

Elementaire deeltjes fysica: een reductionistische zoektocht naar de schepping



Meesterklassen deeltjesfysica
10 Maart 2012
Nick van Remortel
EDF-UA



TEN MYTHS ABOUT RUSSIA JAPAN: HOT GREEN CARS

Newsweek

The Biggest Experiment Ever
(And It's European)



The new CERN collider in Geneva

Albania	Lek 600	Finland	€14.00	Israel	NIS 20.00	Netherlands	€4.40	Slovenia	€3.40
Austria	€4.40	France	€4.40	Italy	€4.40	Norway	€4.40	Spain	€4.40
Belgium	€4.40	Germany	€4.40	Kazakhstan	€4.40	Poland (incl tax)	PLN 12.30	Sweden	SKr 34.00
Bulgaria	BGL 4.50	Gibraltar	€2.30	Latvia	€4.40	Portugal Cont.	€4.40	Switzerland	Sfr 7.70
Croatia	KN 22.00	Greece	€4.40	Lithuania	€4.40	Romania	Lei 11.00	Ukraine	YTL 4.00
Cyprus	€2.50/€4.40	Hungary	€1 700.00	Luxembourg	€4.40	Russia	€4.40	United Kingdom	£4.40
Czech Republic	CZK 115.00	Ireland	€4.40	Malta	€4.40	Serbia	DIN 240	U.S. Forces	\$3.25
Denmark	Kr 38.00	Ireland (incl tax)	€4.40	Montenegro	DIN 240	Slovakia	SK 120.00/€3.98		



Science

21 March 2007 \$16

The Large
Hadron Collider
Europe Takes the Lead
in Particle Physics

AAAS

Elementaire deeltjes fysica

Vragen die de mensheid al 2000 jaar bezighouden

- Wat zijn de ultieme bouwstenen van de materie ?
- Wat zijn de fundamentele krachten die op deze bouwstenen werken ?

Elementaire deeltjesfysica is een reductionistisch
proces gebaseerd op:

Unificatie
Atomisme
Symmetrie

Deeltjesfysicus anno 500 B.C.



CMS feestje anno 2007.





De grote vragen

- De meest fundamentele bouwstenen van de materie?
- De fundamentele krachten die werken op deze bouwstenen?
- De oorsprong en evolutie van het Heelal.
- Waar komt 'massa' vandaan?
- Dark Matter & Dark Energy probleem
- Leven we in $n > 3+1=4$ dimensies?
- Kunnen alle bekende krachten herleid worden tot 1 ge-unificeerde kracht? Grand Unified Theory (GUT)
- Wat met Gravitatie $\longleftrightarrow$ Quantummechanica?
- Waarom is er meer materie dan antimaterie ?
- Wat is de fundamentele symmetrie achter alle natuurwetten ?

atomisme

unificatie

symmetrie

- 1803, Dalton: Chemische samenstellingen bestaan uit dezelfde gewichtsverhoudingen.
 - bvb. CO bestaat in verhouding 12 koolstof / 16 zuurstof

“Chemische samenstellingen bestaan uit atomen en elk element heeft zijn eigen atoom.”

- Opmerkelijk postulaat van Prout in 1815:

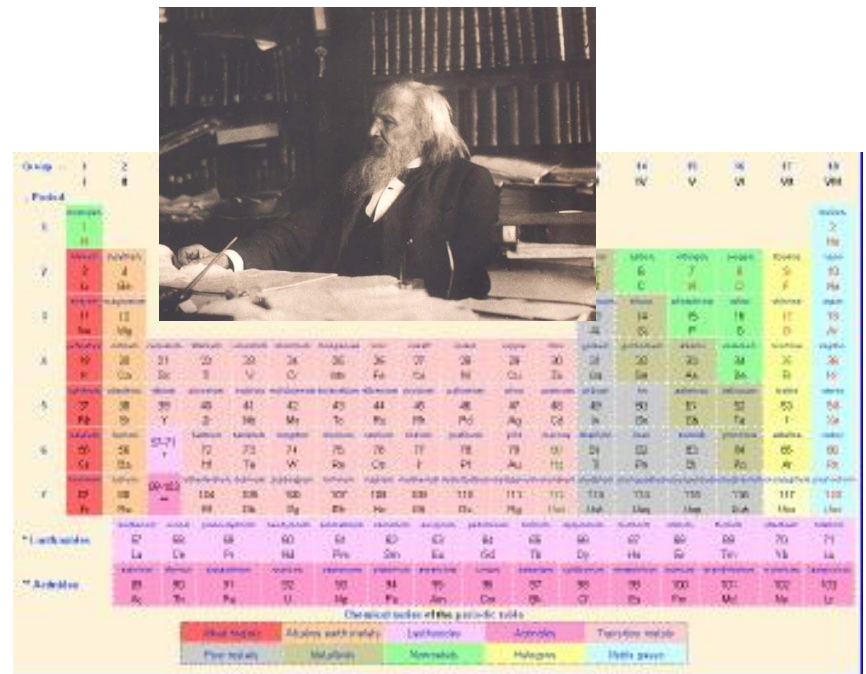
“Elk atomair gewicht is een geheel veelvoud van dat van het waterstof atoom, bijgevolg is alles opgebouwd uit waterstof atomen.”

- 1870, Mendeleev:

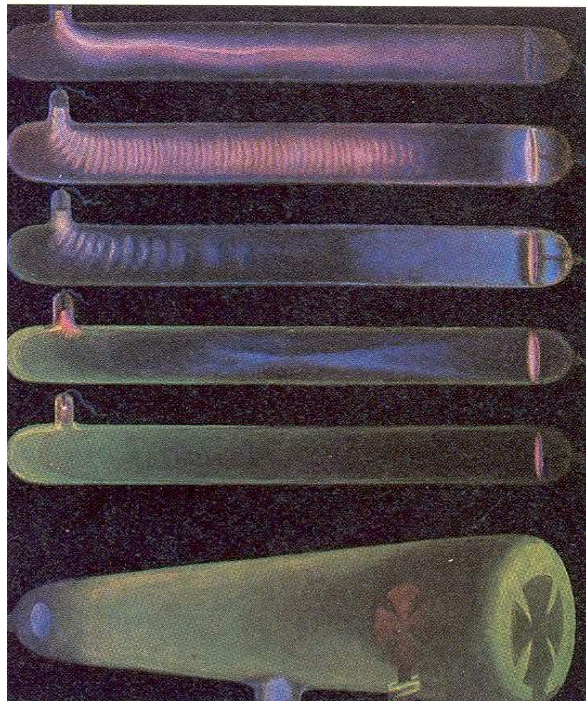
- ordent de scheikundige elementen volgens atomair gewicht en vond een symmetrisch patroon van gelijkaardige chemische eigenschappen

- Sommige 'lege' plaatsen werden later ingevuld door ondermeer ontdekking van gallium, germanium, etc...

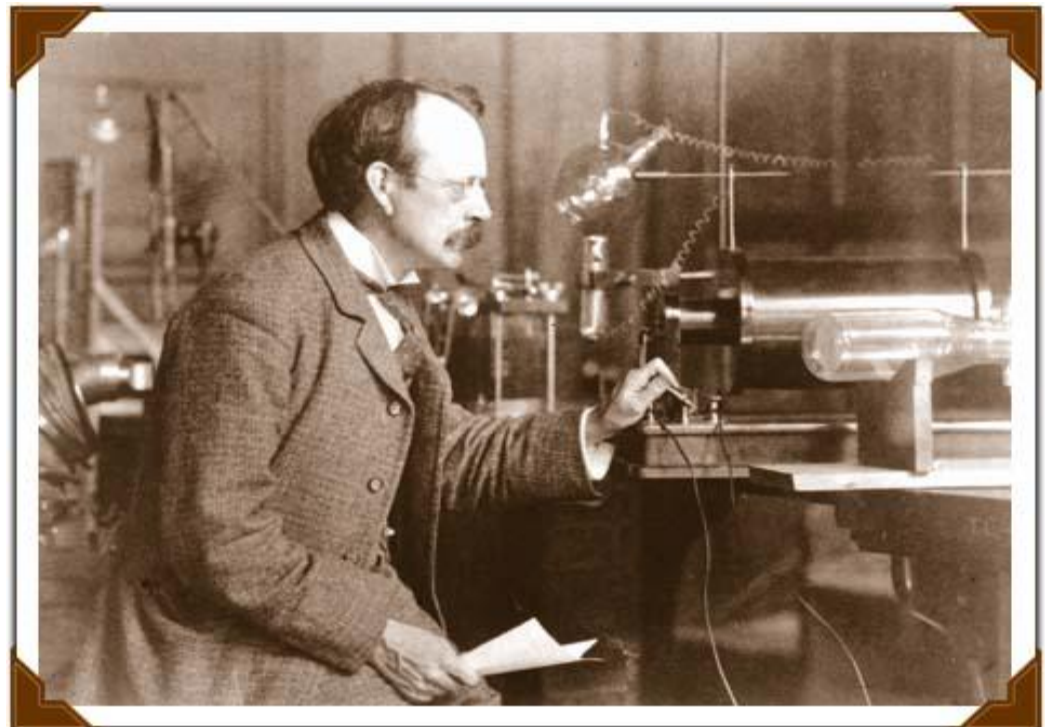
- Verklaring volgt pas begin 20e eeuw met kwantumtheorie en ontdekking van atoom kern



- Eind 19e eeuw: experimenten met kathodestralen: lichtende gloed in met gas gevulde glazen buis onder hoogspanning:
 - Negatief geladen, onafhankelijk van gasmengesel, penetrerend vermogen, afbuiging door elektrisch en magnetisch veld,
 - T. meet vaste waarde van e/m , en gokt dat lading $,e$, gelijk is aan waterstof atoom en m veel kleiner: een nieuw fundamenteel deeltje: het elektron!
- Crookes: kathode buizen



J.J. Thomson: 1897 het elektron!



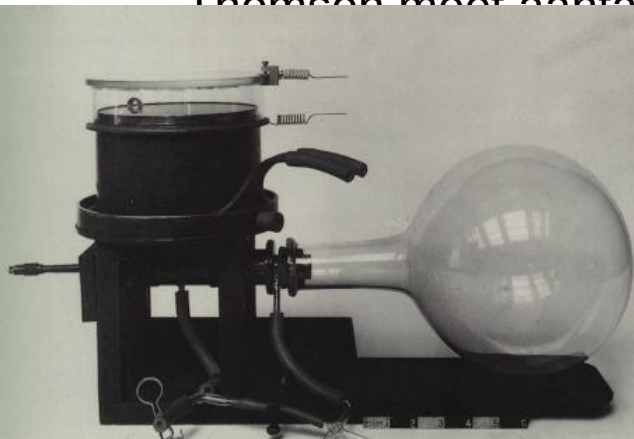


Eerste 'sporen' van deeltjes

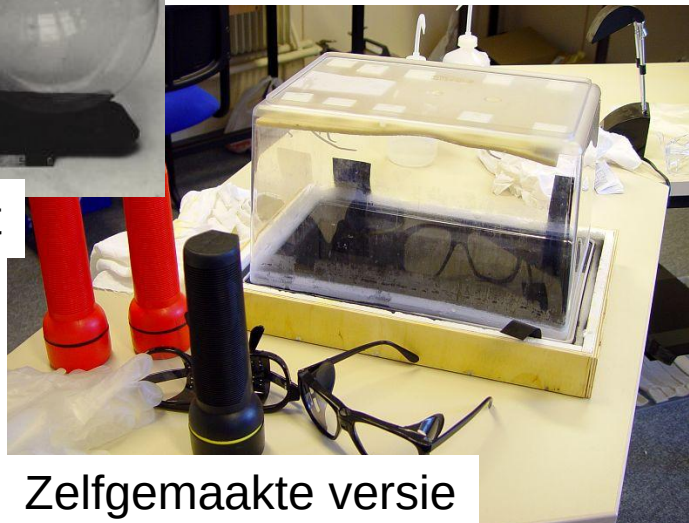
- J.J. Thomson meet de lading van zijn kathodestraal (elektron) om zo ondubbelzinnig de massa te bepalen
- C. Wilson: Thomsons Schotse doctoraatstudent had de perfecte 'detector'
 - Nevelvat (Cloud chamber): kamer met onderkoeld gas, gebouwd om regenval te bestuderen adhv druppels die gevormd worden aan geladen ionen

Thomson meet aantal druppels en totale lading in de kamer met elektrometer

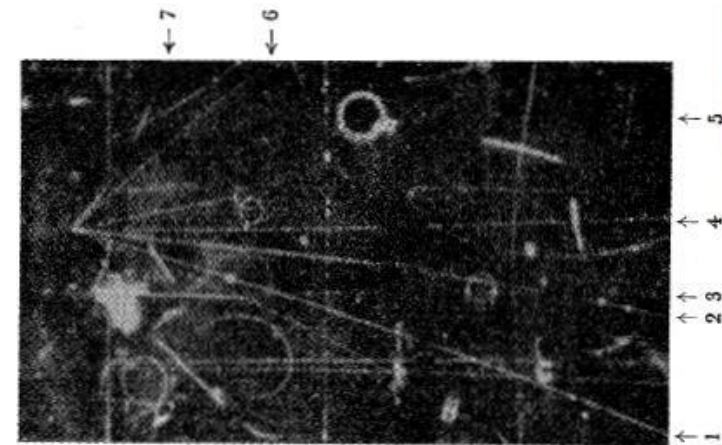
Het atoom is gebroken en ons eerste elementaire deeltje gevonden!



