

NIKHEF en CERN

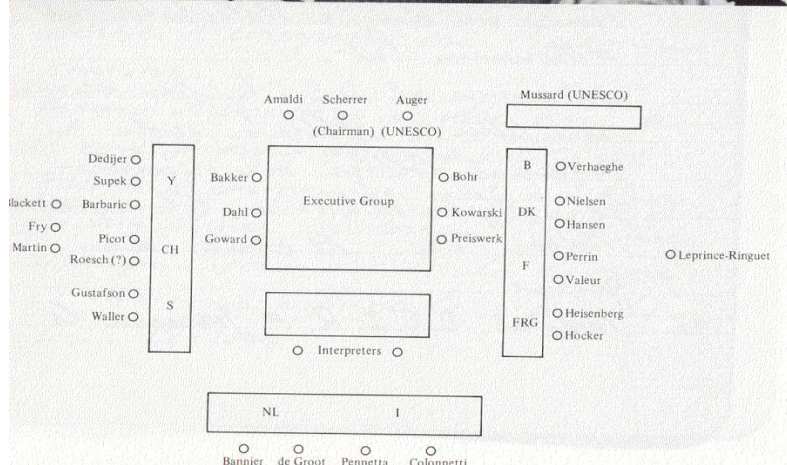
De ontwikkeling van de Hoge Energie Fysica in Nederland.

H.G. Tiecke (NIKHEF)

November 2004

In oktober 2004 heeft CERN, het Europees centrum voor deeltjesonderzoek in Genève, het 50 jarig bestaan gevierd. Kort na de tweede wereldoorlog is in Europa een discussie op gang gekomen om de krachten te bundelen met betrekking tot het onderzoek in het nieuwe vakgebied van de elementaire deeltjes. Het is geen eenvoudige opgave geweest het wederzijds wantrouwen te overwinnen en nationale belangen opzij te zetten om een Europees instituut te vormen waar het onderzoek kon concurreren met de Amerikaanse inspanning op dit gebied, waar inmiddels een aardige voorsprong was opgebouwd. Een gedetailleerd verslag van deze besprekingen en welke gerenommeerde fysici hier het voortouw hebben genomen is gegeven in [1].

In oktober 1954 wordt een verdrag geratificeerd waarmee het CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire, een feit is geworden. Twaalf landen, waaronder Nederland, hebben de oprichting mogelijk gemaakt.



Voorlopige CERN council in vergadering bijeen, Amsterdam, oktober 1952

Nu, 50 jaar later, weten we dat CERN een fantastisch succes is. Twintig Europese landen hebben inmiddels de officiële lid status, maar landen over de hele wereld dragen bij aan het onderzoekprogramma en maken er deel van uit.

Hoe heeft het onderzoek in Nederland de afgelopen 50 jaar hiervan geprofiteerd?

Hoe heeft het onderzoek op het gebied van de deeltjesfysica zich hier ontwikkeld?

Aan de hand van informatie opgetekend in de FOM jaarverslagen (1954-1976) en de NIKHEF jaarverslagen (1977-2003) wordt hier een summier overzicht gegeven van de activiteiten welke experimentele fysici in Nederland ontplooid hebben met betrekking tot de experimenten gedaan op CERN. Nadruk wordt gelegd op de Nederlandse bijdrage aan de bouw van de experimentele opstellingen aan de hand van foto's en komen de inspanningen op software gebied, voor de besturing van meetmachines en met name data-analyse, alsmede de fysica resultaten niet of nauwelijks aan bod. De halve eeuw is onderverdeeld in vier periodes, waarbij de rapportage enigszins gekleurd is door de activiteiten van de schrijver in genoemde tijdvakken. In [2] wordt verslag gedaan van de ontstaansgeschiedenis van de deeltjesfysica en in [3] vindt men een verslag van de ontstaansgeschiedenis van het NIKHEF, Nationaal Instituut voor Kern- en Hoge Energie Fysica.

Periode 1954-1962

Het onderzoek van de kosmische straling en de ontwikkeling van de nodige meettechnieken is in Nederland al in 1929 begonnen aan de Universiteit van Amsterdam. De ionisatiestroom in ionisatievaten is op vele plaatsen op aarde gemeten; langzamerhand ontstond er consensus over het feit dat kosmische stralen veroorzaakt werd door deeltjes en dat het optreden van de grote variatie in ionisatiestroom een gevolg is van een lawine van deeltjes geproduceerd in de atmosfeer.

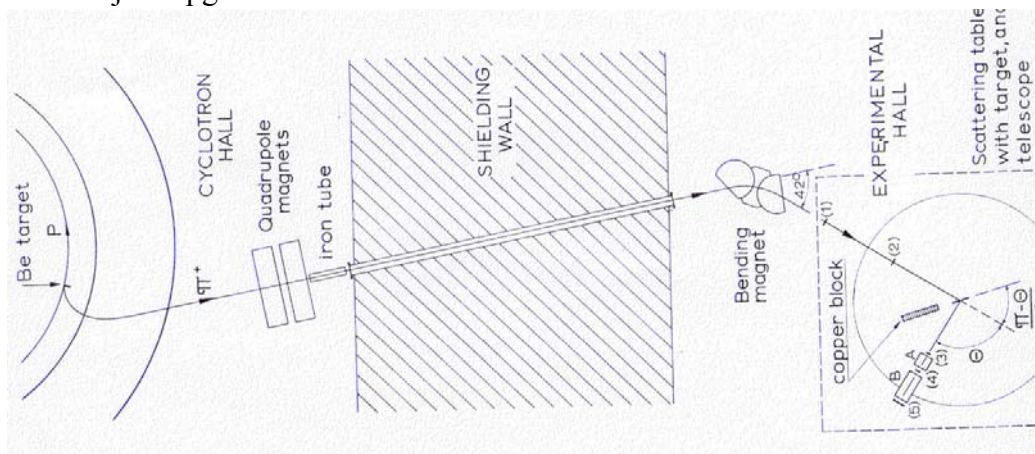
In 1946 is de stichting FOM opgericht en van meet af aan is het onderzoek naar kosmische stralen gesteund in het kader van de Werkgemeenschap voor Kernfysica binnen de werkgroep K I. In deze periode hebben groepen in Engeland en Frankrijk verschillende elementaire deeltjes voor het eerst gezien met behulp van Wilson vaten en kernemulsies. Deze technieken vonden ook in Nederland hun ingang.

Binnen de werkgroep K I is een Wilsonkamer gebouwd die 'getriggered' kon worden 'met een 6-voudige coïncidentie apparaat'. De kamer werd in een magneet opgesteld en van twee zijden kon een foto gemaakt worden van de deeltjessporen veroorzaakt door de botsing van kosmische stralen. Ook wordt melding gemaakt van de studie van 'luchtlawines' met behulp van 'telbuizen', met name van het centrale deel, waarvan de energie hoger is dan die welke met 'versnellings machines' bereikt kan worden, een opmerking welke anno 2004 nog steeds geldt, ondanks het feit dat de energieschaal wel enigszins gewijzigd is.

In 1955 werd door FOM besloten het onderzoek naar elementaire deeltjes een iets zelfstandiger karakter te geven door de oprichting van een werkgroep Mesonenfysica, K VII. Het doel dat de nieuwe werkgroep zou nastreven was, zowel wat theorie als wat experiment betreft, deelnemen aan de internationale ontwikkelingen, onder andere door voorbereidingen te treffen voor de over enige jaren ter beschikking komende mogelijkheden tot het verrichten van experimenteel onderzoek. Hierbij werd in het bijzonder aan CERN gedacht. Met de instelling van deze werkgroep gingen ook op andere plaatsen in Nederland activiteiten in het kader van de elementaire deeltjes van start.

Het synchrocyclotron is de eerste versneller welke op CERN in gebruik wordt genomen. In augustus 1957 werden hiermee protonen versneld tot een energie van 600 MeV. Door deze op een target te schieten kon onder andere een secundaire pionen bundel gemaakt worden. In overeenstemming met de doelstelling van CERN werden nationale teams van onderzoekers van de deelnemende landen in de gelegenheid gesteld te komen experimenteren bij de nieuwe versneller. Een groep in Utrecht had inmiddels de nodige voorbereidingen getroffen om verstrooiing van pionen aan kernen te bestuderen, een experiment dat uitgevoerd zou worden met een telescoop van scintillatietellers. Alle benodigde elektronica, zoals hoogspanningsvoedingen, coïncidentiecircuits en pulsgeneratoren waren door de groep ontworpen en gebouwd. Deze groep is in 1958 door de Minister als Nederlands 'visiting team' aangewezen. In de annalen staat vermeld dat alle elektronische apparatuur met een van ZWO geleende Landrover naar Geneve is gebracht.

De beschikbaarheid van de bundel was aanvankelijk beperkt, niet alleen door de nodige technische problemen maar ook omdat vele groepen klaar stonden om te gaan meten. In totaal werden 67 shifts (ieder van 8 uur) verkregen waarvan ca de helft is besteed om gegevens te verzamelen. De differentiële werkzame doorsnede is gemeten van de verstrooiing van 87 MeV pionen aan ^{12}C en ^{16}O alsmede de inelastische werkzame doorsnede in achterwaartse richting. In het najaar van 1960 is het 'visiting team' teruggekomen naar Nederland en is de groep aan het eind van hetzelfde jaar opgeheven.



Experimentele opstelling voor visiting team (1959)

Binnen de werkgroep K VII, Mesonenfysica, was het gebruik van fotografische emulsies voor de studie van hoog-energetische deeltjes letterlijk tot grote hoogte gestegen. Hoog in de bergen in Peru zijn door medewerkers van de universiteit van Amsterdam metingen verricht aan kosmische stralingsdeeltjes, waar o.a. de levensduur van het positieve en negatieve μ -meson is gemeten.

