' betekent sterk,
'barys' betekent zwaar,
'mesos' betekent midden,
'leptos' betekent klein.

Fermionen zijn genoemd naar **Enrico Fermi**, die bètaverval onderzocht en aan de wieg stond van toegepaste kernenergie.



Bosonen zijn genoemd naar **Satyendra Bose**, die het gedrag van fotonen op een nieuwe, baanbrekende manier beschreef.



Wisselwerking

Elke wisselwerking (kracht) in de natuur is te herleiden tot een van de vier fundamentele wisselwerkingen.

	Reageert met	Relatieve sterkte*	Wisselwerkingsdeeltje	Effect
Sterke wisselwerking (sterke kernkracht)	Quarks en deeltjes die uit quarks bestaan. <i>Kleurlading</i> .	10^{38}	Gluon (g) [Pion (π^+ , π^0 , π^-)]	Houdt quarks, protonen en neutronen in atoomkernen bijeen.
Elektromagnetische kracht	Geladen deeltjes. <i>Lading</i> .	10^{36}	Foton (γ)	Houdt elektronen rondom atoomkernen gevangen.
Zwakke wisselwerking (zwakke kernkracht)	Quarks en leptonen. <i>Zwakke lading</i> .	10^{32}	W^+ , W^- , Z^0	Uitwisseling van energie, lading en massa. (Bijvoorbeeld bij β -verval).
Gravitatiekracht	Deeltjes met <i>massa</i> .	1	Graviton. (Nog niet gezien).	Houdt materie op grote schaal bijeen.

* Op deeltjesniveau, bij benadering.

- **Massa** is het vermogen tot gravitatiewisselwerking.
- **Lading** is het vermogen tot elektromagnetische wisselwerking.
- **Kleurlading** is het vermogen tot sterke wisselwerking.
- **Zwakke lading** is het vermogen tot zwakke wisselwerking.
- **Spin** is een deeltjeseigenschap, enigszins vergelijkbaar met tolleren om de eigen as. Geladen deeltjes met spin zijn kleine magneetjes.

Alle wisselwerkingsdeeltjes zijn bosonen.

Deeltjesprocessen – behoudswetten en symmetrieën

Bij het onderzoek naar (mogelijke) deeltjesprocessen spelen behoudswetten en symmetrieën een belangrijke rol. Dat die twee nauw verwant zijn, was al in 1918 aangetoond door de wiskundige **Emmy Noether**.

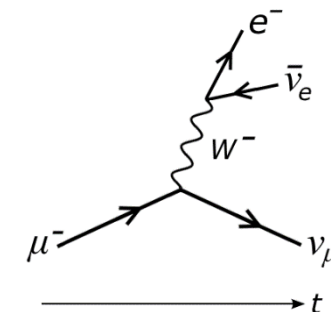
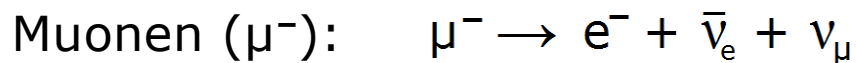
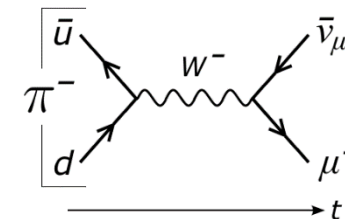
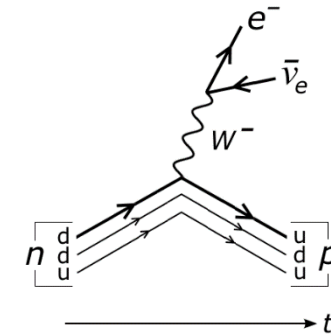
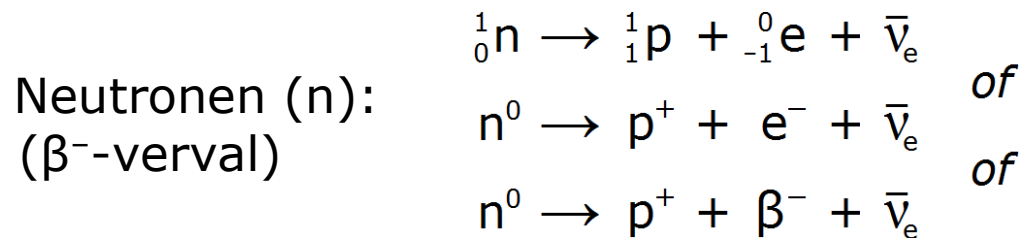