1898: wilson nevelvat

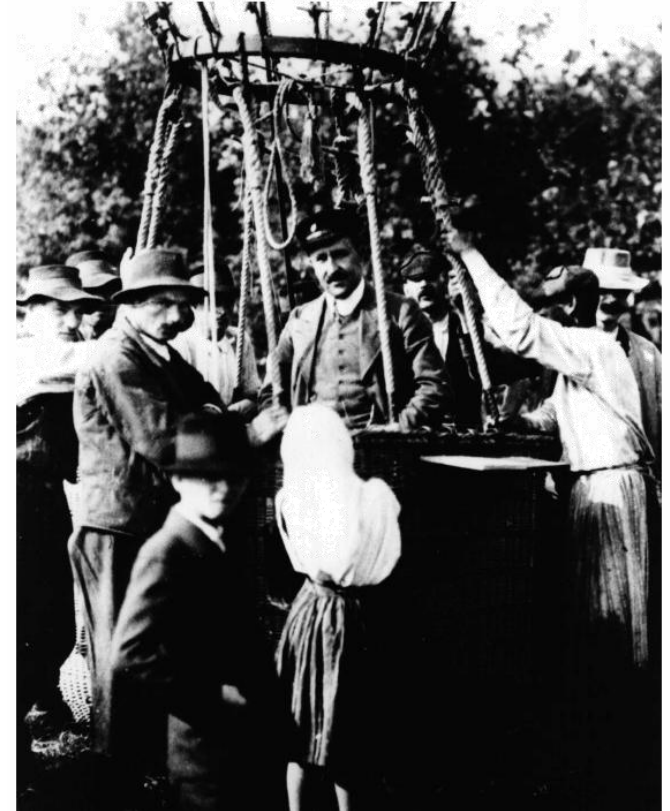


Zelfgemaakte versie



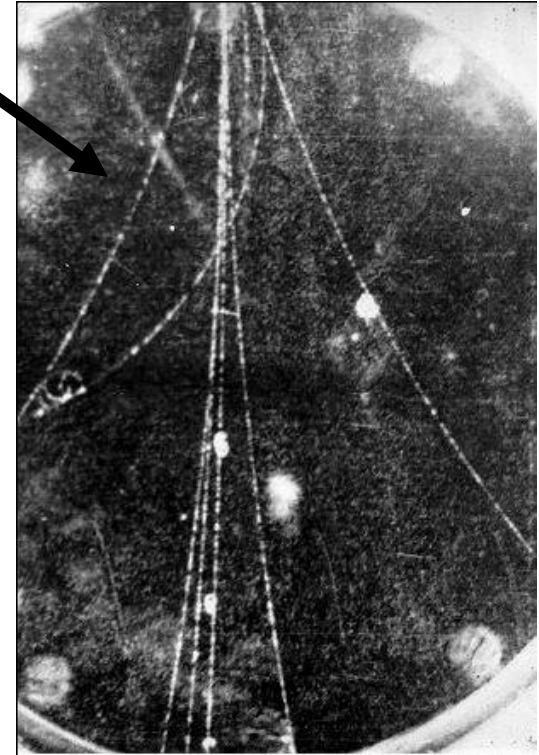
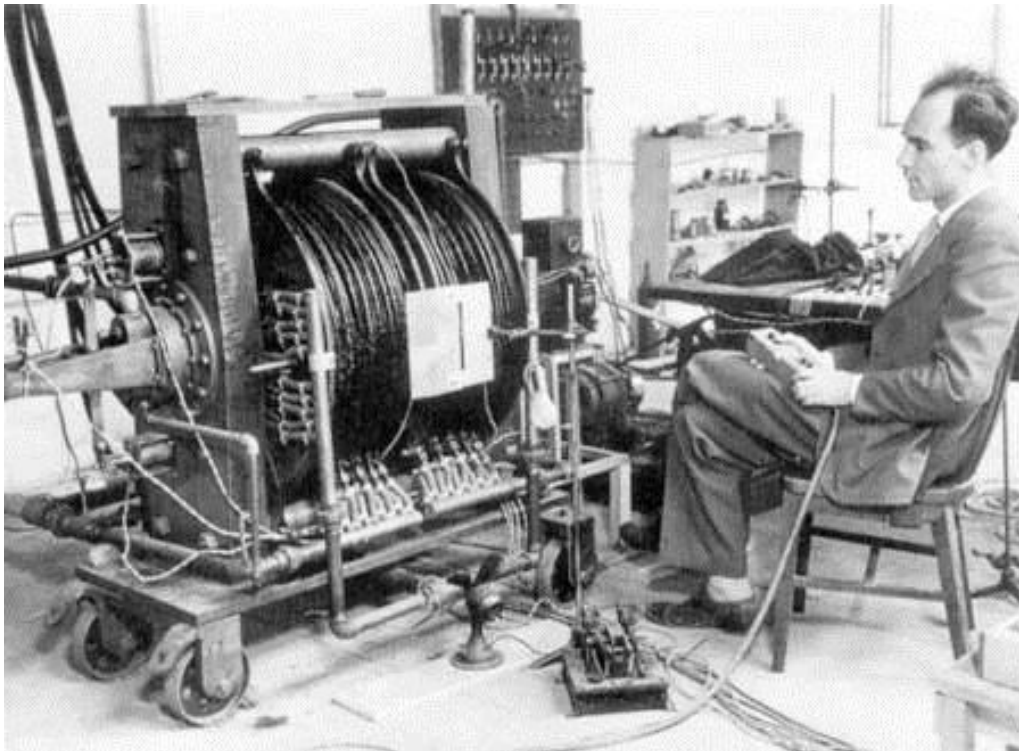
Ontdekking van elementaire deeltjes

Victor Hess, 1912: Cosmische straling



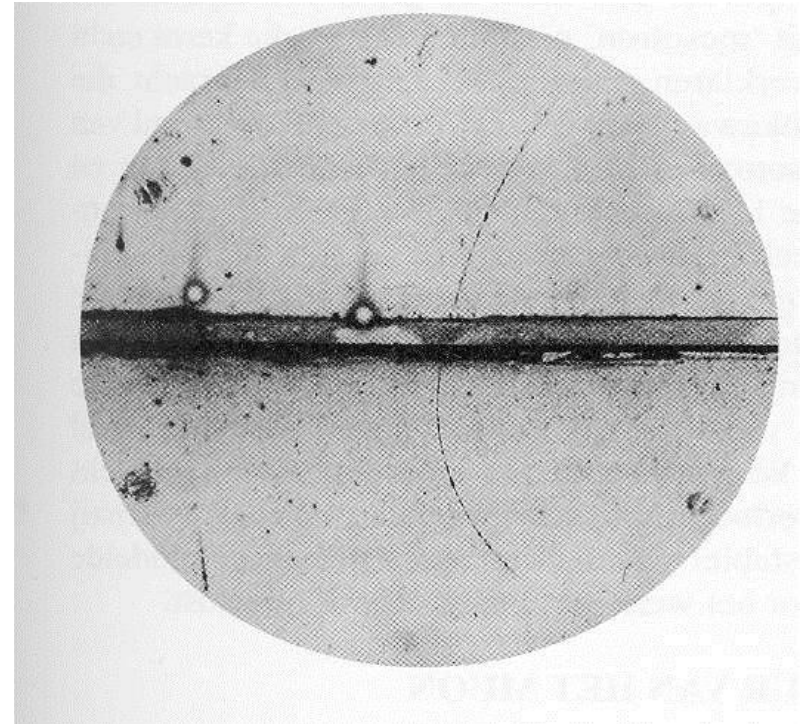
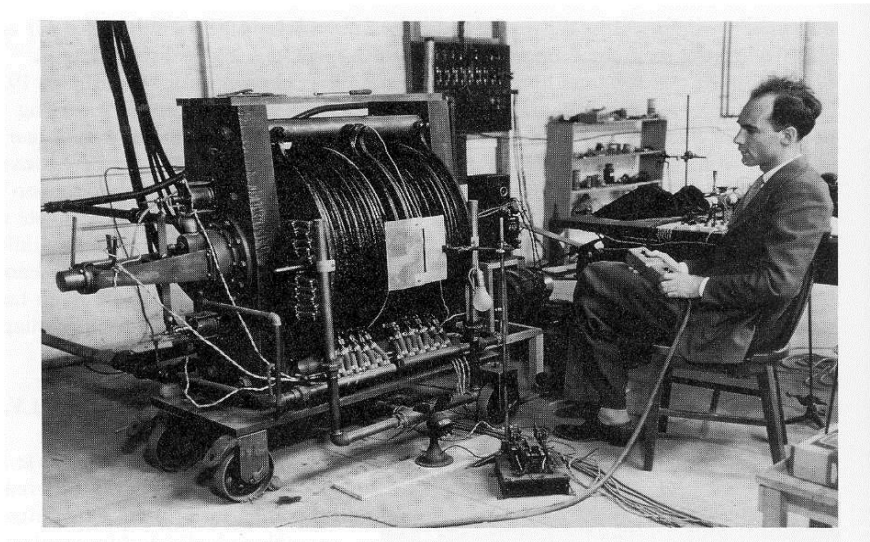
Een positief geladen elektron: positron

Carl Anderson 1932



- Ontwikkeling van quantumtheorie: Heisenberg, Schrödinger, Dirac, ... botste op de beperkte relativiteitsleer van Einstein
- Dirac vond de oplossing (1927) en kwam tot belangrijke inzichten: de nieuwe kwantum eigenschap 'spin' en een nieuw soort symmetrie: het bestaan van antimaterie.

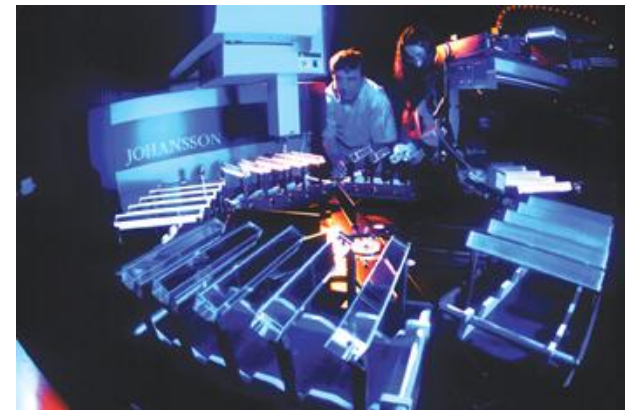
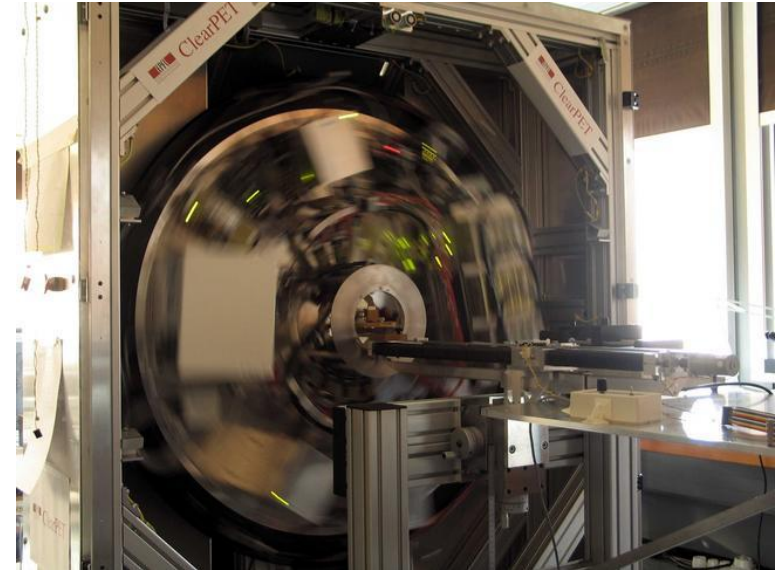
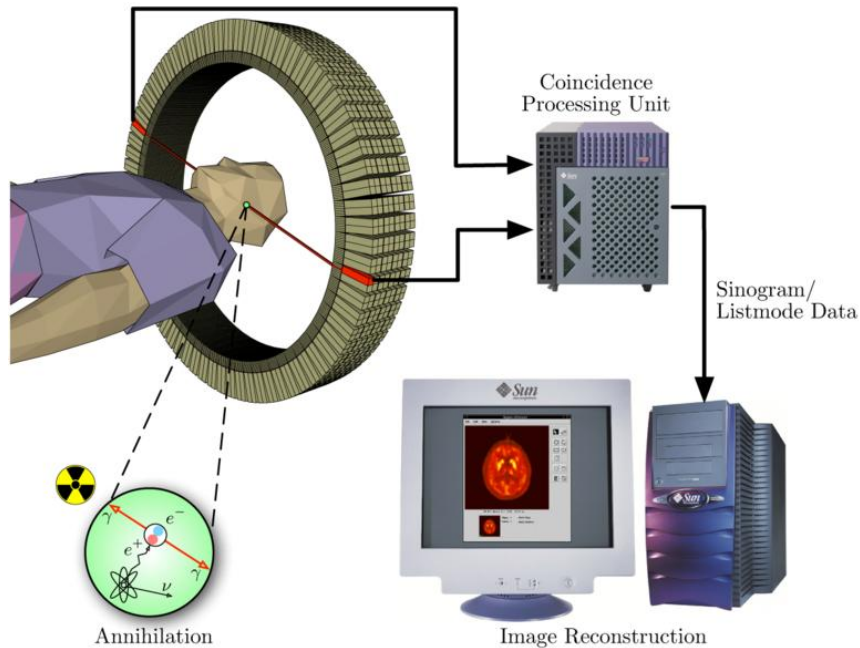
Carl Anderson ontdekt het positron in een nevelkamer door studie van kosmische stralen



1 foto => 1 Nobelprijs!!

Antimaterie in de medische sector

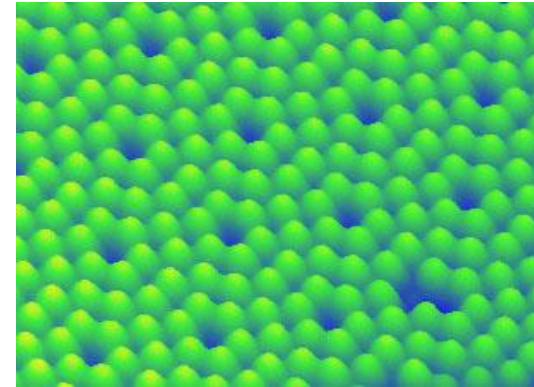
- Positron emission tomography (PET)
 - Annihilatie van positron uitgezonden door een radioactieve kern met elektron in het lichaam produceert twee fotonen die in tegengestelde richtingen worden uitgezonden.



Know – how uit de deeltjesfysica
Wordt toegepast voor de detectie van
de uitkomende fotonen.