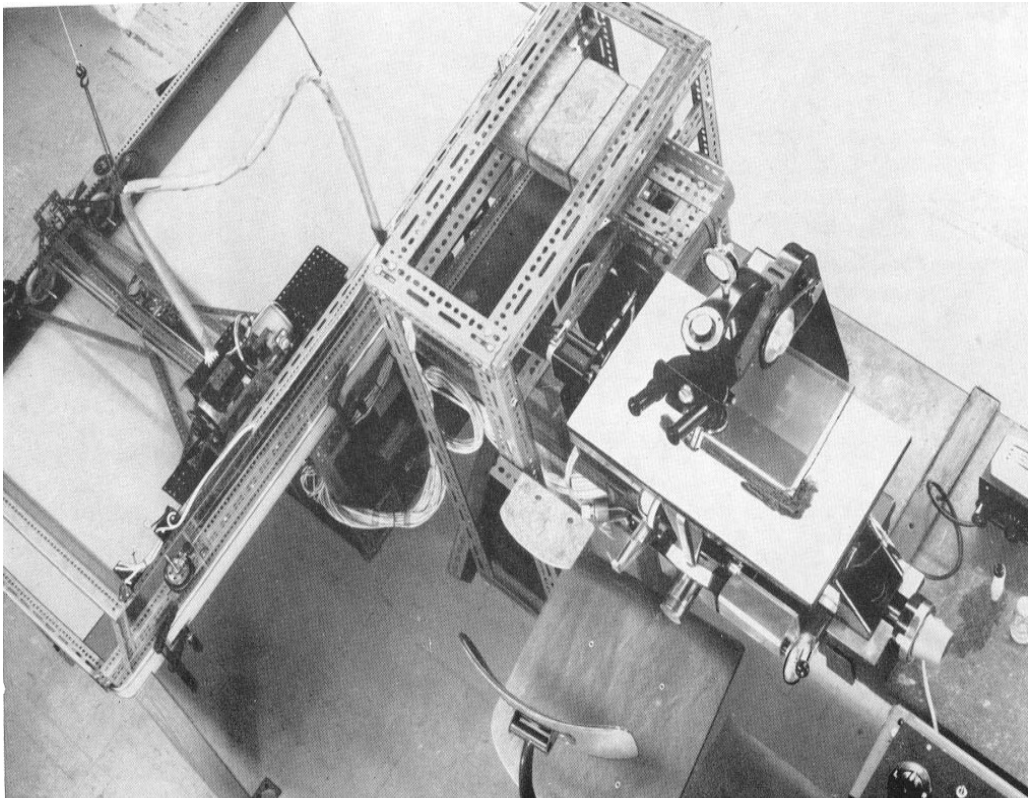
De hoeveelheid gegevens groeide snel toen versnellers beschikbaar kwamen waar op gecontroleerde wijze hoog energetische deeltjes in emulsies werden geschoten. Tachtig kernemulsieplaten van 20 x 20 cm en 0.6 mm dik werden op elkaar geklemd en in een bundellijn geplaatst. De eerste bestralingen vonden plaats bij het Bevatron in Berkely, met zowel K mesonen als π mesonen. De eerste gegevens omtrent het verval van stoppende K-mesonen in emulsies worden verkregen en even later wordt de observatie van het verval van een anti-lambda deeltje gerapporteerd. De deeltjessporen worden over grote afstanden gevolgd en gedigitaliseerd met behulp van een microscoop, waarbij de hoekveranderingen (verstrooiingen) nauwkeurig gemeten worden, gegevens welke de input vormen voor het beschrijven van de kernpotentiaal. Het meetproces wordt meer en meer geautomatiseerd en voor de berekeningen wordt voor het eerst een beroep gedaan op een rekenmachine, de X1 van het Mathematisch Centrum Amsterdam, geprogrammeerd in ALGOL60.

Als op 24 november 1959 het proton synchrotron (PS) op CERN in gebruik wordt genomen en een 24 GeV protonenbundel beschikbaar komt worden nog diverse emulsies bestraald en komen de eerste resultaten van diffractieve verstrooiing van hoog energetische protonen aan kernen beschikbaar.

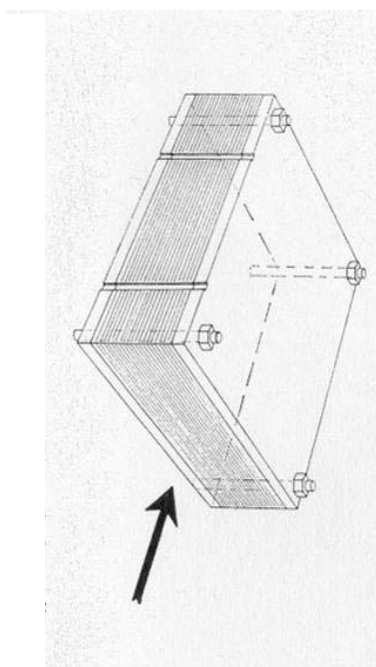
Vanaf 1960 zal een nieuwe detectietechniek voor de studie van botsingsprocessen steeds belangrijker worden: het bellenvat. Nadat Glaser in 1952 de ontdekking had gedaan dat elektrisch geladen deeltjes een 'bellen'spoor achterlaten in een vat gevuld met vloeibare waterstof is een stormachtige ontwikkeling van de bellenvaten op gang gekomen; het detectievolume groeide binnen twintig jaar van 1 cm³ tot enkele tientallen kubieke meters! Alleen al in Europa en Rusland zijn tenminste 50 bellenvaten gebouwd, de één meer succesvol dan de ander.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat ook in Nederland aan de ontwikkeling van een bellenvat is gewerkt. In Leiden is een vat gebouwd met een inhoud van 20 liter, gevuld met vloeibaar waterstof. Er wordt gezegd dat de 1 GeV protonversneller in Delft een speeltje voor de ingenieurs is geweest; feit is dat deze inderdaad nooit operationeel is geworden voor de experimentele fysici. Toen dit duidelijk werd is de verdere ontwikkeling van het bellenvat in Leiden in 1963 stopgezet.

Tot slot van deze periode dient hier nog opgemerkt te worden dat per 1 juli 1955 de Nederlander prof.dr. C.J.Bakker tot directeur generaal van CERN is benoemd.



Meettafel voor emulsies



Stapel emulsieplaten klaar voor bestraling.

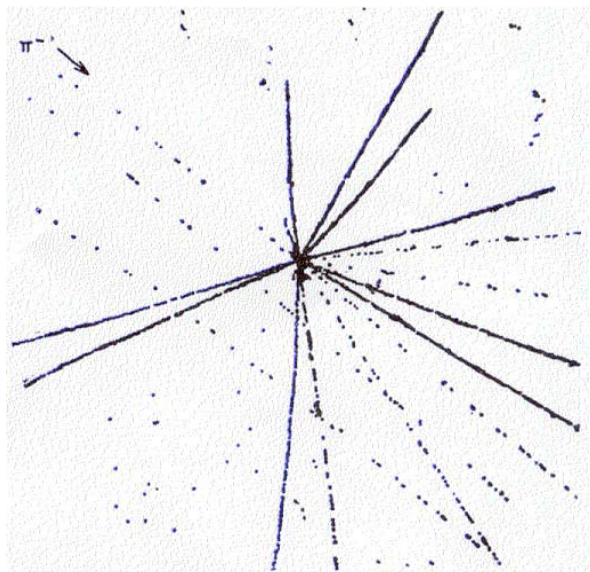


Fig. 6. Kernexplosie veroorzaakt door een negatief pi-meson van 5,5 GeV. De pijl geeft de richting van de mesonenbundel aan. Opname gemaakt uit een kernemulsieplaat, bestraald met de negatieve pi-mesonenbundel van het Bevatron (Berkeley). De bestraling vond plaats in december 1957 t.b.v. de Werkgroep K VII uit Amsterdam. De energie van 5,5 GeV is de hoogst bereikbare bij het Bevatron voor pi-mesonen.

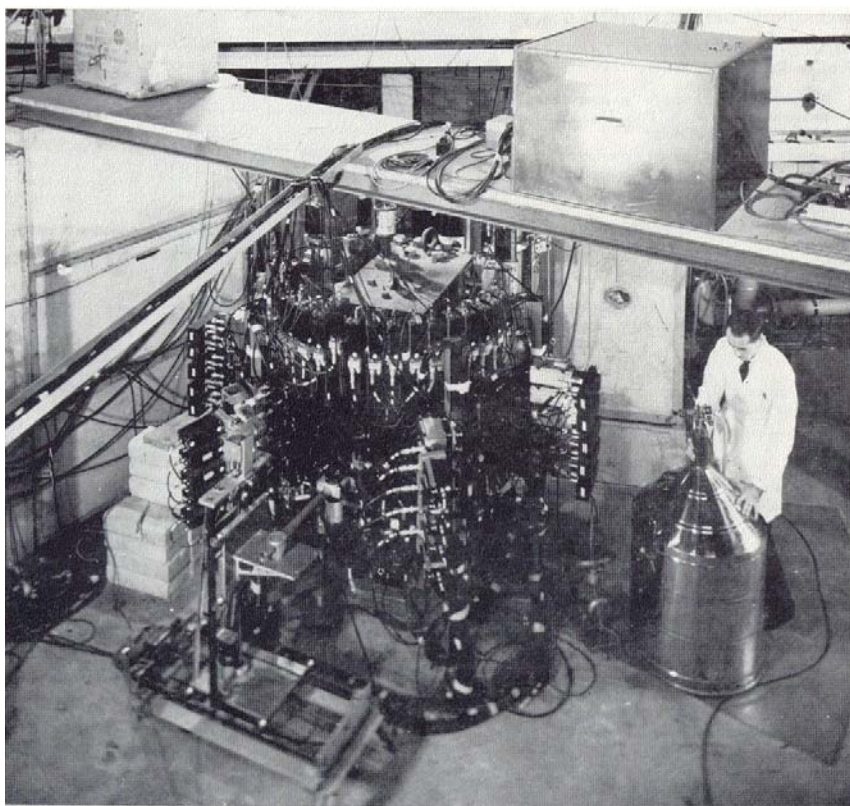
Periode 1963-1975

De Werkgemeenschap Hoge-Energiefysica is een feit.