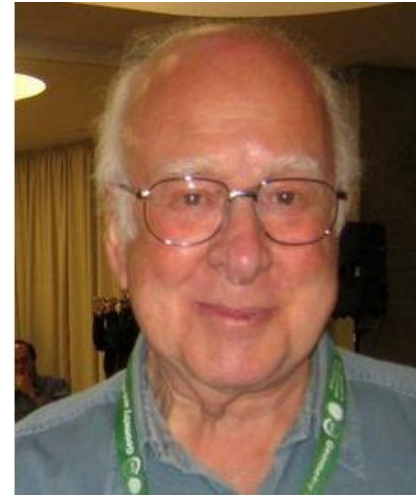
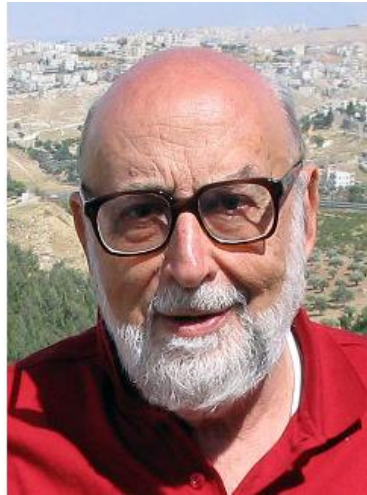
- **Behoudswetten.** Er geldt behoud van:
 - Lading.
 - Massa + energie.
 - Impuls en impulsmoment.
 - Baryongetal (aant. quarks) en leptongetal. (Deeltje +1, antideeltje -1).
- **Symmetrieën.** Een proces is symmetrisch als het na een bepaalde wijziging een ander bestaand proces oplevert.



Richard Feynman bedacht in de jaren 60 van de vorige eeuw een manier om deeltjesprocessen overzichtelijk weer te geven: het **feynmandiagram**. Op de volgende dia zie je drie voorbeelden.

Instabiele deeltjes vervallen, onder invloed van de sterke, de zwakke of de elektromagnetische wisselwerking. Hieronder staan drie voorbeelden. Je ziet steeds de reactievergelijking en het feynmandiagram. Elk knooppunt van pijlen stelt een gebeurtenis voor. Pijlen van antideeltjes gaan naar links.



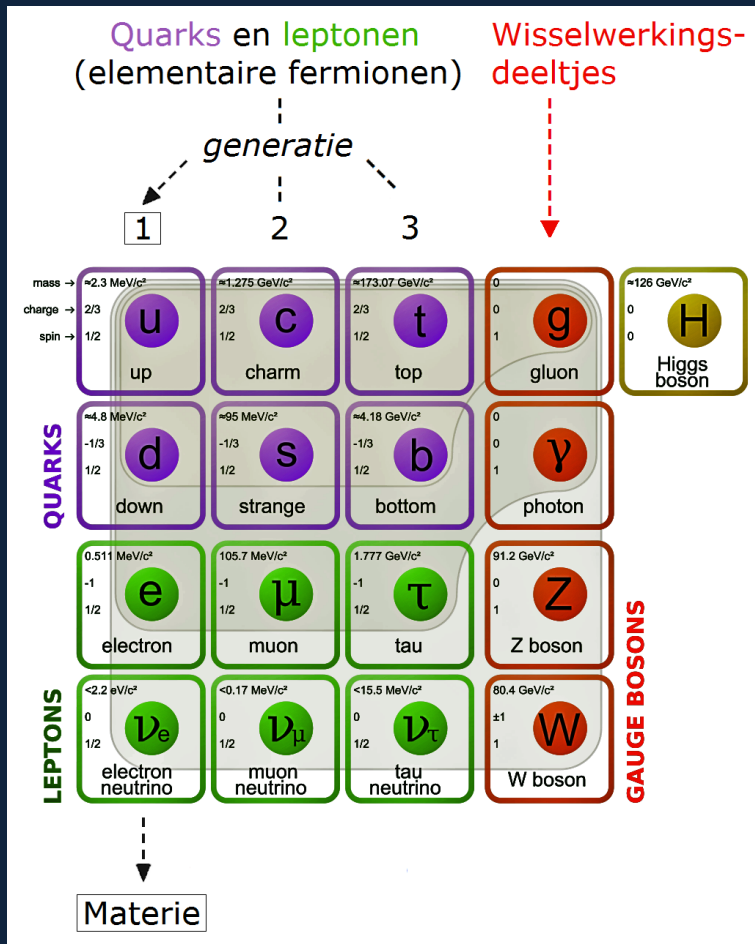


Robert Brout en **François Englert** publiceerden in augustus 1964 een theorie die verklaart dat deeltjes *massa* hebben. **Peter Higgs** kwam twee weken later met een soortgelijke theorie. Centraal in de theorie staat een tot dan toe nog niet waargenomen deeltje.

Bijna 50 jaar later, op 4 juli 2012, maakte het CERN bekend dat met behulp van de LHC een dergelijk deeltje was ontdekt. Op 14 maart 2013 bevestigde het CERN dat nogmaals, onder voorbehoud. Het wordt het **higgsdeeltje** of higgsboson genoemd. Zie ook dia 3.

<https://home.cern/science/physics/higgs-boson>

Wat zijn de bouwstenen van materie? Wat is kracht, wat is wisselwerking? Waaruit bestaat het universum?



De tabel hiernaast toont de **bouwstenen van de natuur**. Voor zover we nu weten bestaat het universum uit deze bouwstenen en dankzij hun wisselwerking.

