

DEELTJES FYSICA

7

H1 Geschiedenis

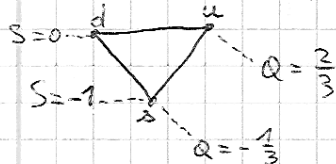
KLASSIEK	1897	Thomson: ontdekt e^- : bruijt of in magnetveld met grote straal → veel lichter dan ion. → deeltje atoom (pluims in a pudding)
	~ 1911	Rutherford: scattering v. α -deeltjes op "protonen" p^+ : kleine, zware, positieve kern van 1H
	1914	Bohr model. Volgend nivo's atoom (He): $2 \times$ lading maar $4 \times$ massa!?
	1932	Chadwick ontdekt ladingsloos n^0 : probleem solved!
FOTON	1900	Planck's blackbody spectrum: UV-catastrofe v/d statistische mechanica opgelost met gekwantiseerde straling: $E = h\nu = \hbar\omega$
	1905	Einstein's foto-elektrisch effect: e^- -energie onafhankelijk v/d intensiteit v/h licht; wel oph. v/d klein = frequentie. (e.m. veld zelf is gekwantiseerd!)
	1923	Compton scattert licht op een e^- : moet wel een deeltje zijn: foton γ of subatomaire straal
MESONEN PION/MUON		Wat houdt de kern samen? → Strong force. Moet wel vrom een te schakel zijn want wij zien enkel e.m. → zware mediator. (Yukawa)
	1946	Yukawa's deeltje ontdekt? - te lange levensduur - te weinig interactie met kern
	1947	Bowen: 2 mesonen: Yukawa's π pion en een imposter muon μ π ontdekt in fotografische emulsie blootgesteld aan kosmische straling → foto met hoek van 30° ...
ANTI	1927	Dirac's vergelijking → negatieve E? (Dirac see)
	1931	Anderson ontdekt positron e^+ in nevelkamer → antideeltjes sommigen zijn eigen antideeltje: Majorana particles bij
NEUTRINO'S	1930	Vreemde two-body experimenten waarbij E_2 -voet moest liggen maar dat toch niet was. → een licht, neutraal neutrino ν gowit met de energie lopen. → verklaring foto met hoek van 30° (3-body-decay)
	~ 1953	Is ν een Majorana? → velle experiment met antideeltje nabeen $\bar{\nu}$ gewoon deeltje: gebeurt <u>niet</u> . Behoud v. Leptongetal onoverbreikbaar ν van $\bar{\nu}$.
	~ 1960	$\mu \rightarrow e^- + \gamma$ zou mogelijk moeten zijn maar gebeurt niet. → Behoud van muongetal en elektrongetal opant!
STRANGE	1938	Waarom is het proton stabiel? overleiding tot behoud van Baryongetal
	~ 1947	Veel nieuwe mesonen en baryonen ontdekt: moeilijke te produceren (vise sterke interactie), maar velle vervol (vise zwakke interactie) → Strange particles, met behoud v. Strangeness in sterke, maar niet in zwakke processen. Strange particles worden onverwacht; onnodig voor huidige theorieën; ze worden altijd geproduceerd in paren ($S_1 = -S_2$).

1961 Gell-Mann's Eightfold Way: classificatie v/d deeltjes in geometrische figuren: octet, decuplet, supermultipletten, ... baryon en meson octet, baryon decuplet.

1964 Ontdekking Σ^- -deeltje, zoals voorspeld door Eightfold Way.

En diagrammen hebben alle deeltjes dezelfde spin! * = excited state

1964 Waarom moet alles zo mooi in geometrische figuren? $\rightarrow$ Quark Model
Alle hadronen (= baryonen en mesonen) bestaan uit quarks met $S = \frac{1}{2}$ en $B = \frac{1}{3}$



baryon = 3 quarks (3 flavors)

meson = 1 quark, 1 antiquark.

$\rightarrow$ multipletten opgebouwd uit quark driehoeken.

Isospin: deeltjes met n'leefde massa, maar verschillende lading totale I , en component I_3 . Isospin volgens IJF als de Strongness.
Hogere totale I : excitatie! bv: Δ^+ ($I=3/2, I_3=1/2$) excitatie van p^+ ($I=1/2, I_3=1/2$)

$3^2 = 9 \rightarrow$ meson octet moet eigenlijk nonet zijn! (voorheen was Baryon octet is ook vreemd... ook: gedeëxciteerd η' en singlet)
decuplet met hoeken eraf en escher deeltje in midden.