- Men observeert objecten door het verstrooide licht waar te nemen

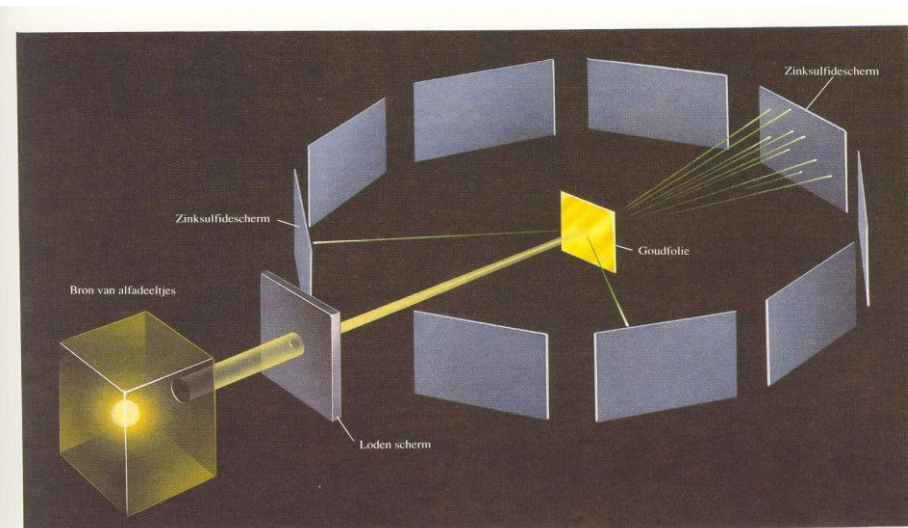
Energetische straling (x-stralen) hebben een zeer penetrerend vermogen



Koolstof atomen worden gezien door verstrooiing van elektronen

Rutherford verstrooiing met alfa deeltjes (helium kernen) op zeer dunne goudfolie
Resulteert in ontdekking van atoomkern

Alsof een kogel terugkaatste op blad papier!



Moderne verstrooiingsexperimenten

- Een van de meest succesvolle manierem om de sub-structuur van de materie te doorgronden

1911, Cavendish lab

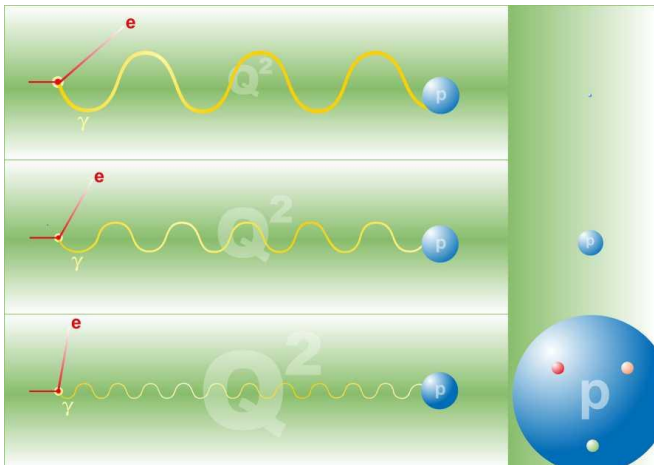


5 MeV bundel van alfa's

1966, Stanford linear accelerator center
20 GeV bundel elektronen



mensje



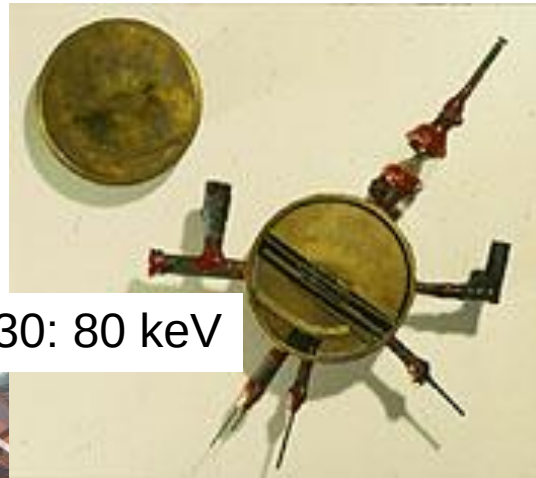
Eerste indicatie voor substructuur van het proton
door een modern Rutherford experiment bij
SLAC, California

Later worden quarks (en gluonen) rechtstreeks
geobserveerd

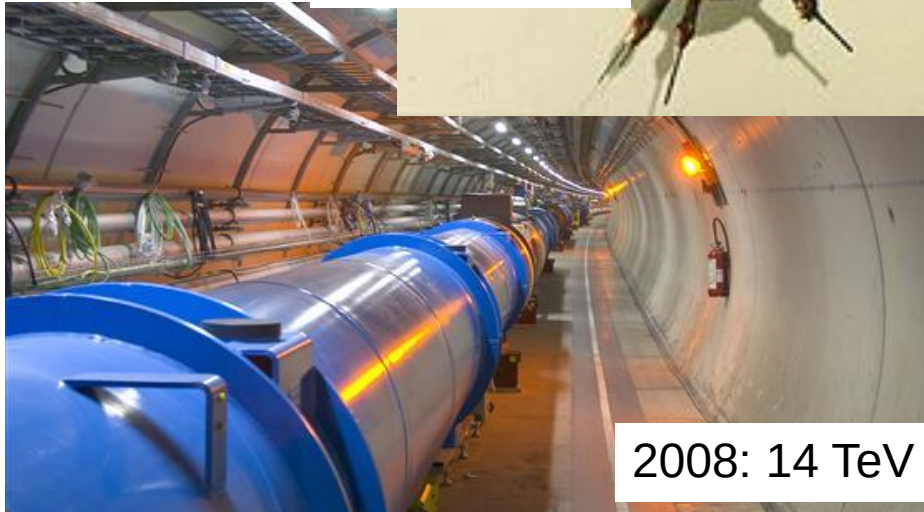
Elementaire deeltjes is een experimentele EN theoretische wetenschap

Experimenteren doen we met

Versnellers

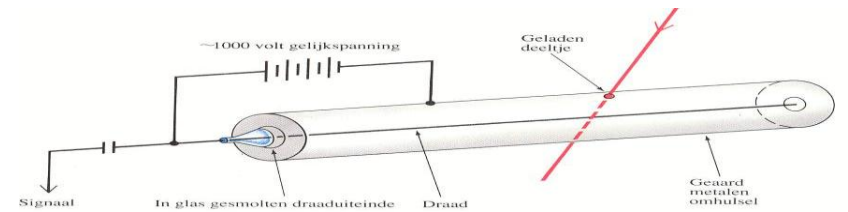


1930: 80 keV



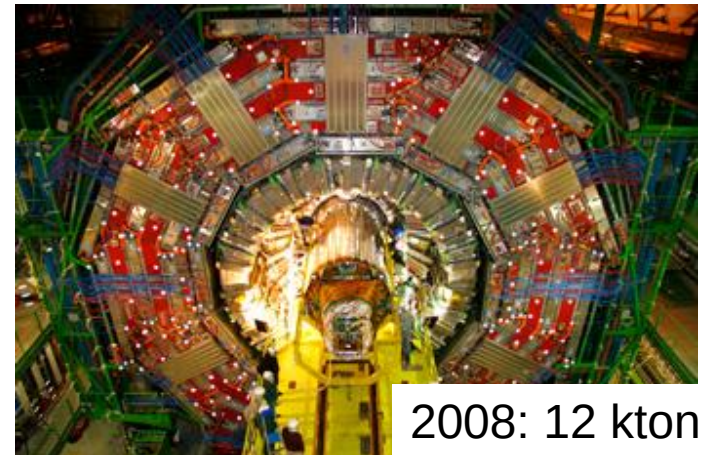
2008: 14 TeV

detectoren



Klik!!

1908: ontdekking van kern



2008: 12 kton
Ontdekking Higgs ?



Energie en temperatuur

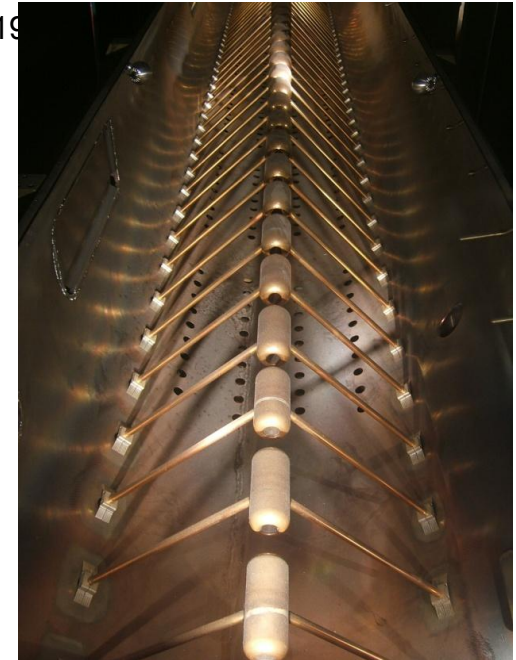
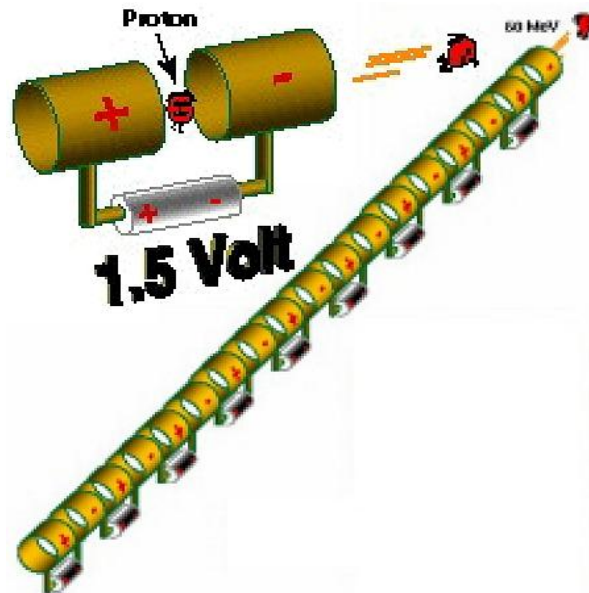
- SI eenheid van energie = Joule (J) = enorm grote eenheid voor atoom en kernfysica
- Vervangende eenheid: elektronVolt (eV) = $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

- 1 elektronvolt: De energie die een vrij elektron verkrijgt indien het door een elektrostatische potentiaal van 1 Volt versneld wordt

MeV = Miljoen eV = 10^6 eV

GeV = Miljard eV = 10^9 eV

TeV = Biljoen eV = $10^{12} \text{ eV} = 10^{-7} \text{ Joule}$



- Thermische energie van een luchtmolecule bij kamertemperatuur: 0.04 eV
- Zichtbaar licht: $1 - 4 \text{ eV}$
- Bindingsenergie van een elektron in waterstofatoom: 14 eV
- Energie van elektronen in een (oude) televisie: $20,000 \text{ eV}$

Boltzmann wet: Energie = constante x Temperatuur

$$\text{↳} = 10^{-4} \text{ eV per Kelvin}$$



Energie en afstand

- Planck's energie-golflengte wet:

Energie = constante / golflengte

$$1 \text{ meter} = 10^{-6} \text{ eV}$$

- Hoe groter de energie, hoe kleiner de golflengte van het 'licht' waarmee je kijkt

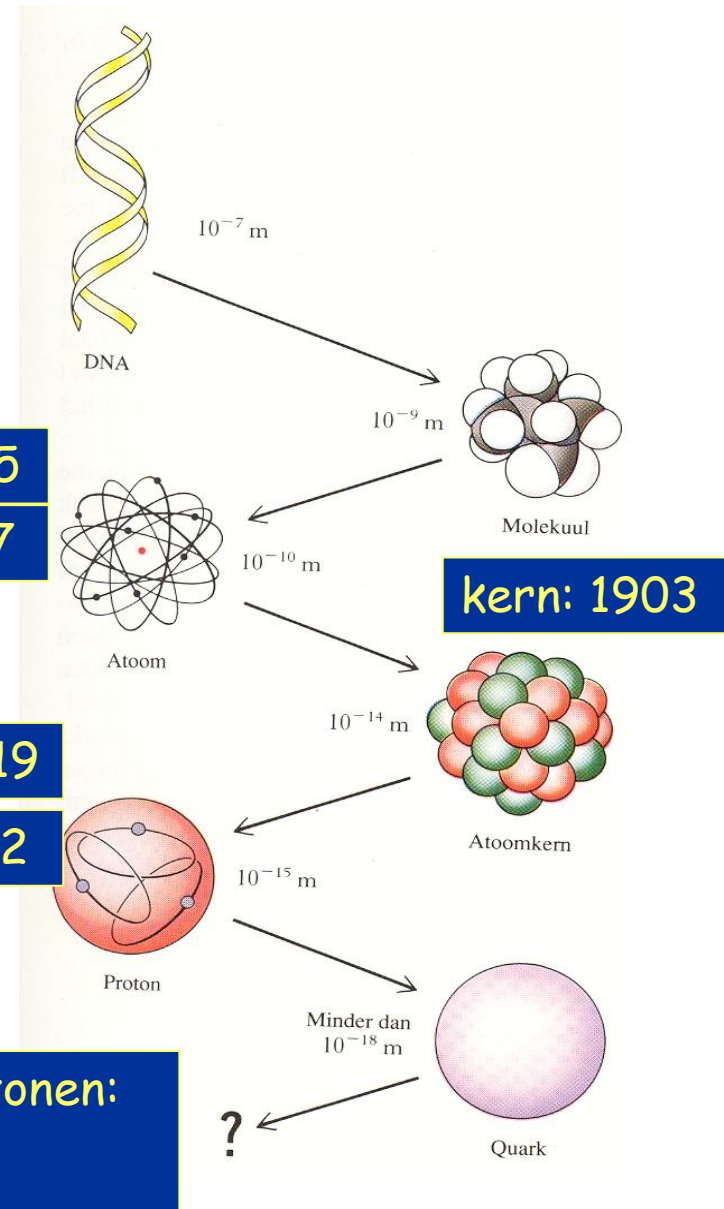
- 1 eV = 1 micrometer (diameter bacterie)
- 10 keV = 10^{-10} meter (straal kleine atomen)
- 0.1 GeV = 10^{-14} meter (aatomkern)
- 1 GeV = 10^{-15} meter (diameter proton)