Uit het Jaarverslag 1963:

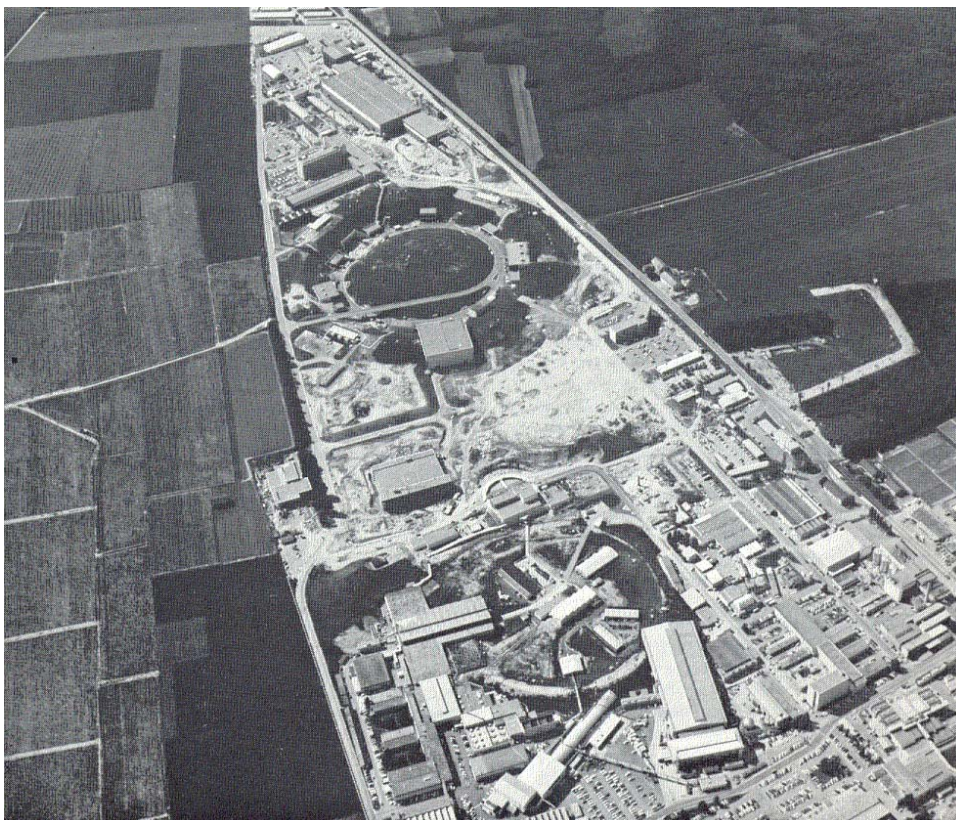
‘ De Werkgemeenschap voor Hoge-Energiefysica stelt zich ten doel de beoefening van de elementaire deeltjesfysica in het bijzonder en de beoefening van de hoge energie kernfysica in het algemeen. De Werkgemeenschap zal hierbij nauw samenwerken met de Werkgemeenschap voor Kernfysica, waarvan zij zich in 1963 heeft afgesplitst. Dit doel kan worden nagestreefd door:

- het bouwen van hoge energie versnellers en het doen van experimenten daarmee*
- het verrichten van experimenten met behulp van hoge energie versnellers in het buitenland en van CERN in het bijzonder*
- het uitwerken van gegevens, vastgelegd op foto's, verkregen tijdens experimenten met versnellers*
- wetenschappelijk werk op het gebied van de theorie van de elementaire deeltjes.’*



Afb. 49. Overzichtsfoto van de apparatuur voor het experiment: verstrooiing van kaonen aan gepolariseerde protonen, uitgevoerd door het F.O.M./C.E.R.N.-bezoekersteam. In het midden de magneet, nodig voor het richten van de protonen; daaromheen de tellers, voor het meten van de verstrooiingshoek en de azimuthale hoek. De gevallen van elastische verstrooiing worden elektronisch geselecteerd door in de linker en rechter groepen van tellers elk één geladen deeltje te verzoeken; verdere selectie op azimuth vindt plaats in de rekenmachine, waar de magnetische banden, waarop de geselecteerde gevallen worden opgeslagen, verder worden behandeld. Op de achtergrond de afschermingsmuur van het 25 GeV C.E.R.N.-protonsynchrotron. De doos op de brug rechts bevat het carciotron, waarmee het radiofrequente signaal, nodig voor het aanbrengen van de polarisatie, wordt geleverd.

In de loop van 1964 heeft de werkgemeenschap medewerking verleend bij de oprichting van een bezoekersteam bij CERN, dat onderzoek verricht met tellerexperimenten, een activiteit welke als vervolg gezien kan worden op de activiteiten van het 'visiting team' dat in 1960 opgeheven was. Dit bezoekersteam vormde aanvankelijk een onderdeel van een CERN groep waar bij een experiment met het synchro-cyclotron kernstructuren werden bestudeerd door meting van muonische röntgenstraling. Na 1966 is dit team heel actief geweest met de meting van elastische verstrooiing aan gepolariseerde protonen voor diverse bundel-deeltjes.



Het CERN terrein in vogelvlucht (1971). Op de voorgrond het proton synchrotron met de experimenteerhallen. Via ondergrondse tunnels worden de protonen naar de ISR (bovenaan de foto) getransporteerd.

Op 27 januari 1971 worden de eerste botsingen geregistreerd bij de ISR, Intersecting Storage Rings. Protonen, versneld met het proton-synchrotron worden 'opgeslagen' in twee ringen. Deze ringen snijden elkaar op 8 plaatsen. De bewegingsrichting van de protonen is tegengesteld in de twee ringen waardoor botsingen met zeer hoge energie mogelijk zijn geworden, een absolute primeur in de versnellerwereld en voor de fysici. Vanaf het begin heeft bovengenoemd 'bezoekersteam' experimenten uitgevoerd bij de ISR, waarbij de studie gefocuseerd was op de productie van deeltjes in de voorwaartse richting, dwz onder zeer kleine hoeken met het bundeldeeltje. De noodzaak een hermetische 4π detector beschikbaar te hebben op het moment dat deze 'collider' operationeel werd was nog niet doorgedrongen. Was dit wel het geval geweest dan zou het J/Ψ deeltje met redelijke zekerheid bij de ISR ontdekt zijn.

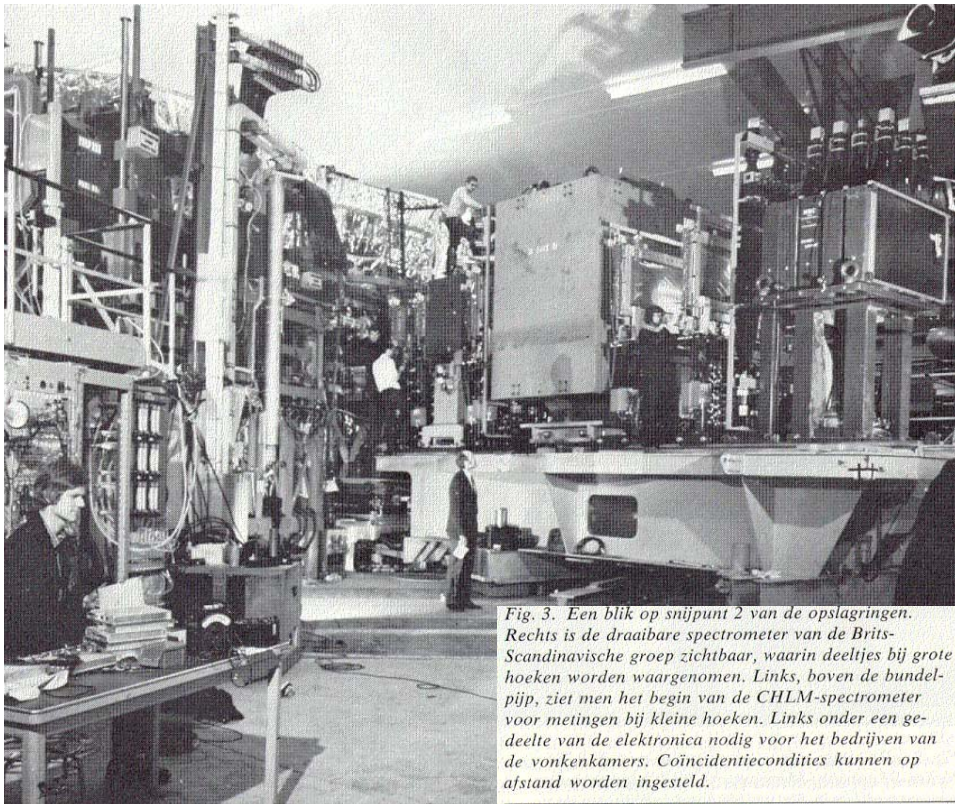


Fig. 3. Een blik op snijpunt 2 van de opslagringen. Rechts is de draaibare spectrometer van de Brits-Scandinavische groep zichtbaar, waarin deeltjes bij grote hoeken worden waargenomen. Links, boven de bundelpijp, ziet men het begin van de CHLM-spectrometer voor metingen bij kleine hoeken. Links onder een gedeelte van de elektronica nodig voor het bedienen van de vonkenkamers. Coïncidentiecondities kunnen op afstand worden ingesteld.

Meetapparatuur opgesteld rond één van de intersectiepunten van de ISR

De jaren 1960-1975 waren de gloriejaren van de bellenvatfysica.

Nadat Glaser het principe van de werking van een bellenvat had ontdekt is het de verdienste van Alvarez (Berkeley) geweest om te tonen op welk een spectaculaire manier de interactie van elementaire deeltjes zichtbaar gemaakt kon worden. Het bellenvat is gevuld met vloeibaar waterstof en wordt heel kort in een toestand van oververhitting gebracht door een snelle expansie. Op dat moment wordt een bundel geladen deeltjes ingeschoten waarbij langs de baan kookbelletjes optreden (de deeltjes verliezen een beetje van hun energie waardoor lokale verhitting optreedt). Het vat is voorzien van vensters, aan de voorkant zijn flitslampen gemonteerd en aan de achterkant fotocamera's; met drie projecties is een ruimtelijke reconstructie van de sporen mogelijk. De botsingen van de deeltjes, alsmede de geproduceerde deeltjes zijn zichtbaar op de foto als sporen van kleine puntjes (de kookbelletjes).