Het **Standaardmodel** is de meest nauwkeurige en volledige theorie die we er van hebben. Het Standaardmodel stemt overeen met de speciale relativiteitstheorie en de quantumfysica, maar is geen 'theorie van alles' – gravitatie komt er bijvoorbeeld niet in voor.

Fysici begonnen er halverwege de vorige eeuw aan en er wordt nog steeds aan gewerkt. De theorie is erg succesvol en daarom breed aanvaard. Uitkomsten van allerlei experimenten konden er mee worden voorspeld.

Bronvermelding foto's fysici

Anderson	https://www.thefamouspeople.com (bewerkt)
Becquerel	https://commons.wikimedia.org
Bohr	https://www.nobelprize.org
Bose	https://commons.wikimedia.org
De Broglie	https://www.nobelprize.org (still uit documentaire)
Brout	https://commons.wikimedia.org
Chadwick	https://www.indiatoday.in (https://www.indiatoday.in/education-today/qk-current-affairs/story/james-chadwick-the-man-who-discovered-neutrons-347469-2016-10-20)
Charpak	https://alchetron.com
Compton	https://www.nobelprize.org (still uit documentaire)
Cowan	https://www.aps.org (https://aps.org/programs/honors/history/historicsites/savannah.cfm)
Curie	https://www.nobelprize.org
Dalton	https://commons.wikimedia.org
Davison, Germer	https://physics.aps.org (https://physics.aps.org/story/v17/st17)
Democritus	https://www.nndb.com
Dirac	https://www.nobelprize.org
Einstein	https://commons.wikimedia.org (deel van grotere foto)
Englert	https://commons.wikimedia.org
Fermi	https://cds.cern.ch (https://cds.cern.ch/record/45940)
Feynman	https://repository.aip.org (https://repository.aip.org/islandora/search/Feynman?type=edismax&cp=nbla%3Asegre)
Gell-Mann	https://hep.caltech.edu (https://hep.caltech.edu/gm/gm.php?p=photos.php)
Glaser	https://www.nobelprize.org
Heisenberg	https://scarc.library.oregonstate.edu (https://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/pictures/portrait-heisenberg.html)
Higgs	https://commons.wikimedia.org
Leucippus	https://commons.wikimedia.org en https://fineartamerica.com
Maxwell	https://www.clerkmaxwellfoundation.org
Meitner	https://www.wired.com en https://www.nomorematildas.com (oort: https://www.zbp.univie.ac.at/ausstellung/meitner/traditionstag/034)
Noether	https://commons.wikimedia.org
Pauli	https://scarc.library.oregonstate.edu (https://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/pictures/1926i.61-pauli.html)
Planck	https://www.nobelprize.org en https://commons.wikimedia.org
Powell	https://www.nobelprize.org
Reines	https://www.aps.org (https://aps.org/programs/honors/history/historicsites/savannah.cfm)
Rutherford	https://commons.wikimedia.org en https://www.odt.co.nz (6 december 2008) (https://www.odt.co.nz/lifestyle/magazine/rutherford-he-changed-way-we-view-nature)
Schrödinger	https://commons.wikimedia.org
G.P.Thomson	https://www.sspiprints.com (https://www.sspiprints.com/image/91389/sir-george-paget-thomson-english-physicist-c-1925)
J.J.Thomson	https://www.fnal.gov (https://www.fnal.gov/pub/inquiring/timeline/02.html)
Wilson	https://www.bbc.com (https://www.bbc.com/news/uk-scotland-20608377)
Yukawa	https://www.clubotaku.org (https://www.clubotaku.org/niji/cultu/hideki-yukawa/)

Bronvermelding overige afbeeldingen

Dia 1	https://farm4.staticflickr.com/3777/10007461963_6f26e2d1eb_z.jpg via https://hubblesite.org/resource-gallery en https://www.shutterstock.com/nl/video/clip-2917756-hand-giving-daisy-flowers
Dia 1, 20	https://home.cern
Dia 2	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CC_Vaste_stof.svg en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CC_Vloeistof.svg en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CC_Gas.svg
Dia 2, 14, 16	https://teacher-programmes.web.cern.ch (https://scoollab.web.cern.ch/bubble-chamber-pictures-classroom)
Dia 2, 27	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg
Dia 3	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CERN_Aerial_View.jpg en https://cds.cern.ch/record/1295244
Dia 14	https://commons.wikimedia.org (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PositronDiscovery.jpg)
Dia 15	https://journals.aps.org (https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.43.491)
Dia 19	https://www.youtube.com (https://www.youtube.com/watch?v=LZJZ_qVaKvY) en https://www.nikhef.nl (https://www.nikhef.nl/pub/pr/ZEUS.html)
Dia 21, 23	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark_structure_proton.svg
Dia 21	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark_structure_neutron.svg
Dia 22	<i>NewScientist</i> , juli/augustus 2022. https://www.newscientist.nl
Dia 23	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quark_structure_pion.svg
Dia 26	https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta_Negative_Decay.svg http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/hadron.html en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PiPlus_muon_decay.svg (gecombineerd) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muon_Decay.png