- Deeltjesversnellers zijn grote microscopen

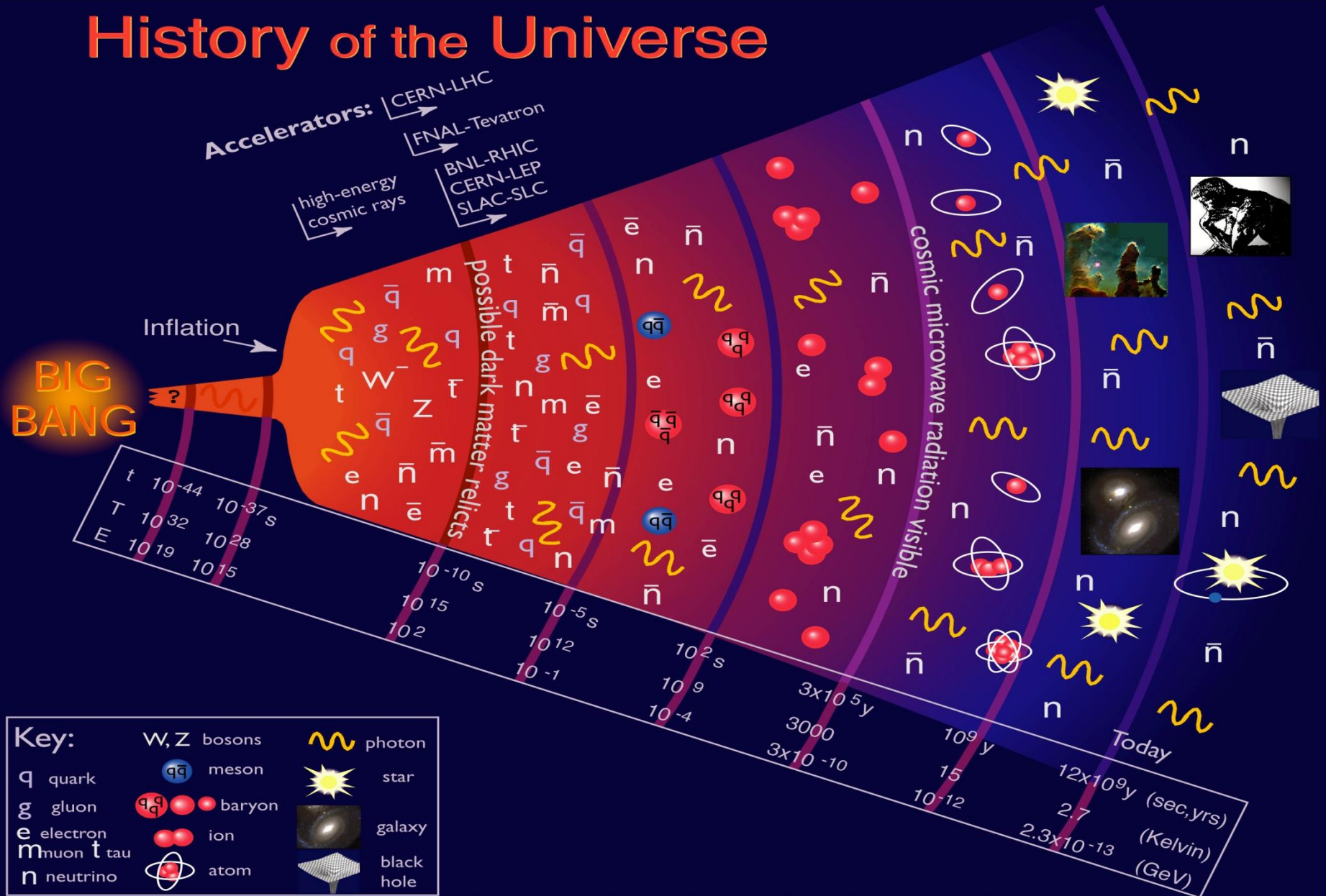
atoom: 1805
elektron: 1897

proton: 1919
neutron: 1932

quarks en leptonen:
1968 - 2008

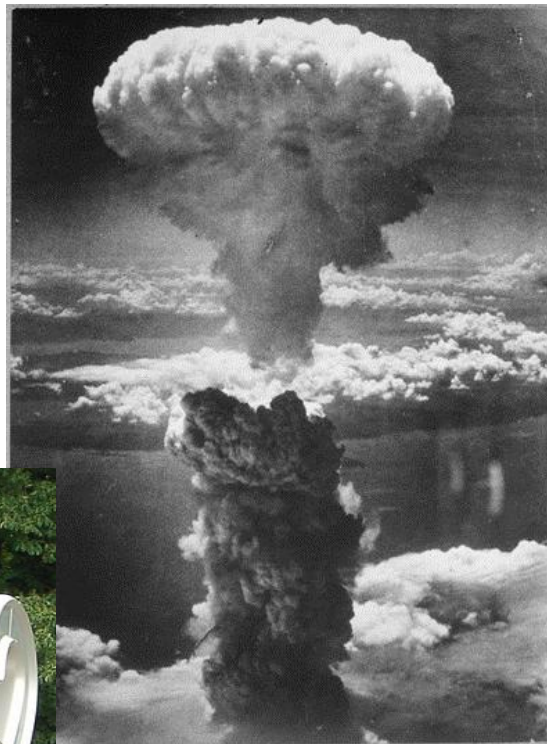
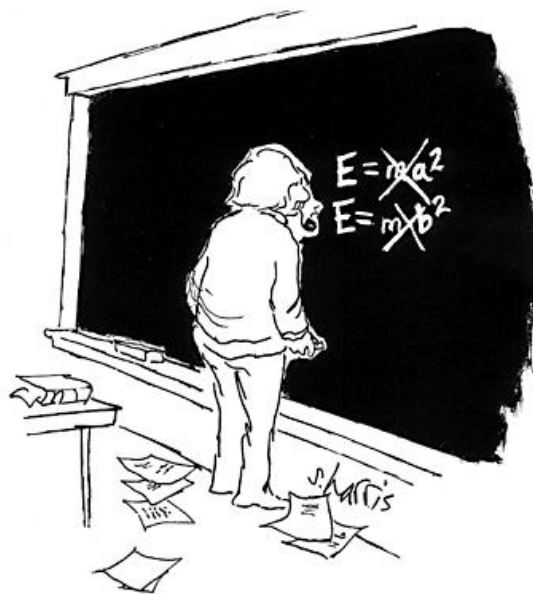


History of the Universe



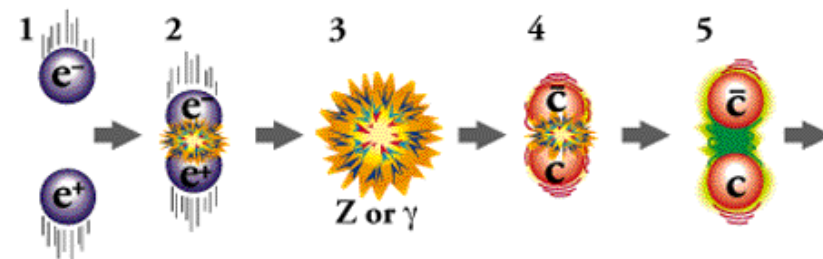


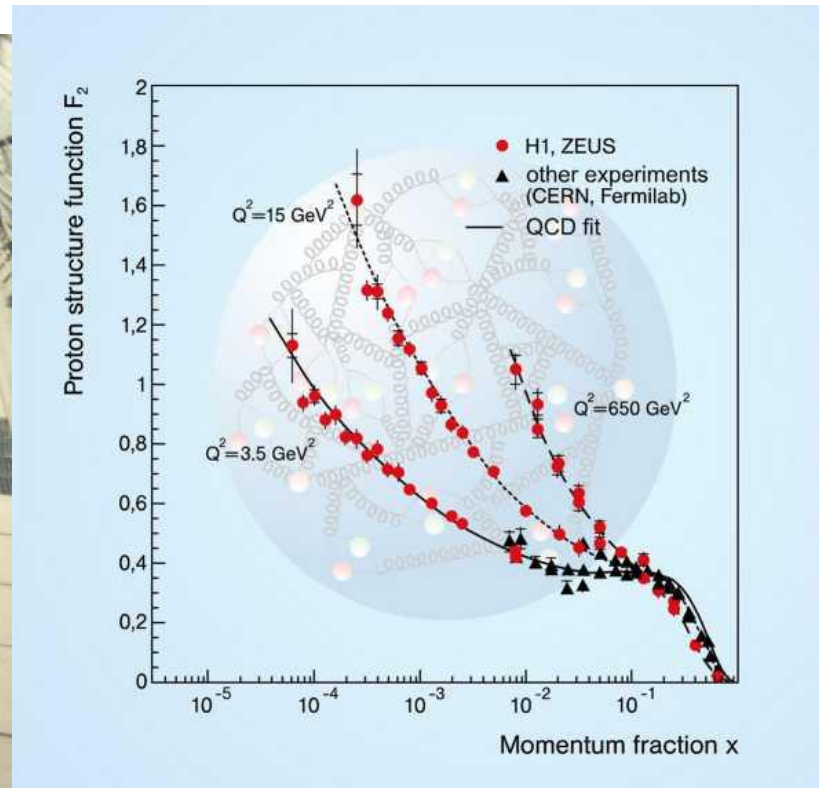
Energie en massa



- Materie is equivalent met energie
- 1 l water $\sim 10^{16}$ J
10,000,000,000,000,000 Joules=energie voor 1 Miljoen gezinnen in 1 jaar
- Men kan uit pure energie, massa produceren
- Uit pure energie kan nieuwe, exotische materie gemaakt worden

Annihilatie



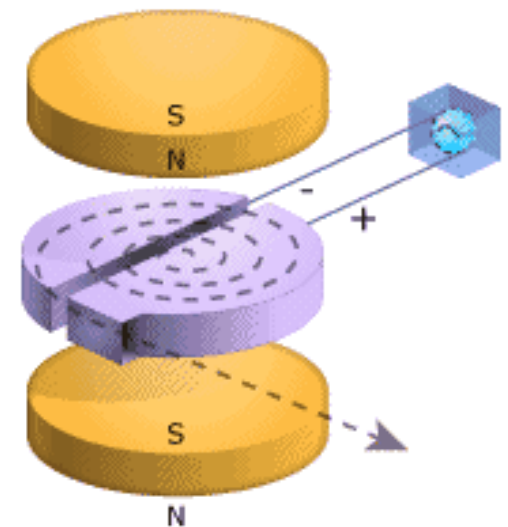
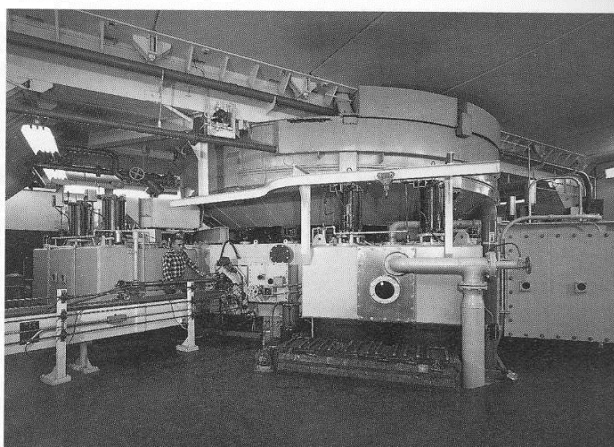
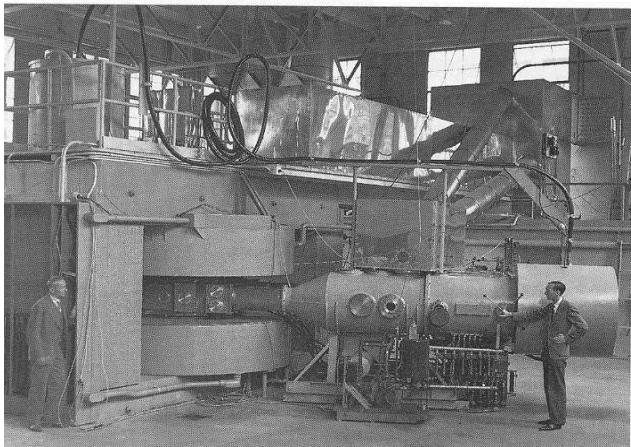
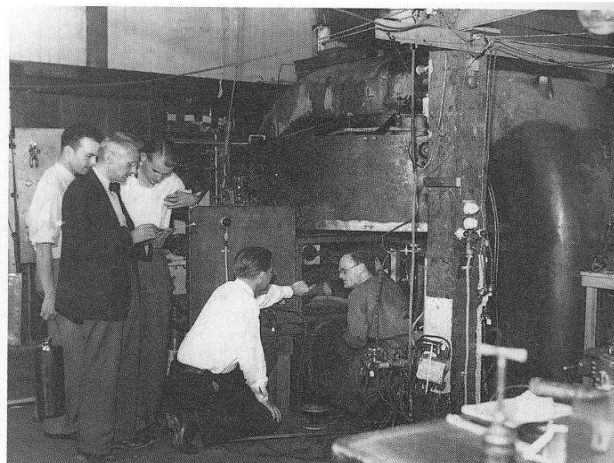
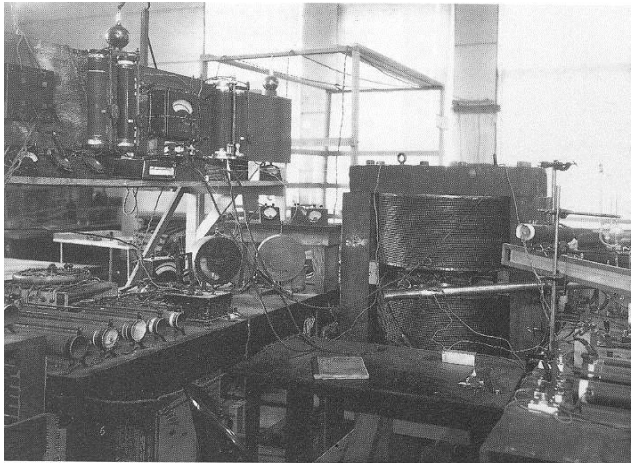


HERA versneller bij het Hamburgse deeltjeslab DESY was tot voor kort het meest krachtige

Rutherford experiment aller tijden.