Het bellenvat is opgesteld in een magneetveld, waardoor de sporen delen van een helix zijn. Nadat Alvarez een voldoende groot bellenvat (72 inch in de bundelrichting) had gemaakt, zodat ook het verval van deeltjes geproduceerd bij de botsing zichtbaar werden, bleek welke spectaculaire mogelijkheden deze nieuwe techniek had. Zo kan hier vermeld worden dat de ontdekking van zowel het Ω deeltje als het Ξ^0 deeltje onomstotelijk is aangetoond aan de hand van slechts één bellenvatopname.

Hoewel de meeste 'stabiele' deeltjes reeds ontdekt waren met behulp van nevelkamers en emulsies blootgesteld aan kosmische straling, hebben bellenvaten een allesoverheersende rol gespeeld bij het in kaart brengen van de zeer kort levende deeltjes, de baryon- en mesonresonanties. Alleen al op CERN zijn tientallen miljoenen opnames gemaakt met diverse bellenvaten gebruikt voor experimenten met deeltjesbundels afkomstig van het 28 GeV protonsynchrotron.

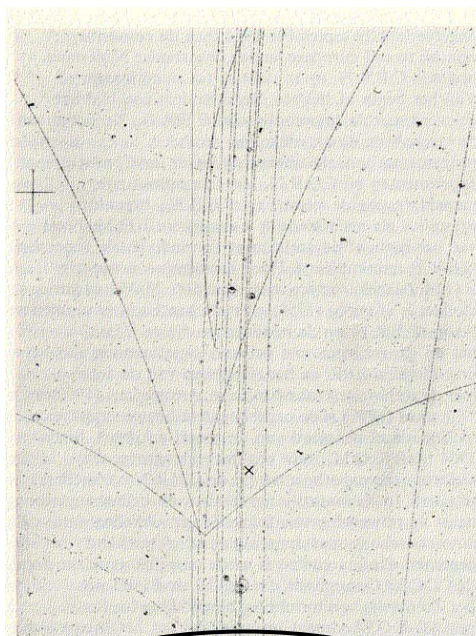


Fig. 2. Niet het eerste, maar het negenentwintigste exemplaar van Ω^- . Het werd gevonden tussen 300.000 foto's van een bellenvatbestraling in C.E.R.N. met 1,2 GeV/c K-mesonen door de Amsterdam-Nijmegen-samenwerking. Men ziet de volgende reacties:

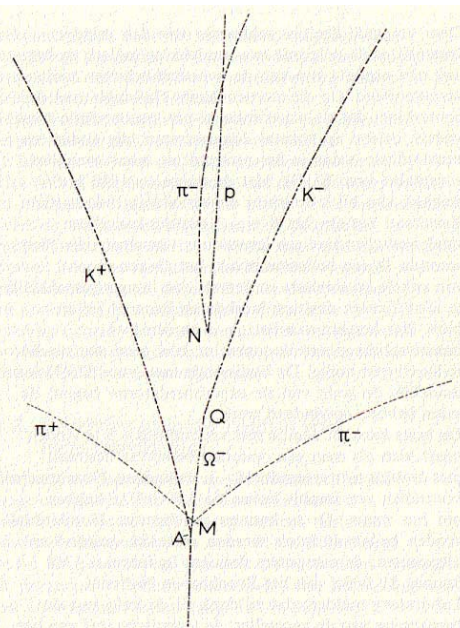
in A $K^- + p \rightarrow K^0 + K^+ + \Omega^-$

in M $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

in Q $\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$

in N $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$

De neutrale deeltjes, K^0 van A naar M en Λ^0 van Q naar N, laten geen spoor achter. Alle sporen zijn gekromd door het magnetisch veld in het bellenvat. De meting van de kromtestraal geeft de impuls van de deeltjes, de bellendichtheid wordt door de snelheid bepaald. Met behulp van de wetten van behoud van energie en impuls

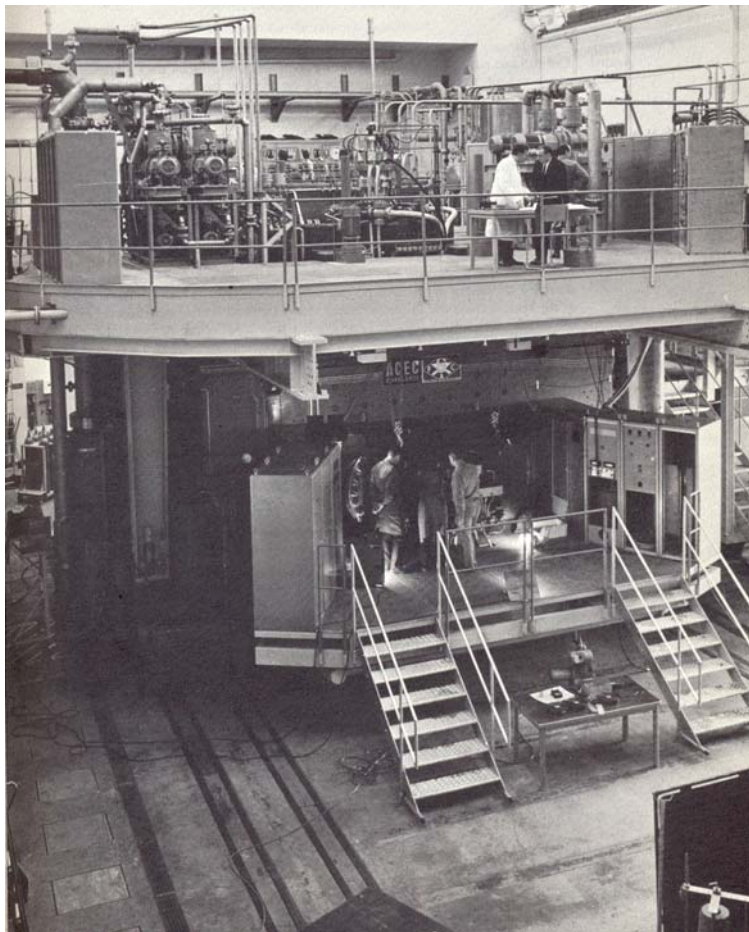


kan men de kernreactie identificeren en de massa van het Ω^- vinden. Het resultaat is $1670.5 \pm 2.2 \text{ MeV}/c^2$, het wereldgemiddelde $1672.4 \pm 0.5 \text{ MeV}/c^2$.

215

Bellenvatgroepen werden gevormd aan vele universiteiten in de landen welke lid waren van CERN. Internationale collaboraties werden gevormd om de grote hoeveelheid gegevens welke de bellenvatopnamen genereerden te analyseren. De resultaten van de analyse van de opnamen behorende tot één en hetzelfde experiment werden samengevoegd en gepubliceerd door de collaboratie.

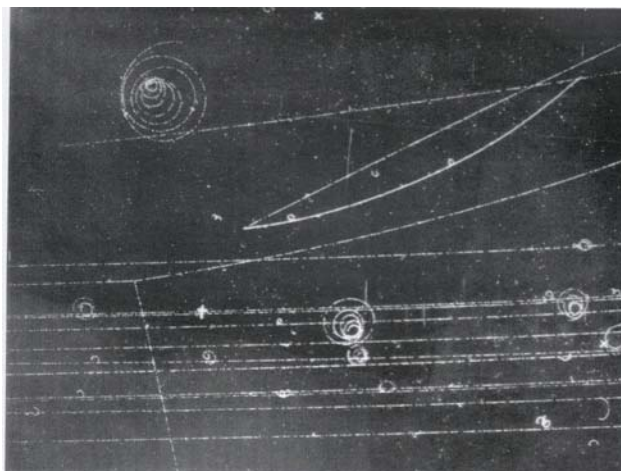
De bellenvatactiviteiten begonnen in Amsterdam in 1959 concrete vormen aan te nemen met de bestelling van een scantafel, de ENEDEP, en een meetapparaat, de ENETRA. In 1961 werd het eerste experiment gedaan, de studie van de wisselwerking van 1,5 GeV/c K^- mesonen met protonen in het 32 cm bellenvat gevuld met vloeibaar waterstof en opgesteld in een bundellijn in CERN.



Het 2m bellenvat (opgebouwd binnenin magneetjuk)

Bellenvatopnamen

Foto's maken met een bellenvat was een routineklus geworden. De versneller was in principe 24 uur per dag operationeel. De versneller was zodanig ingesteld dat typisch elke paar seconden een secundaire bundel (slechts 10-20 deeltjes!) het bellenvat ingeschoten werd. Op dat moment werd de druk op de vloeistof kortstondig iets verlaagd en een foto gemaakt. Twee personen waren voldoende om het geheel operationeel te houden; een fysicus van CERN berekende de stromen in een aantal dipool- en quadrupool magneten om met behulp van een aantal collimatoren het juiste deeltje (π , K of proton) met de juiste impuls te selecteren. Bij het CERN 2m bellenvat had een filmrol typisch 3000 opnamen. De taak voor de bezoekers, voor wie de film werd opgenomen, was zeer beperkt. Het aantal deeltjes dat het bellenvat ingeschoten werd was zichtbaar op een display en moest binnen bepaalde grenzen vallen. Verder werd aan het eind van elke filmrol onmiddellijk een twintigtal opnamen ontwikkeld door de bemanning van het bellenvat en moest bepaald worden of de opname kwaliteit goed was, hetgeen hoofdzakelijk werd bepaald door het aantal belletjes per cm op een bundelspoor. Spectaculair was het om door een venster in het vat te kijken en de botsingen in een flits te kunnen waarnemen onder oorverdovend lawaai van de zuigers waarmee de vloeistof in het vat ge-expandeerd werd.



Een opname van het eerste bellenvatexperiment geanalyseerd in Amsterdam. We zien de produktie en verval van een Λ -deeltje bij een botsing van een $1.5 \text{ GeV}/c$ K^- -deeltje met een proton.