~ 1970 diep inelastische scattering: verstrooiing ovm protonen: normaal verwacht je lineaire afname v/d verstrooiing t.f.v. de hoek, maar dit was niet zo.
 $\rightarrow$ interne structuur i.z.v. kernonen $\rightarrow$ 3 kernonen $\rightarrow$ quarks!

1964 Volgens Rabi kom bv $\Sigma^- = sss$ niet bestaan
 $\rightarrow$ elke quark flavor komt voor in 3 kleuren (n.lading v/d sterke kracht)
red, green, blue
Alle deeltjes die wij zien zijn kleurloos (alle 3 kleuren, sommeerig, of kleur + antikleur)
 $\rightarrow$ deeltjes van 4 quarks bestaan niet.

Mediators voor quarks? Waarom komen quarks niet los voor?

1974 ontdekking J/ψ deeltje (neutraal, extreem smalle meson) met zeer lange levensduur. (November Revolution)

Verklaring adhv u^+ quark: charm c , dus $\psi = c\bar{c}$.
 $\rightarrow$ plausibel: nu hebben we 4 leptonen en 4 quarks.
(Glashow's symmetrie)

1975 ontdekking $\Lambda_c^+ = udc$ en $\Sigma_c^{++} = uuc$ die netto charm dragen
 $\rightarrow$ bevestiging charm, want ψ droeg geen netto charm.
multipletten met 4 quarks worden gevormd (3D nu)

1975 ontdekking τ -lepton, met zijn eigen ν_τ neutrino

1977 ontdekking bottom quark b , voorspelling 6^e quark

1995 bevestiging top quark t ; levensduur zo kort dat n geen baan stotes gevormd kunnen worden

1983 Mediators voor de weak force ontdekt: W^+, W^-, Z^0 .
Men kon op voorgrond de massa's niet voorspellen adhv het bereik v/d weak force, omdat men daar geen duidelijke aanwijzing voor had zoals bij de strong force (straal v/d atoomkern)

GLUONS

1979

eigenlijk $e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow q + \bar{q}$ reactie: je verwacht 2 jets back-to-back door de quarks die allerlei reacties beginnen, maar er zijn ook gevallen met 3 jets $\Rightarrow$ een vol quark straalde een gluon uit dat opnieuw een $q + \bar{q}$ paar creëerde.
gluonen dragen zelf kleur (er zijn er 8) en komen dus nooit alleen voor.

STANDARD MODEL

1978

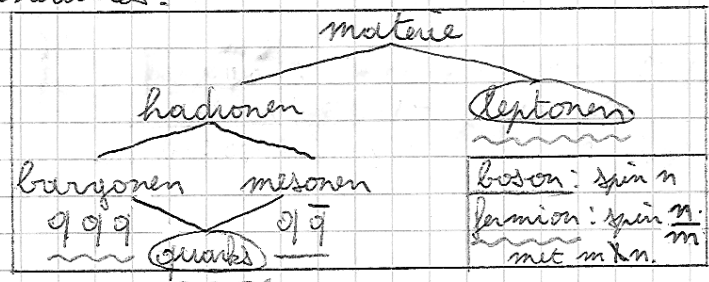
Standard model:

- 6 leptonen, 3 generaties
- 6 quarks, 3 generaties, 3 kleuren
- baryonen, mesonen bestaan uit quarks
- 3 fundamentele interacties met elk zijn mediator(s)
- antideeltjes

alle $q\bar{q}$ -paars

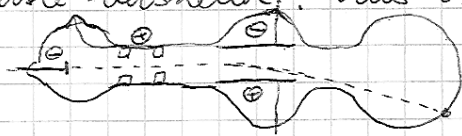
Er zijn niet meer dan 3 generaties quarks: het 2^o deeltje komt nl. tot alles vervullen, en zijn levensduur (die korter wordt naarmate het aantal mogelijke vervullingen komt overeen met 3 generaties).

- neutrino oscillaties
- CP violation
- Higgs partikel
- zwakke kracht?



H2 Deeltjesversnellers

eerste versneller: buis v. Crookes (gebruikt door Thomson)



Lineaire versnellers

Wolraë: laat deeltje door opeenvolgende stukjes cilinder op lage potential gaan, wanneer deeltje in een bepaalde cilinder zit, klapt je het teken vol lading om zo dat de potential hoog wordt en het deeltje versneld wordt richting volgende cilinder.

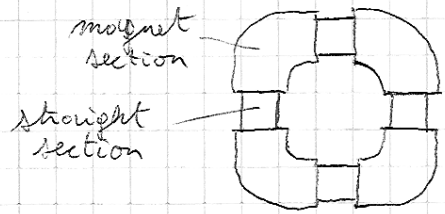
drift tube: potential V varieert nu niet plots, maar sinusoidaal. De driftsecties (~cilinders) worden telkens langer. Deeltje moet in interval $[t_v, t_{vmax}]$ opgepikt worden om stabiel versneld te kunnen worden (zie 582).