Het proton blijkt een ongeloofelijk rijke structuur te hebben: een 'zee' van quarks en gluonen

- Cyclotrons: cirkelvormige versnellers die 1 bundel op vast doel schieten, Indien voldoende energie beschikbaar → Creatie van zware, onstabiele materie, bvb pi meson:





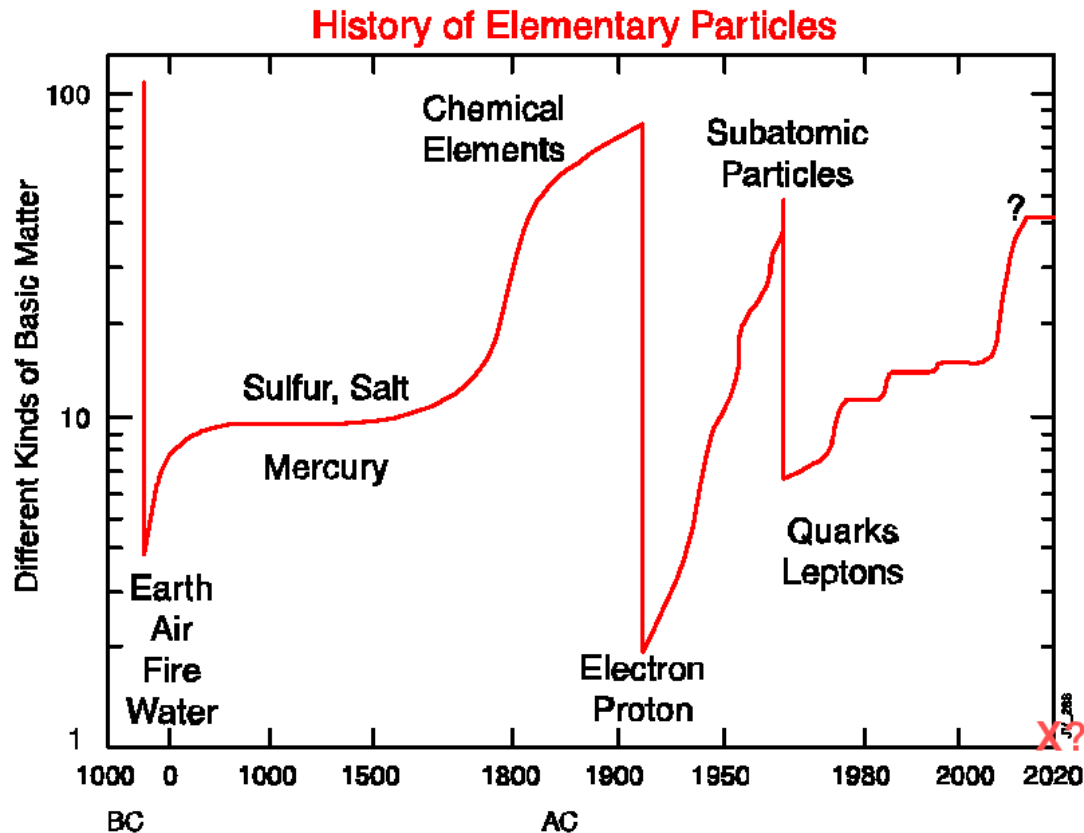
Cyclotrons in medische wereld

- Cyclotrons hebben hun beperkingen voor deeltjesfysica: Bundelenergie en intensiteit, botsen op vast doelwit (1 TeV bundel op vast doel geeft 0.04 TeV om nieuwe deeltjes te maken)
- Voor medische diagnostiek en therapie: isotopenproductie, zijn cyclotrons een zeer efficiënte, veilige en compacte oplossing



Belgisch bedrijf IBA in Louvain





- Na ontdekking van neutron (Chadwick) in 1932 en atoombomproject van WOII vindt er een wedrace van deeltjes-ontdekkingen plaats in versnellers wereldwijd in de 50's en 60's
- Wie heeft al deze deeltjes besteld!
- Op hetzelfde moment zitten een aantal theoretici behoorlijk aan de kwantumtheorie te sleutelen



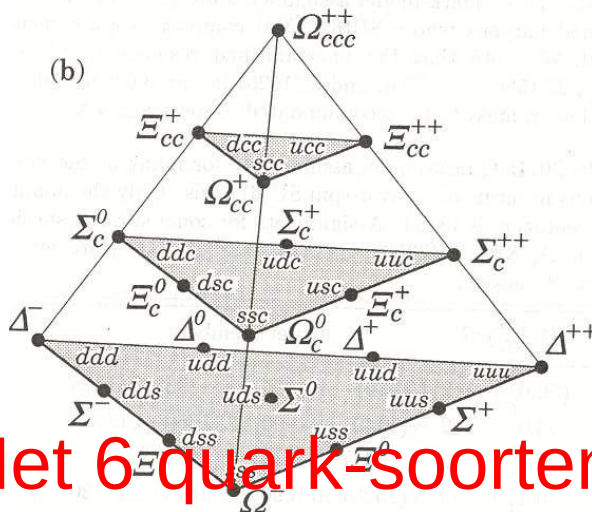
Hadronen



BARYON

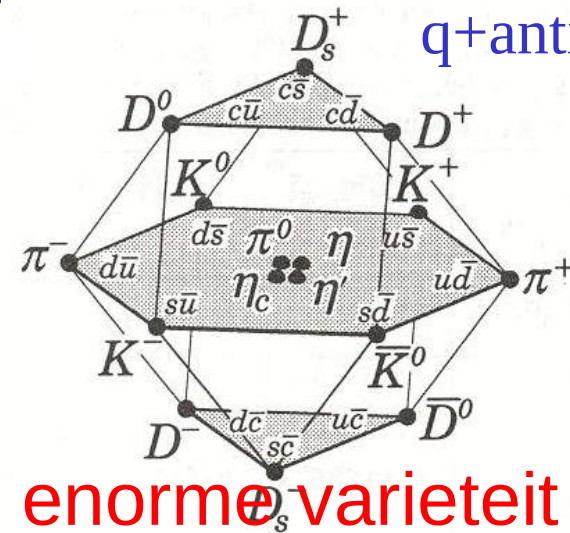
- Hadronen zijn opgebouwd uit quarks
- Quarks hebben een elektrische lading en een kleur lading (rgb)
- **Postulaat:** Alleen “witte” deeltjes komen vrij voor in de natuur: combinaties van quarks

Quarks komen niet vrij voor.



MESON

$q + \text{anti-}q$

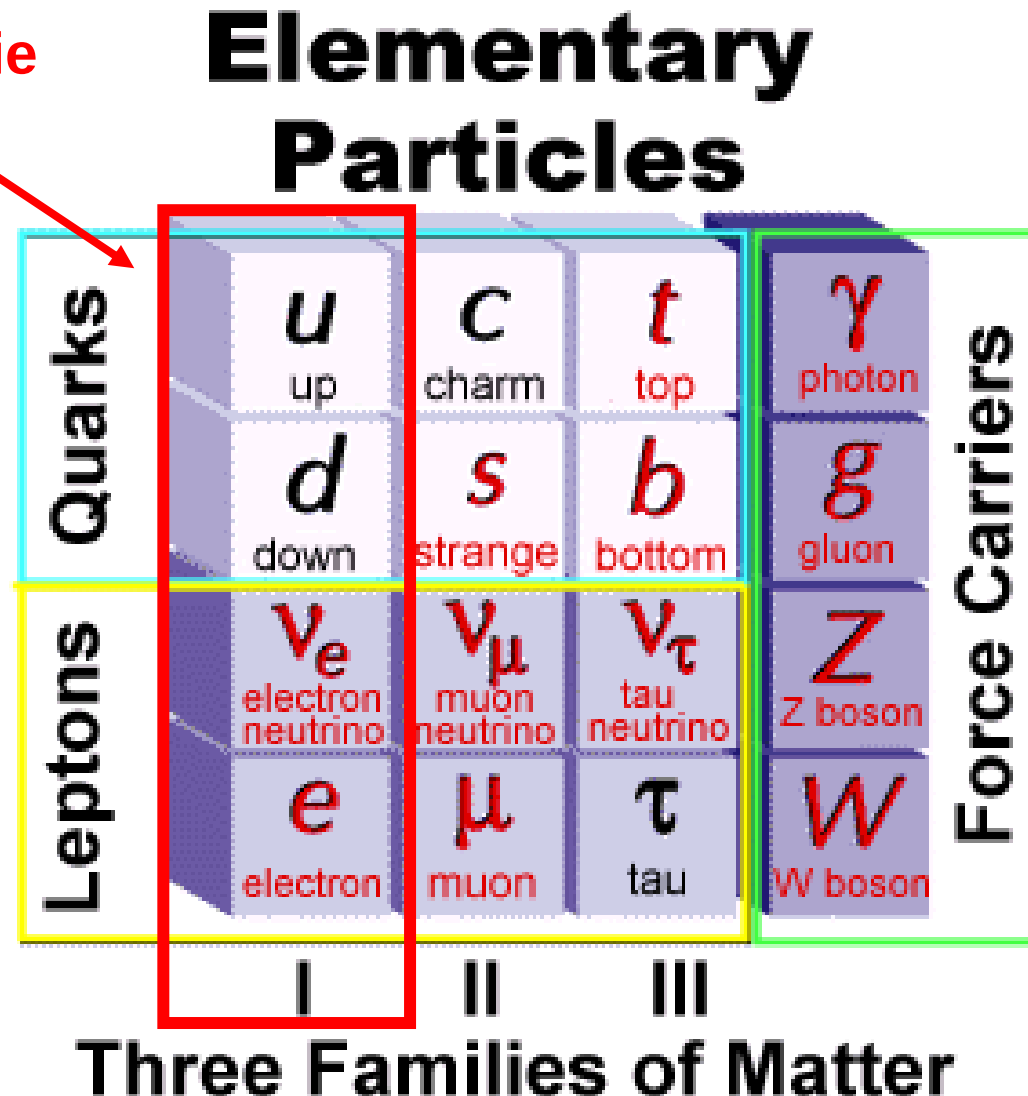


Met 6 quark-soorten kan een enorme variëteit aan deeltjes worden “opgebouwd” (voorbeelden)



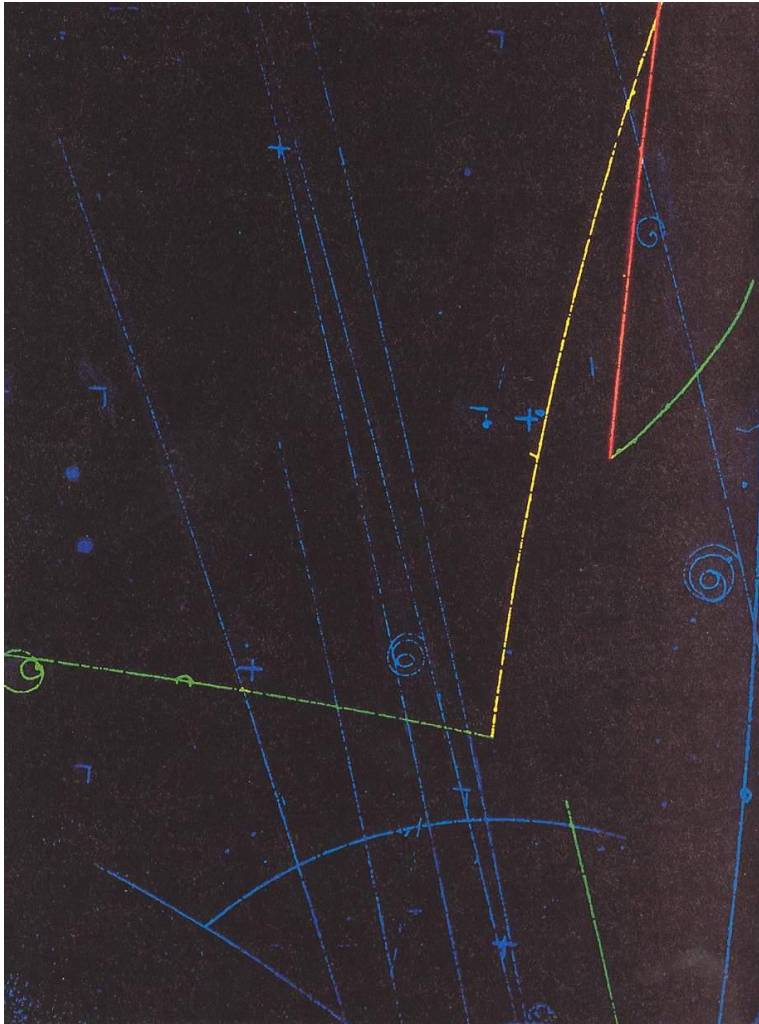
Huidige elementaire deeltjes

Stabiele materie





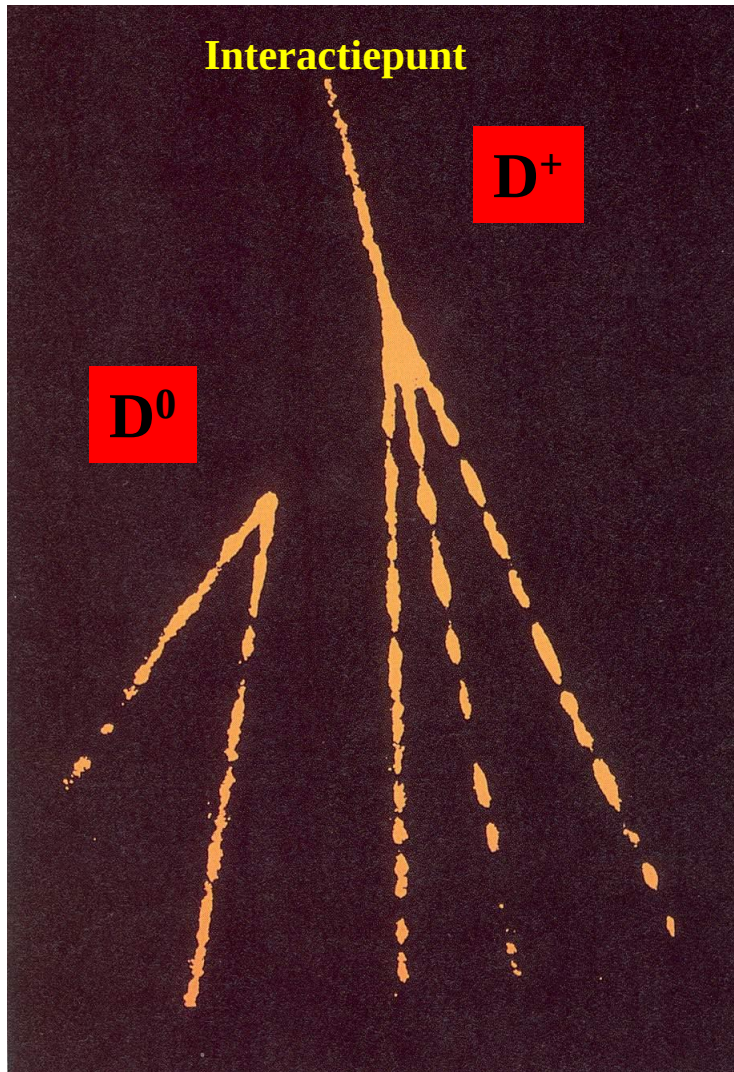
Deeltjes met 'vreemdheid' (S)