Hiermee begon voor Amsterdam het tijdperk van internationale samenwerking tussen experimentele groepen en ontstonden collaboraties met exotische namen zoals, SABRE, AMBOPAPISATO en ACNO waaruit meestal de geografische samenstelling van de collaboraties afgeleid kon worden.

In Nijmegen ging in 1963 de werkgroep theoretische hoge energiefysica van start en verscheen de pas benoemde hoogleraar (net terug uit Amerika) op college met een button opgespeld met de tekst 'The quarks will be found' (those were the days...). In hetzelfde jaar is ook de experimentele groep begonnen, aanvankelijk als universitaire groep, maar vanaf 1967 uitgebreid met medewerkers in dienst van FOM.

Met de start van de bellenvatfysica is de experimentele hoge energiefysica in Nederland pas goed op gang gekomen. Zowel in Amsterdam als in Nijmegen had men de beschikking over een aantal zgn. scantafels, meetmachines en rekenmachines. Op de scantafel werd de bellenvatfilm geprojecteerd en alle verschijnselen letterlijk in kaart gebracht door scansters. De volgende stap was het digitaliseren van alle sporen behorende bij een specifieke botsing. De (x,y) coördinaten van alle meetpunten werden vastgelegd op ponskaarten en ponsband; uit drie projecties van dezelfde botsing kon deze in de ruimte gereconstrueerd worden m.b.v. de rekenmachines die net beschikbaar waren gekomen. Dit arbeidsintensieve werk is voor een belangrijk deel vereenvoudigd met de aanschaf en ontwikkeling van automatische meetmachines welke rond 1970 operationeel werden. In Amsterdam was dit de HPD (Hough-Powell Device) en in Nijmegen werd PEPR (Precision Encoding and Pattern Recognition) gebruikt, een apparaat dat ook intensief gebruikt is voor medisch onderzoek.



Scantafel (SHIVA)



De filmrollen



Meetapparaat, de ENETRA

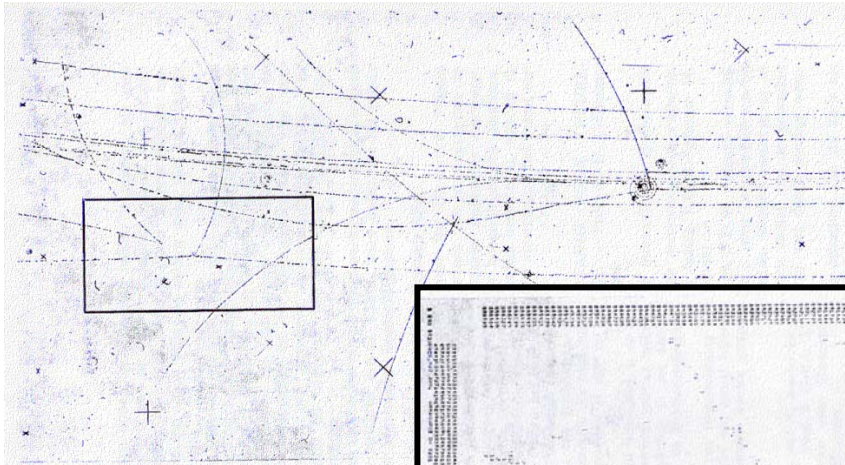


Afb. 51. Een deel van de CDC 3200 in de takels....

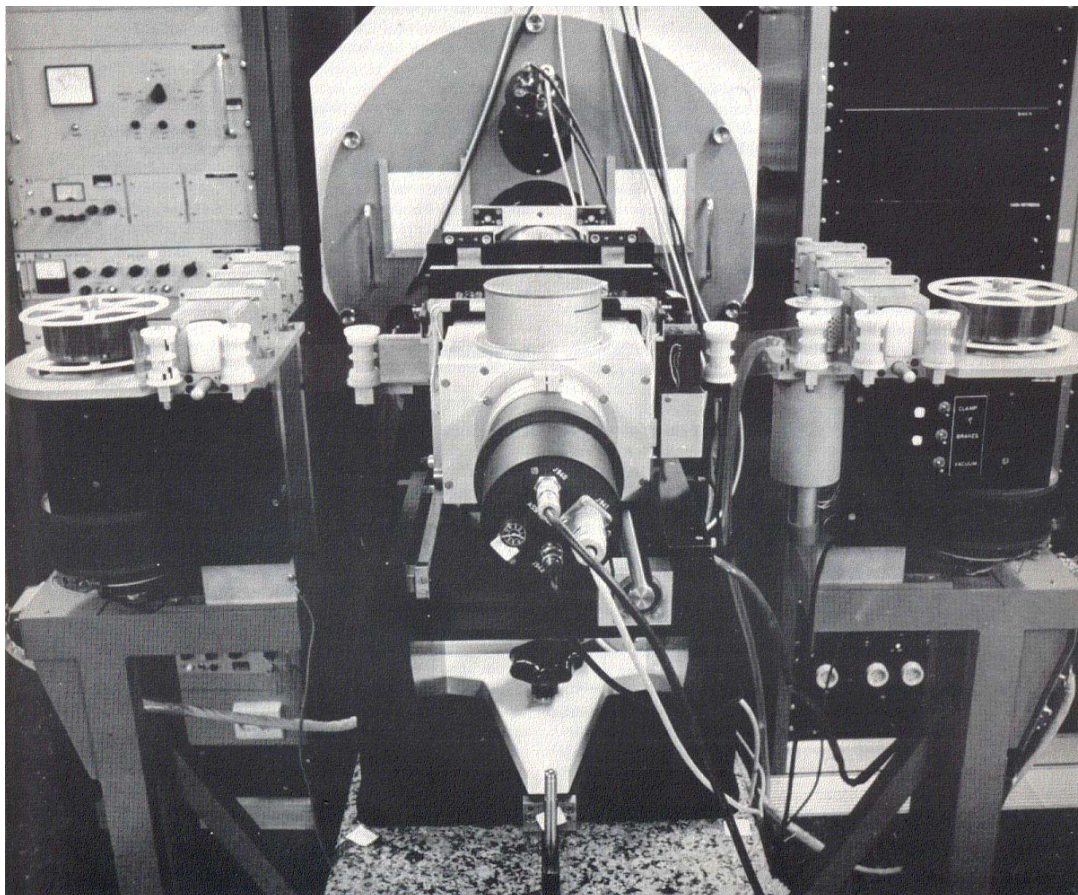
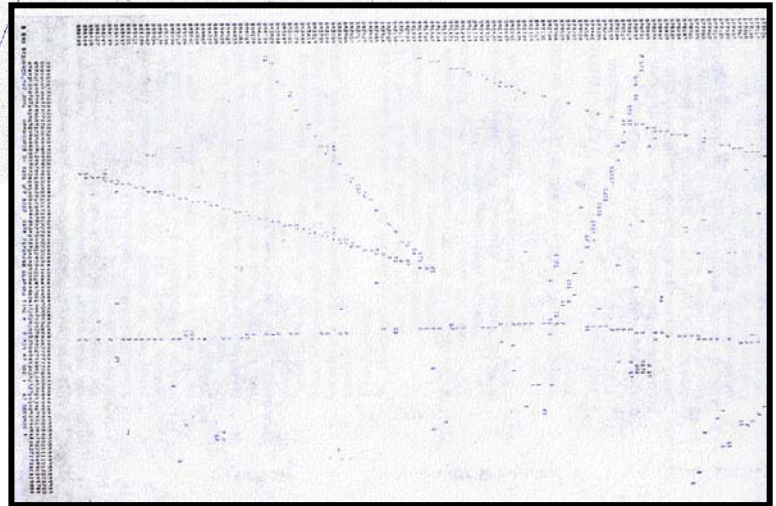
*De eerste **eigen** computer wordt in Amsterdam in ontvangst genomen (1965)*



....en geïnstalleerd in vol bedrijf (afb. 52).



Bellenvat foto met
rechts het resul-
taat van automa-
tische meting met
de HPD



Opstelling van het PEPR meetsysteem

Bellenvatfysica heeft zich voor een groot deel afgespeeld op het terrein van de studie van de sterke wisselwerkingen tussen hadronen (pion, kaon, proton bundels) en protonen. Een bellenvat gevuld met waterstof leverde de meest fraaie foto's. Ook zijn er experimenten uitgevoerd om de wisselwerking tussen hadronen en neutronen te bestuderen, door het bellenvat te vullen met deuterium. Het was interessant aan verschillende experimenten deel te nemen aangezien er vele nieuwe deeltjes voorspeld waren maar nog niet gemeten. Afhankelijk van het bundeldeeltje en zijn energie kwamen steeds nieuwe deeltjes binnen bereik. In totaal is door de Amsterdamse en Nijmeegse groep aan een tiental bellenvatexperimenten gewerkt.