Circulaire versnellers

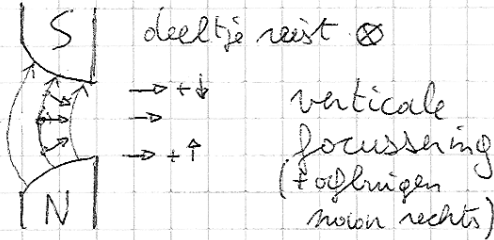
cyclotron: magnetisch veld $B \Rightarrow$ cirkelvormige baan. Deeltje versnelt bij binnen- en buitengaan v/d D , omdat de potential met vaste frequentie oscilleert. Zowel v als R stijgen: ω_c is constant! De extraction elektrode haalt het deeltje af op het maximale R en dus v bereikt zijn limiet niet-relativistisch ($\omega_c = \text{const}$): limiet 25 MeV ($\frac{v}{c} = 0,02$) anders rolt het deeltje uit fase met f_0 (want v daalt)



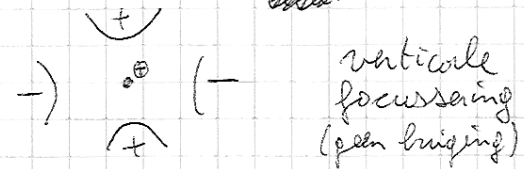
④
Synchrotron: vanwege de frequentie v/d versnellingspotentiaal zodat je relativistische effecten aan komt, en loopt B toenemen tijdens de versnelling zodat je baan cirkelrond wordt i.p.v. spiraal.
 → gepulste bundels



focussering:
 vervormde magneten:



tegenwoordig: quadrupool



Afwisselend horizontaal en verticaal focussen.

synchrotronstraling:

deeltjes in cirkulaire versnellers verliezen energie $\Delta E \sim \frac{1}{m^4}$

effect afgezwakt door grote straal R na omloop $\sim E^4$

vb.: LEP: $R = 4,2 \text{ km}$; $\Delta E = 260 \text{ MeV}$ bij $E = 55 \text{ GeV}$
 dit is ca. het maximum voor e^+e^- , anders is te veel rf-vermogen nodig om te compenseren.

Trefschijven vs colliding beams

trefschijf: energie beschikbaar t.o.v. massacentrum: $E' \sim \sqrt{E}$ bij hoge E

colliding beams: $E' = 2E \sim E'$

luminositeit en # interacties: typische botsingsdoorsnede $\sigma = 10^{-33} \text{ cm}^2 = 1 \text{ nb}$

trefschijf: $\sim 4 \times 10^{-4}$ interacties/s per nb cross-sectie

colliding beams: $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$ /s /nb; typische luminositeit: $L \sim 10^{30} - 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$

H3 Detectoren

volgorde: tracking, l.m., hadron, muon

deeltjes ontdekken → grote kans op events nodig

→ hadron colliders (produceren opvulke → jets)

deeltjes bestuderen → proper omgeving nodig

→ lepton colliders (geen quarks → geen jets)

Doelstellingen:

localiseren in de ruimte; indien magneetveld aanwezig ook $p = \frac{q r B}{c}$

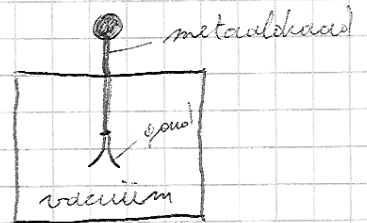
localiseren in de tijd: storend effect andere deeltjes uit de baan, TOF meting.

energie bepalen: uit energieverlies, met calorimeters, door snelheidsmeting via TOF (time of flight) of Čerenkovstraling.

deeltje identificeren: via massa (uit meting E en p of E en v), via vervol, via identificeer interactie met materie (type bepalen)

Elektrometer (eerste stralingsdetector)

- lading op metaalbuis doet goudfolie of draadjes uitwijken
- ionisatie van omgevingslucht doet de lading op de metaalbuis wegvlozen
- snelheid afhankelijk v/d hoeveelheid ionisatie $\rightarrow$ type en energie bepalen.



Fotografische emulsies (enkel nog gebruikt in dosimeters)

- ioniserend deeltje laat spoor na van ontwikkelbare AgBr-korrels
- studie v/d sporen (lijnen op foto) geeft massa, lading, en energie.