π^-

$$\pi^- p \rightarrow \Lambda + K^0 + \dots$$

- Paar-productie van zg. vreemde deeltjes
- 2 deeltjes met vreemdheid $S=0$ (π , p) botsen en vormen een Λ ($S=-1$) en een kaon ($S=1$)

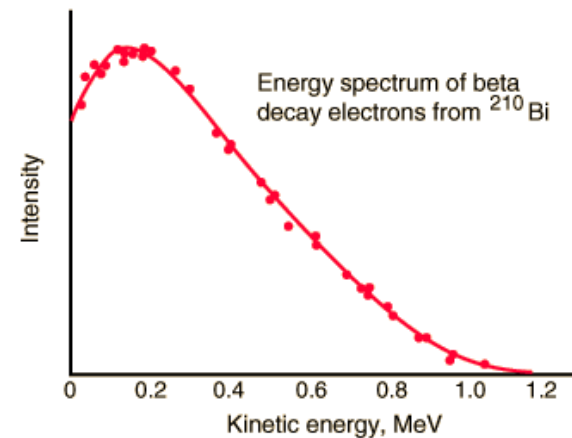
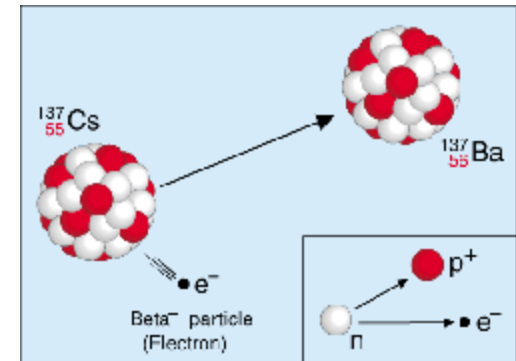


$$\gamma p \rightarrow D^0 D^+ + \dots$$

- Hoge resolutie bellenvat
- Afstand tussen bellen 200 micron
- Foton botst met proton
- Productie van deeltjes met 'charm' en 'anti-charm'
- Ene vervalt in 2, andere in 3 geladen deeltjes (+ eventueel nog ongeladen deeltjes)

Het kraken van het atoom

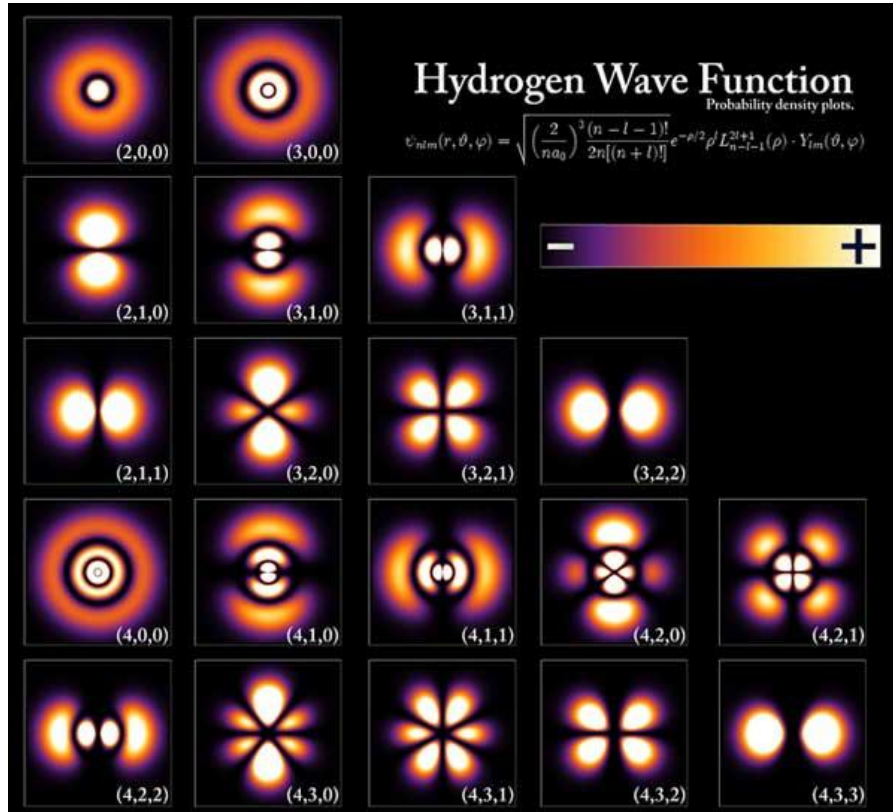
- ~1900: Bequerel en Curie ontdekken radio actieve elementen en ioniserende straling
- 1911 Rutherford ondekt de atoomkern
- 1932 Chadwick en het neutron
- 1938 Hahn en Meitner: kernsplijting
- Fermi theorie voor zwakke kernkracht: beta verval



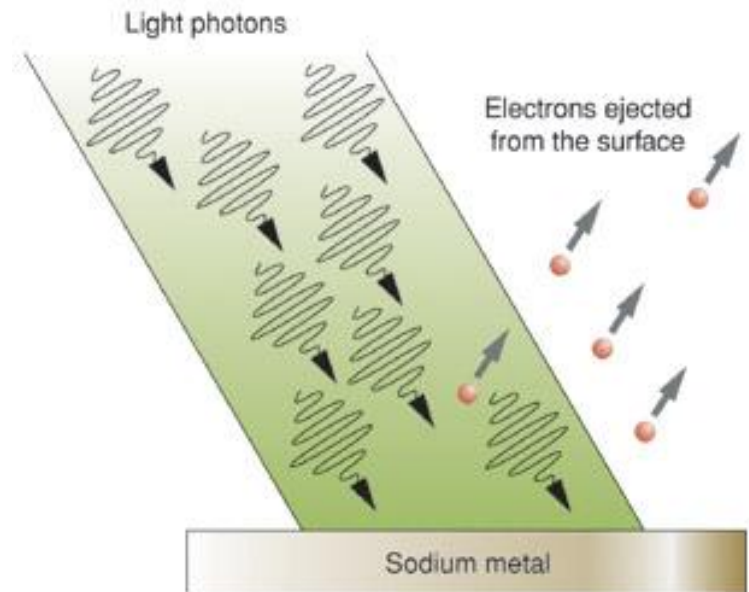


Deeltjes en golven

Lokaliteit anders bekeken



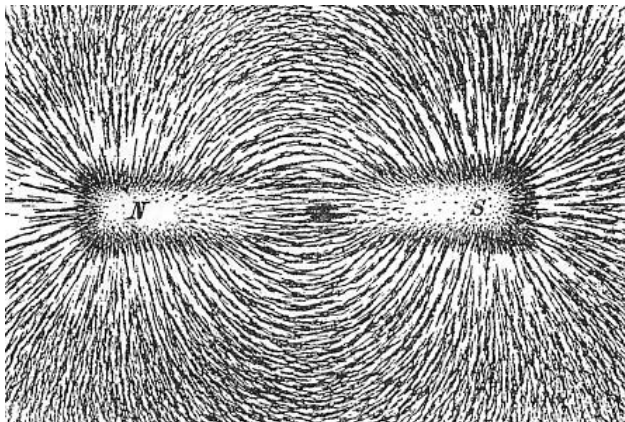
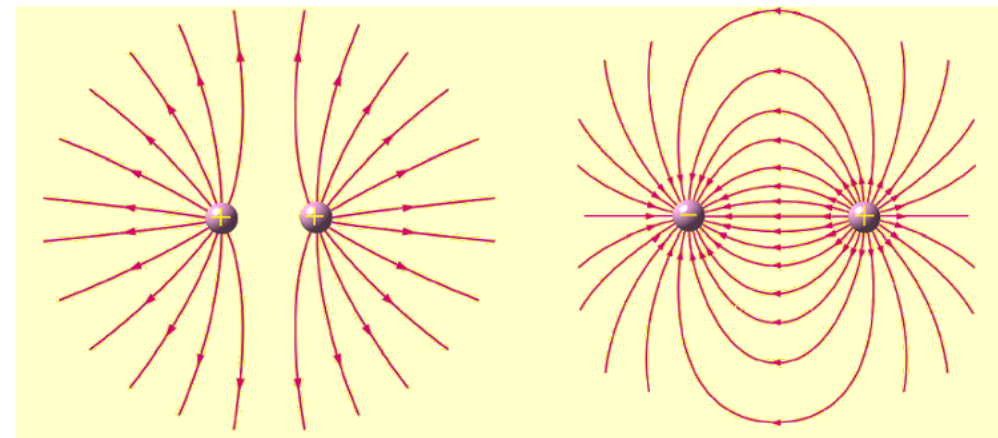
Golven hebben ook deeltjes karakter



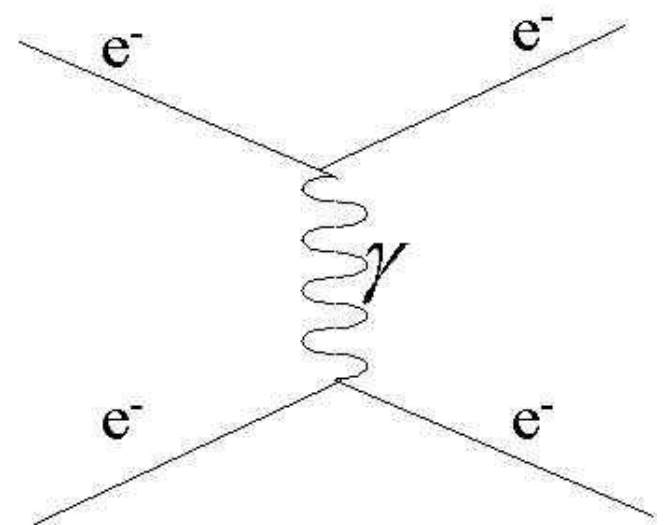


De theorie der velden

Klassieke velden



Quantum velden



Feynman Diagram

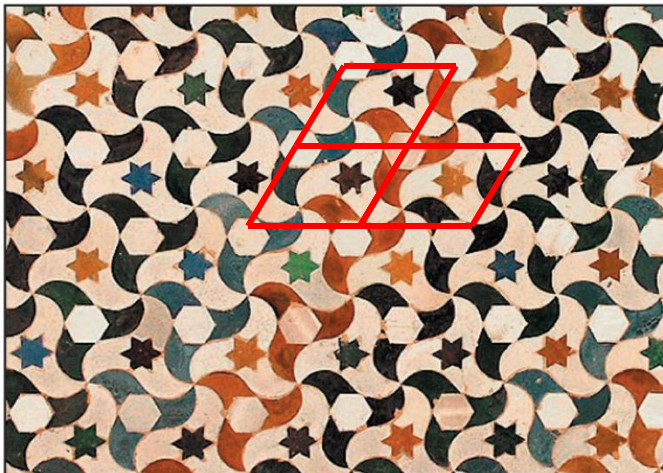


Symmetrie in de natuur

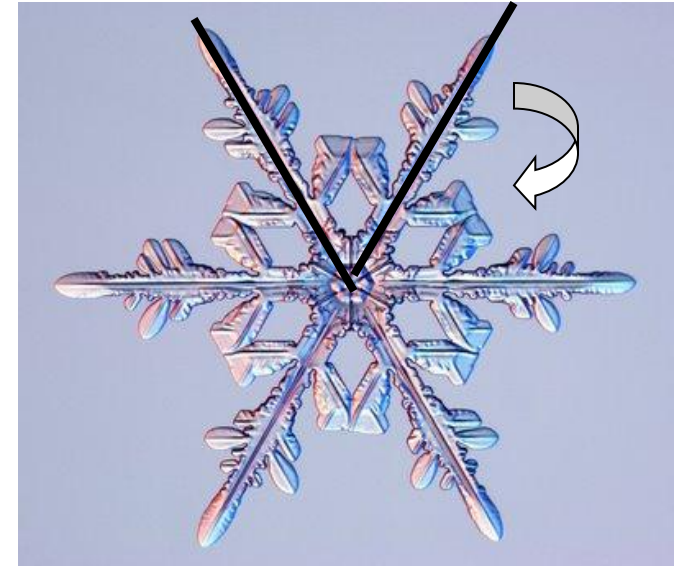
Spiegelsymmetrie (pariteit)



Translatiesymmetrie



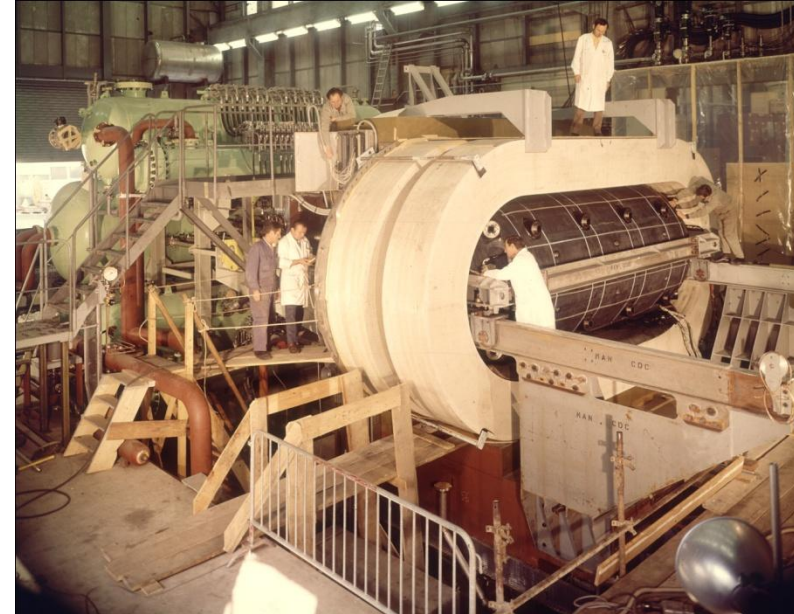
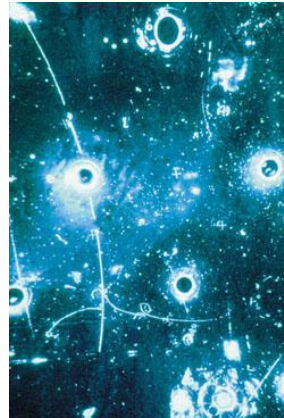
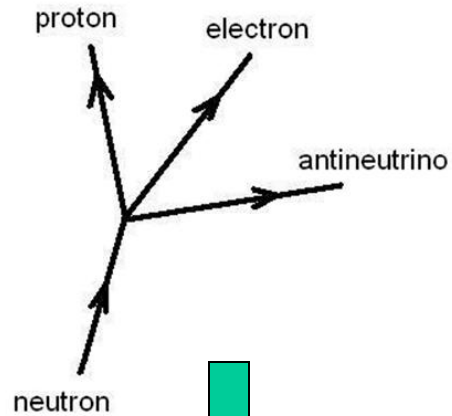
Rotatie symmetrie