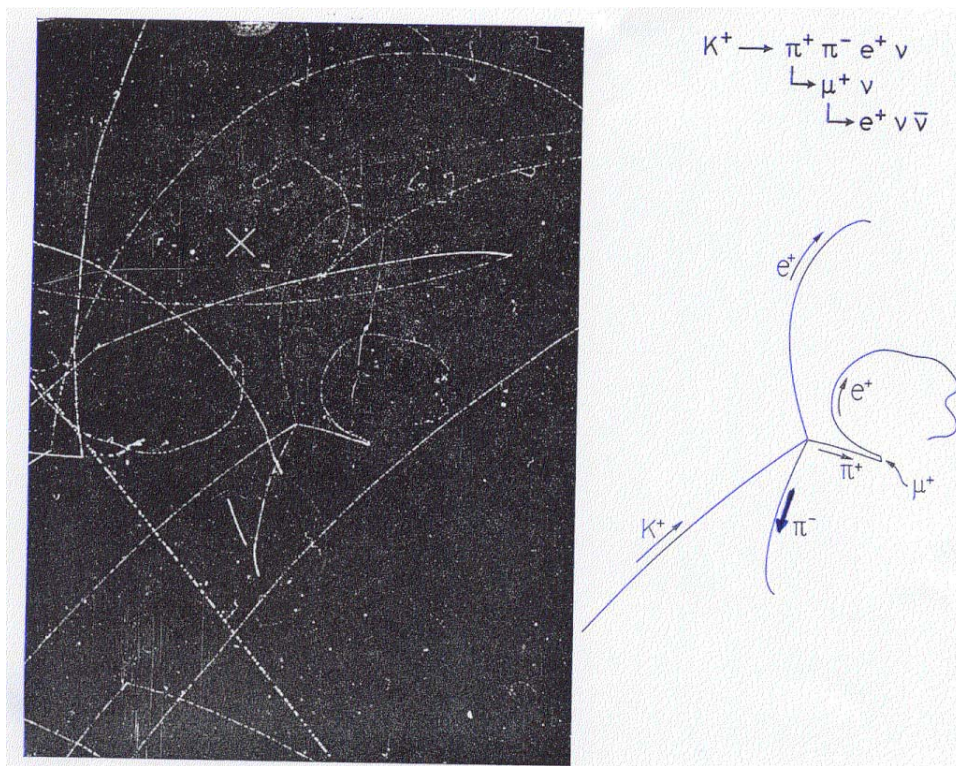
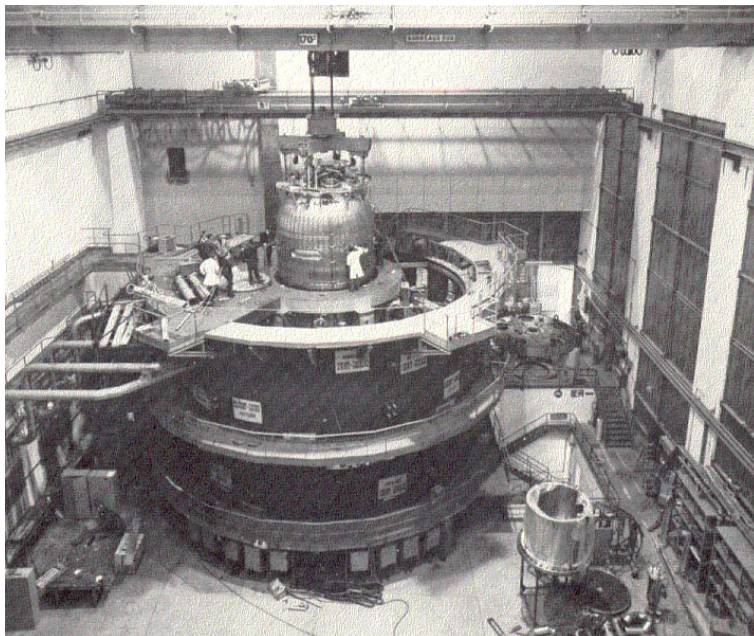


Foto (en uitleg) van een verval van een K^+ deeltje in een bellenvat gevuld met freon

We moeten hier nog het 4.2 GeV/c K^+ experiment vermelden, een experiment gestart door de Amsterdamse en Nijmeegse groep, een eerste stap op weg naar een samenwerkingsverband in Nederland. Bij dit experiment werd een bundel K- mesonen met een impuls van 4.2 GeV/c het CERN 2meter bellenvat ingeschoten. Het bundeldeeltje en de energie waren zodanig gekozen dat de Ξ^* resonanties (vreemdheid -2) in kaart gebracht konden worden. Nadat een groep van CERN en een groep uit Oxford lid werden van de collaboratie was er voldoende meetcapaciteit aanwezig om het experiment te laten uitgroeien tot het grootste bellenvat experiment ooit met in totaal ruim drie miljoen opnamen.

Ook op het gebied van de zwakke wisselwerking hebben bellenvaten een belangrijke rol gespeeld. In Nijmegen is in een vroeg stadium gewerkt aan de analyse van specifieke (zwakke) vervalmoden van het K-meson. Daartoe werd een bellenvat gevuld met een 'zware' vloeistof, freon, waarbij de multiële verstrooiing dan voldoende groot is om laag momentum kaon deeltjes te laten stoppen en zo-doende hun vervalwijze te bestuderen.

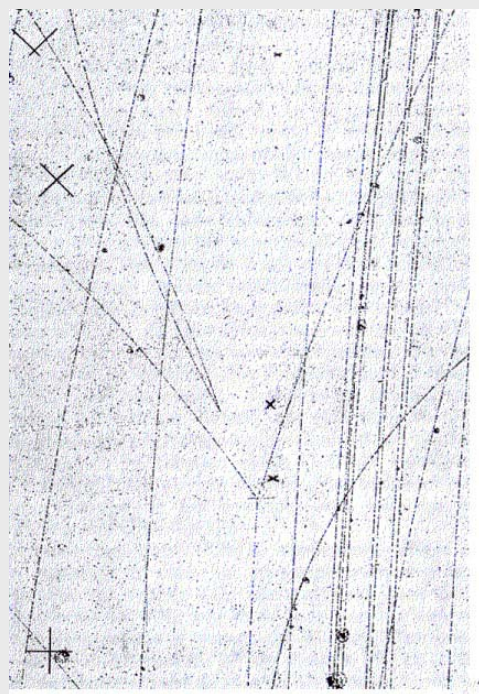
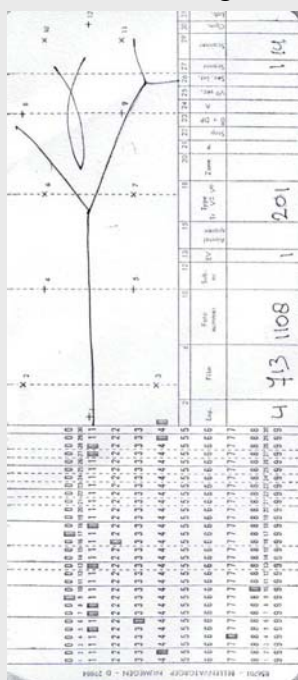
Een experiment met een neutrino bundel en een bellenvat gevuld met freon leverde de eerste experimentele bevestiging van het bestaan van neutrale stromen in zwakke wisselwerking. Deze ontdekking (1973) is gedaan met het bellenvat genaamd Gargamelle, een vat met een inhoud van 10 m^3 ! Vanwege de lage werkzame doorsnede voor neutrino botsingsprocessen was het noodzakelijk een zo groot mogelijk volume beschikbaar te hebben om binnen redelijke tijd een voldoende statistiek te verzamelen. Dit heeft geleid tot de bouw van de grootste bellenvaten: BEBC (Big European Bubble Chamber) door CERN en de '15 ft FNAL Bubble-chamber' door Fermilab; beide vaten hadden een volume van ca 35 m^3 en waren in bedrijf vanaf medio 1973 voor een periode van bijna 10 jaar.



Opbouw van BEBC. Het vat wordt in de supergeleidende magneet en bijbehorend ijzeren juk geplaatst

Analyse bellenvatfoto's .

De bellenvatfilm werd geprojecteerd op zgn scantafels (ENEDEP,SHIVA) en de informatie van elke foto werd in kaart gebracht. Vervolgens werden m.b.v. semi-automatische meetsystemen (ENETRA, SOM, NIJDAS....) de sporen gedigitaliseerd en alle coördinaten op ponskaart gezet. Computerprogramma's voor de geometrische reconstructie van de data en de kinematische fits van diverse hypothesen, alsmede statistische analyses (THRESH, GRIND, SUMX) werden in eerste instantie door CERN ontwikkeld, maar moesten voor een deel herschreven worden of verder uitgebreid voor lokaal gebruik. De behoefte aan rekencapaciteit groeide exponentieel. In Amsterdam werd de eerste eigen rekenmachine (CDC3200) in 1965 geleverd, terwijl tegelijkertijd in Nijmegen een IBM360/40 geïnstalleerd werd. Het is lange tijd zo geweest dat een nieuwe generatie computers als eerste gebruikt werd door de hoge energie fysici.



Op de foto zien we een botsing van een K^- deeltje met een proton in het met waterstof gevuld bellenvat. Behalve de twee geladen deeltjes wordt nog een ongeladen deeltje geproduceerd dat korte tijd later vervalt in een negatief en een positief deeltje. Omdat het bellenvat zich in een sterk magnetisch veld bevindt volgen de banen van de deeltjes een deel van een helix. De positie van elk spoor wordt op een tiental punten gemeten (in drie projecties), waarna m.b.v. het computer programma THRESH de impuls van alle deeltjes bekend is. Vervolgens worden deze gegevens gebruikt om alle kinematische hypothesen te verifiëren met het programma GRIND, waarmee vaak een eenduidige oplossing wordt verkregen. Zo zien we op de foto een voorbeeld van de reactie $K^- p \rightarrow \pi^- p K^0$. De levensduur van het K^0 deeltje is ca 10^{-10} s en is ontdekt bij het onderzoeken van kosmische stralen m.b.v. Wilson vaten. Het bellenvat heeft het mogelijk gemaakt deeltjes te ontdekken met levensduren van 10^{-23} s, waarvan dus nooit een spoor op een foto te zien zal zijn omdat het vervalt op de plaats waar het gemaakt wordt.

Uit de analyse van vele tienduizenden foto's zijn b.v. vele honderden botsingen van bovengenoemd type gevonden. Nadere studie toont dat het π^- en K^0 deeltje hoofdzakelijk afkomstig zijn van hetzij het $K^*(890)$ deeltje, hetzij het $K^*(1420)$ deeltje, waarbij het getal de massa (in eenheden MeV) van het deeltje representeert. Dit resultaat wordt ook fraai geïllustreerd in de figuur hiernaast (geproduceerd met SUMX) waar een massa histogram van π^-K^0 systeem wordt getoond met de sterke pieken bij de twee bovengenoemde massawaarden.