Nevelkamer (Wilsonvat)

- gas (lucht/Ar) verzadigd met waterdamp (of ethanol) wordt plaatselijk geïoniseerd door deeltje
- snijger zorgt voor expansie en dus afkoeling $\rightarrow$ druppelvorming rond de ionen die dienen als condensatiekernen.
- magnetveld: kromming geeft impuls en teken v/d lading.
- elektrisch veld: verwijdert ionen na de meting (enkele seconden)

Bellenvat

- vloeistof met onder kookpunt raakt overhit door drukvermindering (rusten)
- vorming v. bellen waan deeltjes hun energie hebben afgegeven via botsing; en daarna recombinatie en deëxcitatie $\rightarrow$ TT
- positieresolutie tot 0,1 mm; frequentie: 20-30 Hz

Scintillator

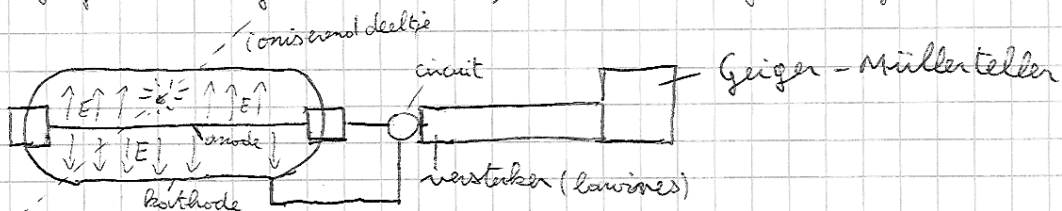
- deeltjes exciteren moleculen in scintillerende stof
- fotonen van luminescentie via lichtgeleider naar fotomultipliatorbuis en elektronisch telsysteem gebracht.
- snel (~ 1 ns), wordt vooral gebruikt in combi met tweede scintillator om TOF metingen te doen. Inzien ook μ bekend $\rightarrow$ massa bepalen

Vonkenkamer

- dunne metalen platen, afwisselend op dezelfde spanning, met gas tussen
- geladen deeltje dat door de platen beweegt veroorzaakt vonkontladingen die het gas lichtbaar maken.
- meestal in combi met scintillator; nauwkeurigheid: $\sim 0,15$; $\sim 0,3$ mm

Gas-ionisatie detector

- deeltje ioniseert gas in een buis
- ladingen worden afgevoerd via dunne draad (anode) en de wand (kathode)
- proportioneelteller - rietig systeem versterkt het signaal voor lawines van opvolgende ionisaties, tot het signaal verzadigd is
- Geigerteller registreert deze puls (die altijd een grote amplitude heeft)

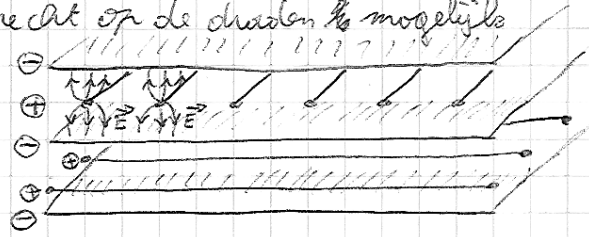


Draadenkamers

(6)

Multi-wire proportional chamber (MWPC)

- in principe verzameling proportioneeltellers waarbij bruisen vervangen zijn door evenwijdige platen (kathode) met daartussen parallelle teldraden.
- plaatsbepaling op de xis loodrecht op de draden is mogelijk ($\sim$ noordenbreedte, westenlengte)
- e^- veroorzaken signaal op de draden, positieve ionen worden naar de platen afgevoerd.
- combi 2 MWPC 90° gezamenlijk geeft plaatsbepaling in het vlak.

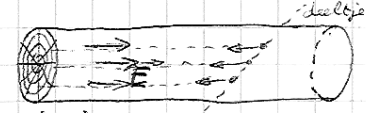


Drift chamber

- wire chamber waarbij de ruimte tussen de draden relatief groot gelaten wordt.
- deeltje komt binnen (snelheid $\gg$ drift elektronen) en kippert scintillator die de bldk stopt.
- potential op de draden wordt zo gevarieerd dat drift- e^- van geïoniseerde deeltjes met constante snelheid bewegen.
- tijd (na teldraad) stopt wanneer het signaal gemeten wordt $\rightarrow$ afstand tot plaats van ionisatie berekenen o.d.h.v. v_{drift} .
- wordt in de ruimte bepaald ($\sim 50 \mu\text{m}$)

Time projection chamber (TPC)