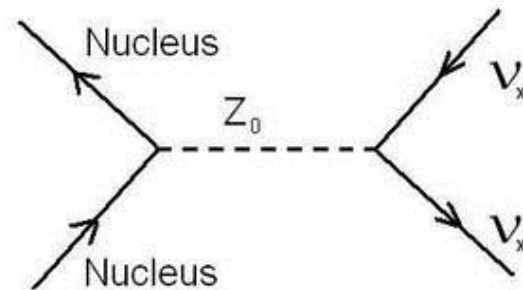
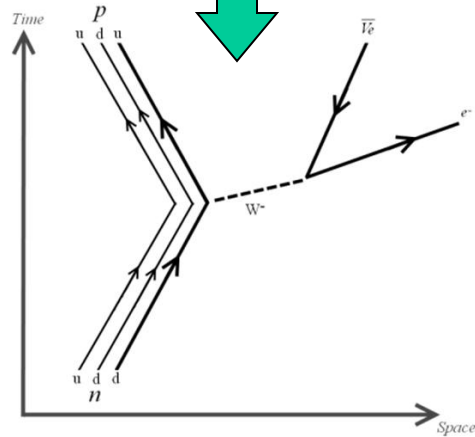
- Invariantie van wetten onder symmetrie transformaties
- Symmetrie en behouden grootheden: theorema van Noether
- Continu en discreet
- Interne (kwantum) symmetrie
- Invoeren van symmetrie leidt tot voorspelling van nieuwe deeltjes !!



De zwakke kernkracht



Glashow, Weinberg
1968





De Sterke Kernkracht

- Zware kernen bevatten veel protonen: positieve ladingen die elkaar afstoten
- Een kracht moet die elektrostatische afstoting tegenwerken: sterke kernkracht (100x sterker dan elektrostatische kracht tussen protonen)
- Observatie van symmetrie in nieuw geproduceerde deeltjes: er moeten 3 nieuwe soort ladingen bestaan die onderhevig zijn aan de sterke kernkracht
- Nucleaire bindingsenergie verklaard adh fundamenteel principe: QCD



Unificatie: het Standaard Model

Rond 1966-'71 volgt de grote synthese door Weinberg, Glashow en Salam

Met essentiële hulp van Brout-Englert-Higgs, 't Hooft en Veltman

Leptons

Electric Charge

Tau	-1	0	Tau Neutrino
Muon	-1	0	Muon Neutrino
Electron	-1	0	Electron Neutrino

Strong

Gluons (8)

Quarks

Mesons Baryons

Nuclei

Electromagnetic

Photon

Atoms
Light
Chemistry
Electronics

Quarks

Electric Charge

Bottom	-1/3	2/3	Top
Strange	-1/3	2/3	Charm
Down	-1/3	2/3	Up

each quark: R , B , G 3 colours

Gravitational

Graviton ?

Solar system
Galaxies
Black holes

Weak

Bosons (W,Z)

Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun

Massa

photon	0
gluon	0
W	80 GeV
Z	91 GeV
G	0

proton ~ 1 GeV

dracht van de kracht is ~ 1/massa

The particle drawings are simple artistic representations

Laatste materie stukje: ontdekt in 1995: zo zwaar als goud atoom

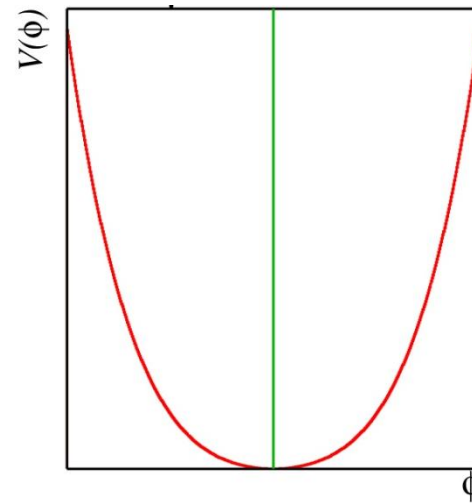


Het Higgs veld

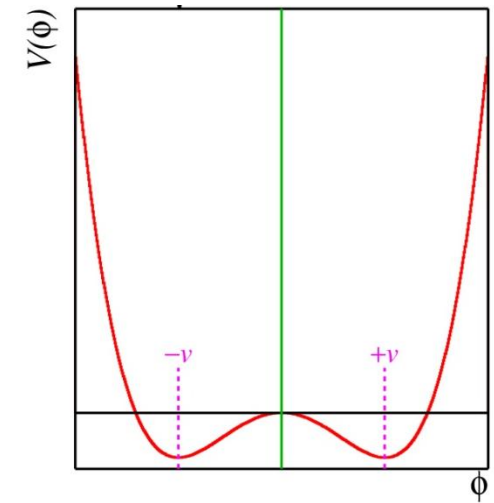
Spontane symmetrie breking



Standaard veld

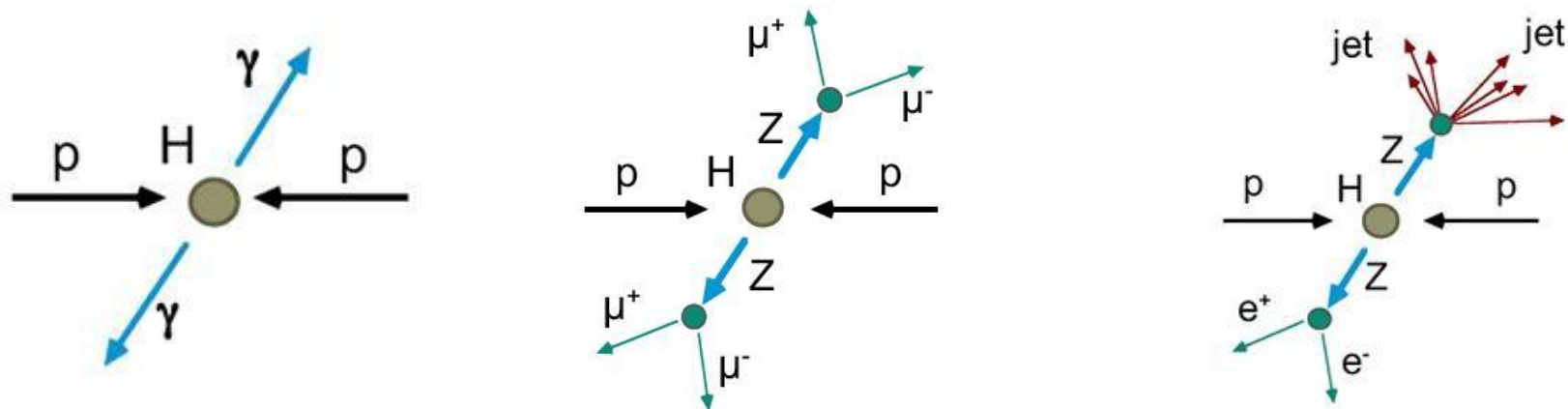


Higgs veld

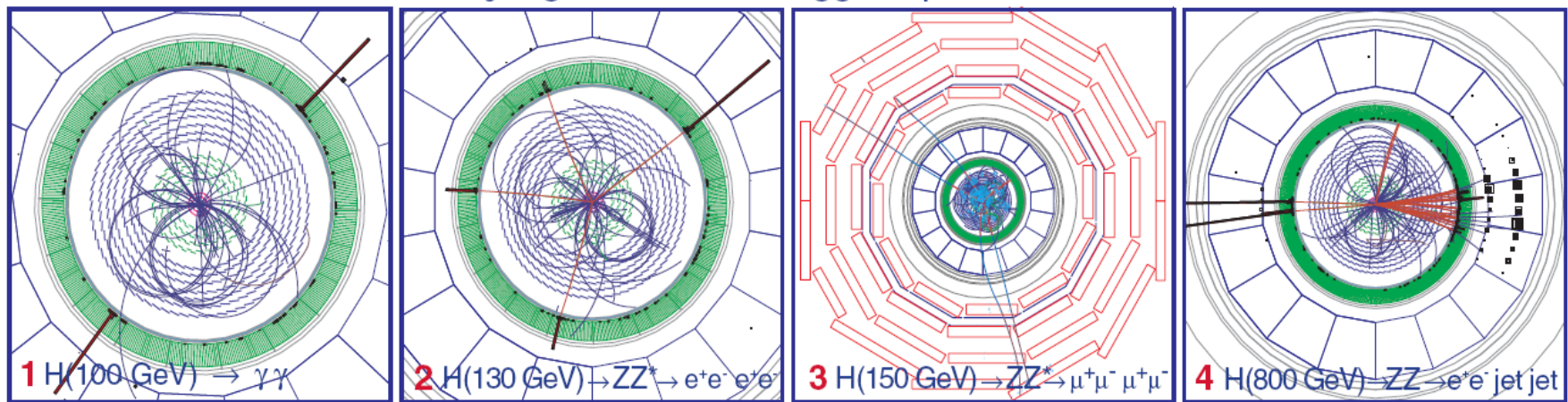


Het vacuum is doordrongen met een veld: het Higgs veld

Deeltjes krijgen massa door interactie met dit veld



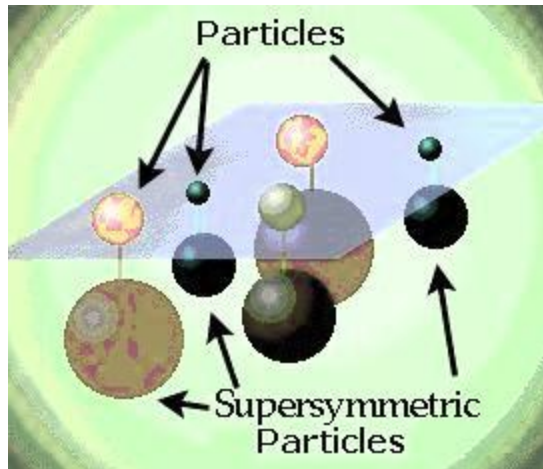
The decay signature of the Higgs depends on its mass:



- Oorspronkelijk massaloze krachtdragers: Higgs mechanisme brengt redding, maar Higgs boson nog niet geobserveerd
- Het standaardmodel is ontoereikend bij energieën boven de 1 TeV
- Het aantal vrije parameters is groot en wijst op onderliggende eenvoud
- De Zwaartekracht is niet geunificeerd met de andere natuurkrachten
- Hoe verklaart men het ogenschijnlijk structuurloos massa-patroon van de leptonen en quarks ?

Nog meer symmetrie: Supersymmetrie

- Spelen met quantumsymmetrie: spin
- Wissel alle deeltjes met halftallige spin om met deeltjes met heeltallige spin: SUPERSYMMETRIE



Supersymmetrie voorspelt weer nieuwe deeltjes en is een uitbreiding van de huidige theorie.

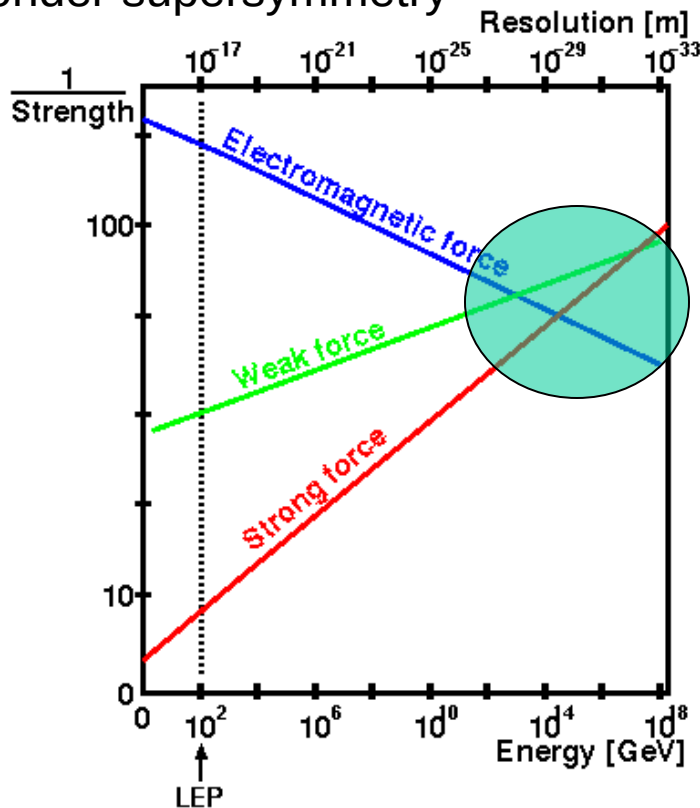
Indien we zwaartekracht met alle andere krachten willen verenigen is supersymmetrie een onmisbaar ingrediënt.