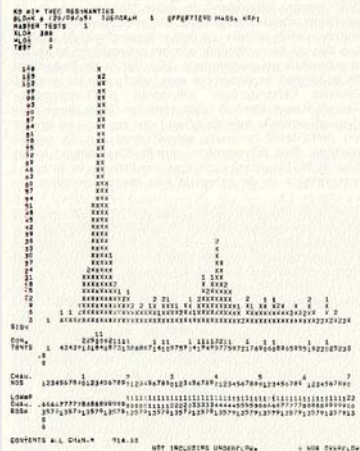


Fig. 2. Massahistogram van de $K^*\pi^-$ massa in reactie (1). Bij 890 en 1420 MeV/c^2 treden resonanties op.

...

EVENT 4- 722-1759-1 BOX 401 (21/11/72 100331)(TAPE - 1) SERIAL 1 (TITLES 444/ 44) (VE

POINTS	NTP	NAT	GEN	X	Y	Z	DX	DY	DZ	OP	48	TRA	3	AUTL	1	MEAS.	2
1 A	5	1	1	-13.89	42.73	-33.44	0.010	0.011	0.070								
2 M	2	8	3	-5.59	41.23	-31.78	0.020	0.012	0.103								

TRACK	NATURE	CODE	P	DIP	PHI	THETA	ERRORS	LENGTH	++	SAGITTA	PCOSL	MAG.F	IONIZAT	ME
											RESID	HIST	MEAS.	ION.
1 A1	-	B WWW	4224	8	3153	0	67 3 1	-27.57	0.05	1201	4224	-17.25	10 10 10	50
		0.4938	4225	8	3153		67 3 1				21.7	20		
2 A2	-	WWW	274	-217	357	402	1 3 1	40.88	0.05	-38686	267	-17.31	13 43 99	90
3 A3	-	WWW	901	447	290	529	5 1 0	77.36	0.05	-38928	812	-17.34	11 14 23	60
		0.1396	911	448	289		13 3 2				11.4	10		
		0.4938	912	448	289		15 3 2				11.2	10		
4 A4	+	WWW	313	8	71	62	2 2 1	37.30	0.05	28731	313	-17.26	12 35 99	50
		0.1396	319	9	72		6 6 4				13.3	10		
		0.4938	334	9	77		12 10 7				16.2	12		
5 A5	+	WWW	863	-423	93	423	6 2 1	41.91	0.05	12065	787	-17.35	11 14 24	50
		0.1396	868	-422	94		17 3 2				14.2	10		
		0.4938	865	-422	94		19 3 2				14.3	10		
		0.9383	875	-422	94		25 4 2				14.5	10		
6 M2	+	WWW	1013	301	6153	338	5 1 0	80.82	0.05	40094	968	-17.37	11 13 19	100
		0.1396	1017	300	6153		13 3 2				12.4	10		
		0.9383	1028	300	6154		17 4 3				9.8	10		
7 M3	-	WWW	326	30	6074	223	2 2 0	42.62	0.05	-36199	326	-17.36	12 33 93	70
		0.1396	333	31	6071		5 7 5				11.1	10		
		MEV/C			MILLI-RAD			CM		MICRON	MEV/C	KG	MIN = 10	

*** R6 CANDIDATE - ERR 100 ETC.A1

*** R6 CANDIDATE - ERR 40 ETC.A2 A4 A5

FIT	NOPT	1	NCTR	3	TYPE	5101C	HYP	2	TARG	0.0	ERRORS	NONE	NONE	CHISQ	0.55
TRACK	MASS	CODE	BUR	P U	DIP U	PHI U	DP U	DDP U	DPH U	P F	DIP F	PHI F	DP F	DDP F	
M0 0	1.1154	U U U F	1.7	1.354	-0.235	2.991	0.0	0.0	0.0	1.354	-0.236	2.992	0.017	0.003	
M2 +	0.9383	W W W F	1.9	1.028	0.300	6.154	0.017	0.004	0.003	1.034	0.300	6.154	0.015	0.004	
M3 -	0.1396	W W W F	1.2	0.333	0.031	6.071	0.005	0.007	0.005	0.330	0.033	6.072	0.003	0.007	

FIT	NOPT	1	NCTR	6	TYPE	2020	HYP	104	TARG	0.9383	ERRORS	MT	3	NONE	CHISQ	-0.00
TRACK	MASS	CODE	BUR	P U	DIP U	PHI U	DP U	DDP U	DPH U	P F	DIP F	PHI F	DP F	DDP F		
A1 -	0.4938	W W W F	1.0	4.225	0.008	3.153	0.067	0.003	0.001	4.225	0.008	3.153	0.067	0.003		
A4 +	0.1396	W W W F	1.2	0.319	0.009	0.072	0.006	0.006	0.004	0.319	0.009	0.072	0.006	0.006		
A5 +	0.9383	W W W F	2.4	0.875	-0.423	0.094	0.025	0.004	0.002	0.875	-0.423	0.094	0.025	0.004		
A2 -	0.1396	W W W F	1.3	0.280	-0.217	0.356	0.006	0.008	0.005	0.280	-0.217	0.356	0.006	0.008		
A3 -	0.4938	W W W F	1.4	0.912	0.448	0.289	0.015	0.003	0.002	0.912	0.448	0.289	0.015	0.003		
A0 0	0.6837	U U U U	1.1	2.103	-0.005	-0.182	0.0	0.0	0.0	2.103	-0.005	-0.182	0.070	0.009		

Voorbeeld van de informatie gegeven door het programma GRIND. Aan de hand van de bellendichtheid van de sporen ('BUB') wordt de juiste kinematische hypothese geselecteerd.

Periode 1976-1985

Vanaf 1965 was er al sprake van de oprichting van een nationaal instituut voor hoge energie fysica. Onderhandelingen tussen de partners enerzijds en tussen de partners en de regering (via FOM) anderzijds verliepen alles behalve soepel. Dit had ook te maken met het feit dat CERN een nieuwe versneller wilde gaan bouwen, waaraan Nederland al of niet zou meebetalen. Verder waren er ook plannen van de kernfysici om een eigen versneller in Nederland te realiseren en rees de vraag welke status de universitaire groepen zouden krijgen binnen het nieuw te vormen instituut.

Uiteindelijk is in Juni 1975 de overeenkomst getekend tussen de Stichting FOM, de Stichting IKO, de Universiteit van Amsterdam en de Katholieke Universiteit van Nijmegen, waarbij het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energie-Fysica (NIKHEF) is opgericht. In het eerste NIKHEF (sectie H) jaarverslag van 1977 staat een hoofdstuk geschreven over de ontstaansgeschiedenis van het NIKHEF. Hier volgt een kopie van dit hoofdstuk, samen met de boodschap van het ministerie.

nr. 95
dd. 18 juni 1975

Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen - Voorlichtingsdienst
Nieuwe Uitleg 1 - Den Haag-2005
telefoon: (070) 74 10 44 - telex 32636 MINOV

bewaren

NATIONAAL INSTITUUT VOOR KERNFYSICA EN HOGE ENERGIEFYSICA OPRICHT

Op dinsdag 17 juni 1975 is in tegenwoordigheid van de staatssecretaris van onderwijs en wetenschappen, dr. G. Klein, de overeenkomst tot oprichting van het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-energiefysica getekend door de partners: de Universiteit van Amsterdam, de Katholieke Universiteit Nijmegen, de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (F.O.M.) en de Stichting Instituut voor Kernfysisch Onderzoek (I.K.O.).

Deze handeling maakt de weg vrij voor het uitvoeren van het laatste onderdeel van het nationale plan voor kernfysica en hoge-energiefysica, waartoe de regering in 1971 had besloten.

Dit besluit werd indertijd genomen omdat de omvang van de middelen, die voor dit werk nodig waren, benevens de noodzaak om een deel ervan in samenwerking met andere landen in de CERN (Genève) *) uit te voeren, het noodzakelijk maakten, alle Nederlandse activiteiten op dit gebied, met inbegrip van die van de universiteiten en hogescholen, te bundelen en geheel op elkaar af te stemmen.

Het laatste, nu goedgekeurde deel van het plan heeft betrekking op de hoge-energiefysica. Het voorziet in de bouw van een instituut te Amsterdam, waarin de Amsterdamse universitaire groep zal worden gehuisvest en waarin de Nederlandse CERN-groepen een thuisbasis vinden.

Het instituut zal een afdeling krijgen in Nijmegen, waarin de daar werkende groep zal opgaan. Binnen enkele jaren zal het I.K.O., waar in het kader van het plan een lineaire elektronenversneller van 300 MeV in aanbouw is, in het nieuwe instituut opgaan. Daardoor wordt een optimaal gebruik van de aanwezige faciliteiten, werkplaatsen, bibliotheken en andere infrastructuur verwezenlijkt. De bouw- en inrichtingskosten van de sectie hoge-energiefysica van het instituut, waarin t.z.t. 180 mensen zullen werken, worden geraamd op ruim 20 miljoen gulden. Daarnaast zullen in de afdeling Nijmegen nog 30 mensen werken. In zijn toespraak wenste de staatssecretaris de hoge-energiefysici veel succes. Hij noemde de thans verkregen samenwerking een uniek voorbeeld van samenspel tussen eerste en tweede geldstroom. Het feit, dat er lang was onderhandeld over de bevoegdheden van de afzonderlijke partners, was het gevolg van het feit dat er op dit punt in ons land nog geen voorbeeld bestond.

De Nederlandse hoge-energiefysici doen hun eigenlijke experimenten in de CERN. De binnenlandse activiteiten richten zich op het verwerken van de daar gemeten resultaten – waarvoor o.a. uitgebreide reken- en informatieverwerkende apparatuur nodig is – en het voorbereiden van nieuwe experimenten. De apparatuur, die daarvoor in de toekomst zal moeten worden ontwikkeld, is zo ingewikkeld, dat het niet verantwoord zou zijn dat voor rekening van een enkele universiteit te doen. De oprichting van een nationaal instituut is hiervoor de aangewezen weg.

*) CERN: Organisation européenne pour la recherche nucléaire
US (nr. 206)

Sb 5201-850-6-75

Buiten de kantooruren zijn telefonisch bereikbaar: dr. E. Nordlohne (070) 54 89 39 en mr. S. H. Poppema (070) 27 35 63, chef, onderscheidenlijk plv. chef Voorlichtingsdienst; N. P. van Schouwenburg, staffunctionaris, (071) 6 38 24; N. W. Mäkel (079) 16 43 15 en P. E. Spijkerman (079) 21 11 66, hoofd, onderscheidenlijk plv. hoofd bureau Pers- en publiciteitszaken.