- deeltje ioniseert gas in cilinder na het triggeren van scintillator
- e^- wolk wordt door uniform $\vec{E}$ naar de eindplaten getrokken
- eindplaten registreren 2D-plaat (bv door MWPC) en tijd van elk e^- in de wolk $\rightarrow$ 3D-pad berekenen o.d.h.v. de projectie en reistijd.
- type deeltje bepalen o.d.h.v. aantal e^-

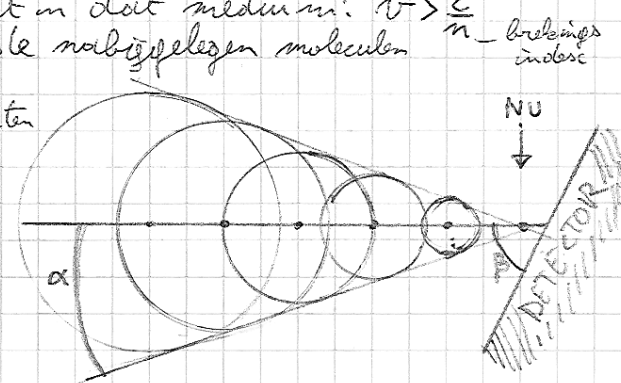


Silicon strip detector ($\sim$ pixel detector)

- pn-ge dopeerde strip Silicium met Aluminium elektroden.
- deeltje ioniseert Si-atoom: $e^- \rightarrow p$ -kant; $p^+ \rightarrow n$ -kant.
- signaal van de elektroden: plaatsbepaling tot op $10 \mu\text{m}$.
- goedkope strips (massaproductie); 1 defect is niet erg; maar zeer lange levensduur o.w.v. radioactiviteit.

Čerenkov-detector (vb: Super Kamiokande)

- geladen deeltje beweegt doorheen medium (vaak water) met snelheid groter dan die van licht in dat medium: $v > \frac{c}{n}$
- lading induceert dipoolmoment in de nabijgelegen moleculen en e^- -m. golven worden opgewekt.
- er ontstaat een kegel van golffronten met hoek $\sin \alpha = \frac{c}{nv} = \frac{v_0}{v}$
- op de detector worden ellipsen zichtbaar (cirkels als $\beta = 90^\circ$)
- de snelheid waarmee de diameters van de ellipsen groeien doorheen de verschillende momenta-normen, is omgekeerd evenredig met de snelheid v d'r deeltje.



Calorimeters ~~bolgoud, baksteen, beton, hout, ...~~

- detectie hoogenergetische deeltjes, die af hun energie verliezen in de calorimeter.
- energie bepaald door hoeveelheid energie te meten die doorleiding geeft tot ionisatie en excitatie
- neutrino's, muonen, ... worden niet gedetecteerd (zwakke interactie)

Elektromagnetische Calorimeters ($\sim$ proportioneel tellers)

- elektronen, fotonen. $\text{aantal} \sim \text{som v. alle rustmassa's} \sim E_{\text{init}}$
- e^- senden bremsstrahlung uit
- fotonen creëren e^+e^- paren en dragen E over op e^- via Compton-effect, zodat deze e^+ en e^- ook weer remstraling uitstralen
- lawinvorming tot e^+ en e^- genoeg E verloren hebben
- energie neemt af door remstraling met factor $1/e$ per stuk $\frac{d}{dx}$ materiaal met dichtheid $X_0 \sim 1/Z^2$ (radiation length), $E = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$
- $\rightarrow$ best materialen met hoge Z gebruiken v.b. lood.
- structuur: afwisselend lagen absorberend materiaal en detectoren (scintillator, thermistoren, ...)

Hadron Calorimeters

- deeltjes die via sterke kracht interageren (baryonen, mesonen)
- nucleon absorption length $\sim$ radiation length
- $\lambda_0 = \frac{A}{N_A \rho \sigma_{\text{I}}}$ met A = atoomnummer, ρ = dichtheid, σ_{I} = optische doorsnede
- veroorzaken kernreacties in staal, muon ook al in de e.m. calorimeter (zelfde lawinepincipe)

Eigenschappen van een goede detector: (7)

- het punt en momentum (en het teken v.d. lading) van (geladen) deeltjes bepalen
- in alle richtingen de energie van e^- , fotonen en hadronen bepalen
- e^- en μ^- want omvare geladen deeltjes onderscheiden
- naaltem welke geladen deeltjes in het punt v.d. botsing ontstaan zijn en welke niet (en dus uit vervol voortkomen)
- doornutigheid van ondetecteerbare deeltjes doingeven (behoud van momentum)
- snel genoeg 10-100 events/s kunnen filteren uit een miljoen omvare, en die informatie nauwkeu en opslaan.
- gedurende lange tijd en betrouwbaar functioneren in een radioactieve omgeving.