Nog diepere implicaties

Sterkte van de natuurkrachten verandert met toenemende energie

Zonder supersymmetry

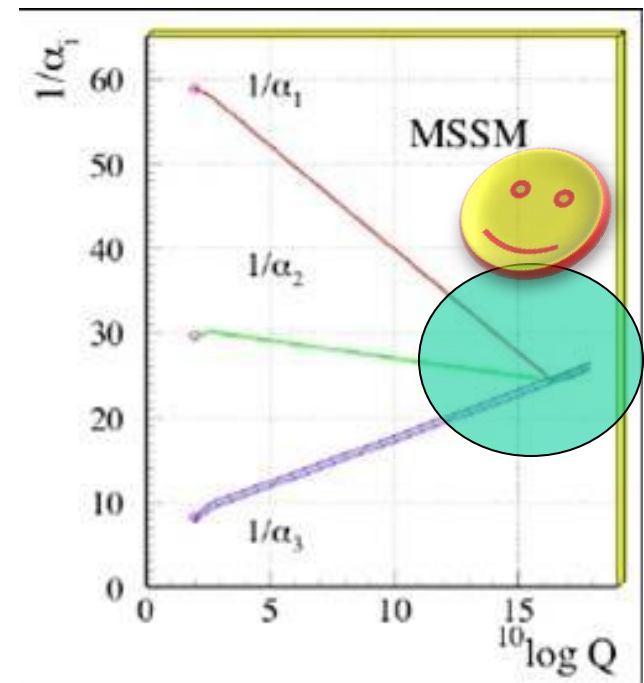


Geen unificatie



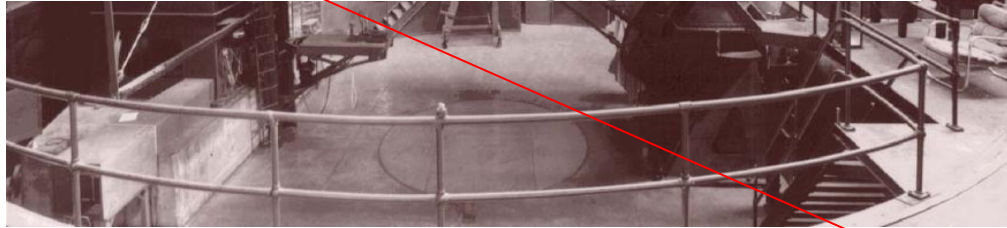
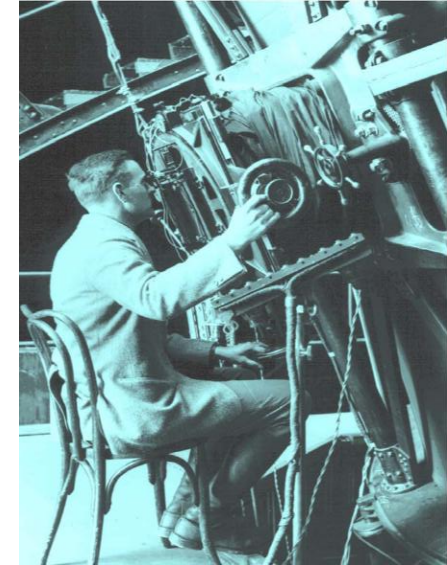
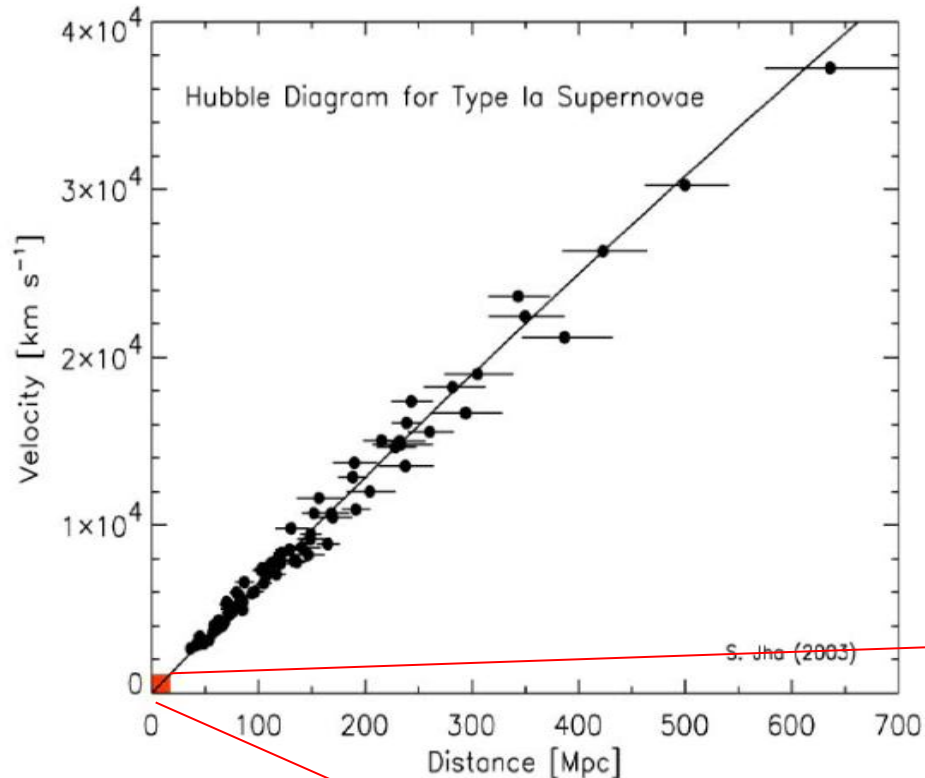
Met supersymmetry

Well unificatie!

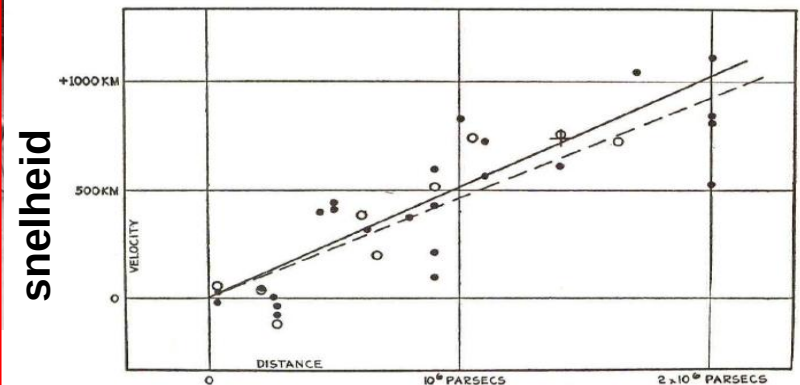


Leeftijd van het universum

- 1929: E. Hubble meet snelheid van sterrenstelsels en stelt de uitdijing van het



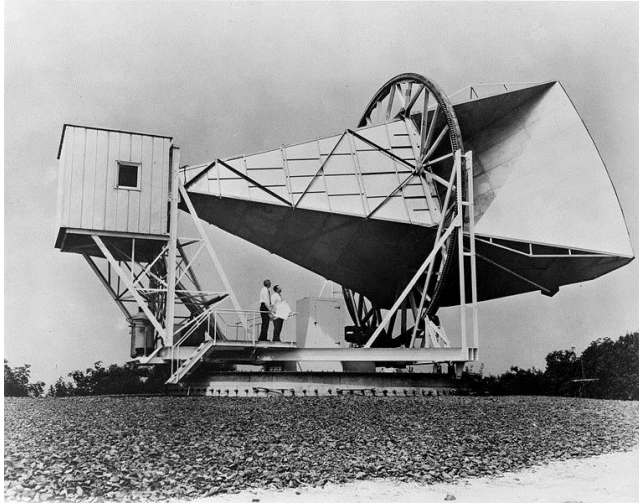
100 inch Mount Wilson



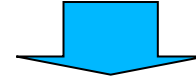
afstand

Cosmische achtergrondstraling

- 1965: Penzias & Wilson ontdekken de Cosmische achtergrondstraling

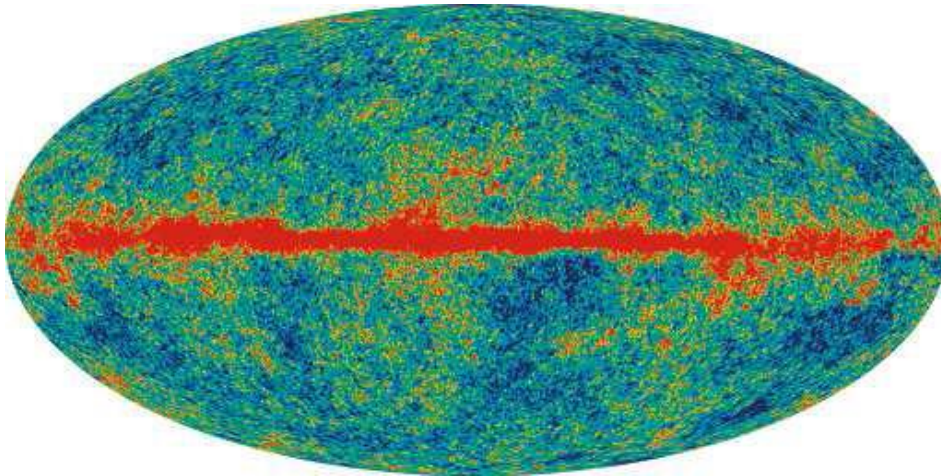


Isotroop verdeeld en temperatuur van een drietal Kelvin

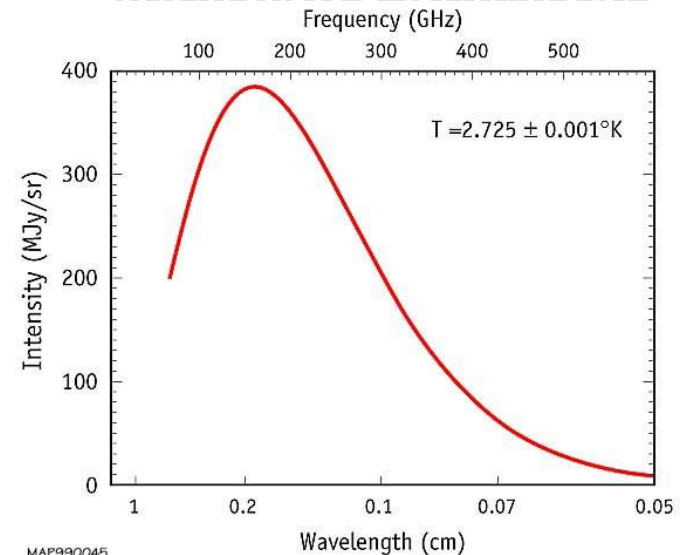


In 1990: COBE satelliet meet een perfect zwart lichaam spectrum met Temperatuur = 2.7 Kelvin

2001: opvolger WMAP meet zeer nauwkeurig de intensiteitsfluctuaties en bevestigt het idee van inflatie en vroege structuurvorming van het universum.



SPECTRUM OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND



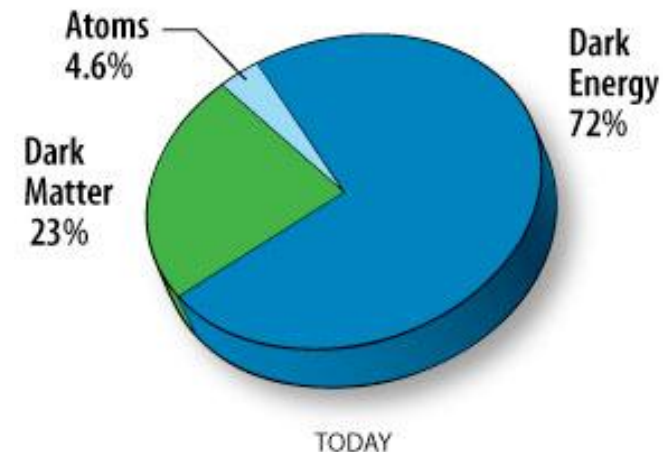
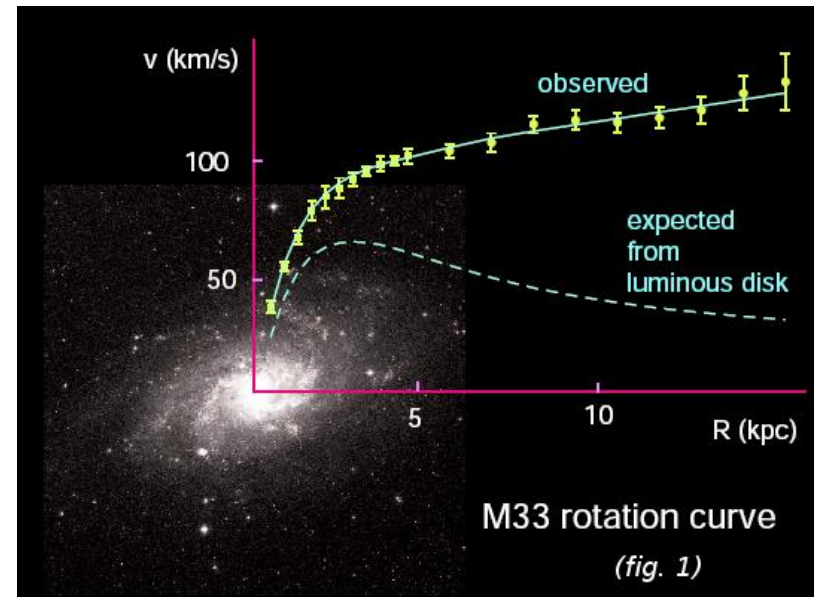
- Vera Rubin: Rotatiesnelheid van sterrenstelsels is niet compatibel met de 'zichtbare' aanwezige massa₁₉₃₃
- Fritz Zwicky kwam tot gelijkaardige conclusie door studie van de coma cluster

Bestaan van donkere materie is een feit

- 1998: High-z en supernova cosmology project team meten een versnelde uitdijing van het heelal
- 2001: WMAP meet de energiedichtheid van het heelal en wijst op vlak universum

Bestaan van donkere energie is een feit

Triomf voor de moderne cosmologie, maar zeer groot probleem voor de deeltjesfysica:
Donkere materie en donkere energie





LHC Missie

- Tests van het Standaard model van elementaire deeltjes bij allerhoogste energieën
- Ontdekken of weerleggen van het Higgs boson
- Ontdekken van een of meerdere supersymmetrische deeltjes
- Tests voor het bestaan van extra ruimtelijke dimensies

CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2009-Dec-11 09:15:57.325450 GMT
Run: 123987
Event: 3898103
Lumi section: 10
Orbit: 10350441
Crossing: 151



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2009-Dec-11 09:15:57.325450 GMT
Run: 123987
Event: 3898103
Lumi section: 10
Orbit: 10350441
Crossing: 151



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2009-Dec-11 09:15:57.325450 GMT
Run: 123987
Event: 3898103
Lumi section: 10
Orbit: 10350441
Crossing: 151

- Muon reconstruction
 - ▣ Segments in muon chamber(s) matched to tracks.

© CERN 2009. All rights reserved.