1. ONTSTAANSGESCHIEDENIS VAN HET NIKHEF

Op 17 juni 1975 werd, na tien jaren van voorbereiding, de overeenkomst getekend tot oprichting van het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica (NIKHEF). Het eerste jaarboek van de sectie Hoge-Energiefysica van dit instituut, het verslag over het jaar 1977, ligt nu voor u, hetgeen aanleiding voor ons is tot een korte terugblik op de ontstaansgeschiedenis en op de motiveringen die tot de oprichting van het NIKHEF hebben geleid. In het instituut zal in de komende decennia een belangrijk deel zijn geconcentreerd van al het fundamenteel natuurkundig onderzoek dat in Nederland op het gebied van de kernfysica en de hoge-energiefysica wordt verricht.

De gedachte om het onderzoek in de fysica van de elementaire deeltjes in Nederland onder te brengen in een nationaal instituut heeft zich in de tweede helft van 1964 gevormd binnen de Werkgemeenschap voor Hoge-Energiefysica van de FOM. De succesvolle ontwikkeling van de CERN te Genève deed ook in Nederland de behoefte ontstaan om de experimentele faciliteiten belangrijk uit te breiden. De omvang van de benodigde apparatuur en het feit dat in Nederland slechts betrekkelijk weinig fysici op het gebied van de experimentele hoge-energiefysica ervaring hadden, maakten het voor de hand liggend om deze uitbreiding op één plaats te concentreren en niet te versnipperen over verschillende laboratoria. In het voorjaar van 1965 werd door de Commissie van de Werkgemeenschap H van de FOM een werkommissie gevormd om een definitief voorstel tot oprichting van een nationaal instituut op het gebied van de hoge-energiefysica voor te bereiden. Deze commissie bracht reeds na enkele weken een interimrapport uit waarin werd voorgesteld een nieuw FOM-instituut voor hoge-energiefysica op te richten met een eigen gebouw dat in 1970 kon zijn voltooid.

Omstreeks dezelfde tijd werd door de Stichting Instituut voor Kernfysisch Onderzoek (IKO) bij FOM een plan ingediend om een 300 MeV lineaire elektronenversneller te bouwen. Dat de twee plannen vrijwel gelijktijdig het licht zagen was niet helemaal toevallig. Beide plannen waren namelijk geconcipeerd nadat een IKO-voorstel tot bouw van een Nederlandse hoge-energieversneller, een lineaire elektronenversneller van 3 GeV, te ambitieus was gebleken en moest worden ingetrokken. De Raad van Bestuur van FOM, met deze beide plannen geconfronteerd, besloot een commissie ad hoc te benoemen om de realiseringmogelijkheden van deze voorstellen te bestuderen en hierbij ook aandacht te geven aan de financiële aspecten. Deze commissie vergaderde op 25 juni 1965 een hele dag. Aan het einde van deze dag was het NIKHEF geboren.

De conclusie van de commissie ad hoc luidde, dat beide plannen dienden door te gaan en dienden te worden gecombineerd door de oprichting van een nationaal instituut voor kernfysica

en hoge-energiefysica, gevestigd te Amsterdam op een terrein gelegen tussen het bestaande IKO en het FOM-laboratorium voor Massascheiding, het huidige FOM-instituut voor Atoom- en Molecuulfysica. Men kwam verder tot de conclusie dat beide plannen, afgezien van een vrij omvangrijke kapitaalsinvestering, bijna geheel gerealiseerd konden worden binnen het toentertijd als normaal beschouwde jaarlijks accres van 12% in het exploitatiebudget van de FOM.

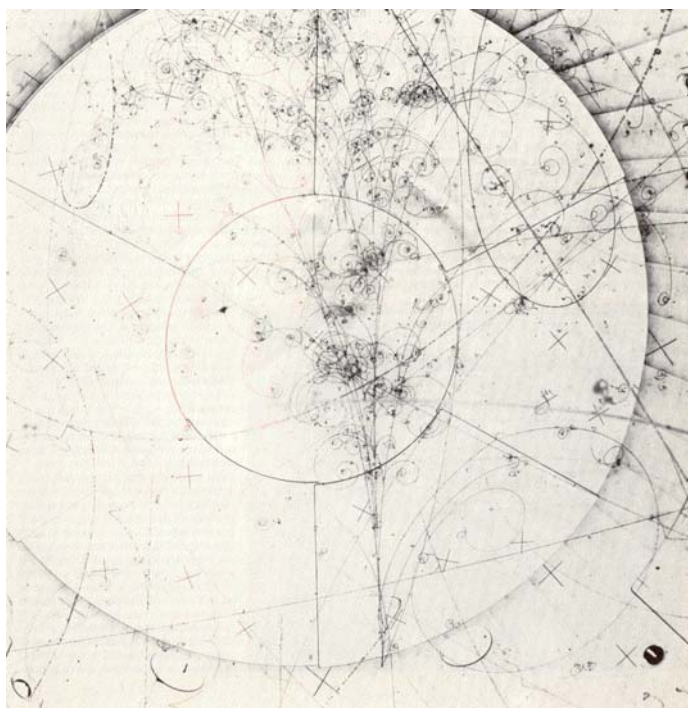
Dit advies is het beginpunt geweest voor langdurige onderhandelingen om deze plannen gerealiseerd te krijgen. In deze procedure is van bijzonder groot belang geweest een advies dat de Wetenschappelijke Raad voor Kernenergie (WRK) eind 1970 aan de minister uitbracht over de beoefening van de kernfysica en hoge-energiefysica in Nederland. Hierin werd gesteld, dat de plannen voor de versnellers en voor de oprichting van het NIKHEF alle moesten doorgaan, maar dat tegelijkertijd het gehele onderzoek in Nederland op deze vakgebieden diende te worden gecoördineerd en gerationaliseerd. Dit gunstig advies heeft uiteindelijk de Nederlandse deelneming aan de bouw voor de 400 GeV protonenversneller (SPS) te CERN verzekerd. Anderzijds is de voortgang van het NIKHEF aanmerkelijk vertraagd door de in het WRK-advies gestelde eis dat de Amsterdamse universitaire werkgroep geheel en de Nijmeegse werkgroep zo ver mogelijk dienden te worden opgeheven, om in het instituut te worden geïntegreerd.

Dit geheel nieuwe aspect is aanleiding geweest tot langdurige onderhandelingen met beide betrokken universiteiten, de Universiteit van Amsterdam en de Katholieke Universiteit Nijmegen. Voor Nijmegen was, alleen al gezien de geografische ligging, het voortbestaan van een levensvatbare werkgroep in Nijmegen van essentieel belang. In Amsterdam moesten tal van ingewikkelde organisatorische problemen worden opgelost, vooral in verband met de overgang van het universitaire personeel naar het instituut. Pas twee en een half jaar nadat de minister in 1972 in principe toestemming tot oprichting van het NIKHEF had gegeven, werd de overeenkomst tussen FOM, IKO en de universiteiten van Amsterdam en Nijmegen getekend.

De overeenkomst, een uitstekend voorbeeld van coördinatie van universitair onderzoek en zogenaamd tweede geldstroom onderzoek, voorziet in een geleidelijke volledige integratie van het IKO (sectie K) met de voormalige universitaire en FOM hoge-energiefysicagroepen. In 1980 zal deze integratie geheel zijn voltooid. Op dat moment zal het nieuwe laboratorium gebouwd zijn voor de huisvesting van de sectie H van het instituut. De vakgroep hoge-energiefysica van de Universiteit van Amsterdam, nu reeds een organisch deel van het instituut, zal verhuisd zijn naar het nieuwe laboratorium. Een deel van het wetenschappelijk programma van de sectie H wordt uitgevoerd in Nijmegen, door de afdeling hoge-energiefysica van de Katholieke Universiteit. Op bestuurlijk en administratief-organisatorisch niveau zal de integratie van beide secties in 1980 een aanvang genomen hebben.

Inmiddels was de bouw van een nieuwe versneller in CERN ver gevorderd. Het Super Proton Synchrotron, SPS, kon protonen versnellen tot een energie van 400 GeV.

Met de komst van de nieuwe versneller werden internationaal ook nieuwe technieken ontwikkeld voor de studie en analyse van hoog energetische botsingen waar vele secundaire deeltjes geproduceerd werden. In 1968 werd de MWPC, Multi Wire Proportional Chamber, ontwikkeld en in 1969 de driftkamer. Rond 1970 werden ook de eerste calorimeters gebouwd waarmee de energie van de geproduceerde deeltjes gemeten kon worden, met name ook van de elektrisch neutrale deeltjes welke met de dradenkamers niet gedetecteerd konden worden.



*Foto van een neutrino interactie in BEBC
(gevuld met vloeibaar waterstof)*

Het grote bellenvat BEBC was zeer geschikt om bij deze hoge bundelenergieën een eerste generatie inclusieve experimenten te doen op het gebied van de studie van de sterke interacties, maar de studie van meer zeldzame verschijnselen vereiste de nodige elektronische apparatuur waarmee een bepaald type botsing geïdentificeerd en geselecteerd kon worden. Voor dit doel is BEBC nog uitgebreid met een 'External Particle Identifier', geplaatst rondom het vat, waarmee gekeken kon worden welk type deeltjes er bij een bepaalde botsing geproduceerd werden.

Gedurende deze periode heeft de bellenvatgroep in Nijmegen deelgenomen aan de studie van 70 GeV K^+p interacties, terwijl de Amsterdam groep BEBC heeft gebruikt voor de studie van v en \bar{v} interacties terwijl het vat gevuld was met deuterium hetgeen de studie mogelijk maakte van zowel νp als νn interacties.

De nieuwbouw voor het NIKHEF is gepland in de Watergraafsmeer in Amsterdam naast het IKO terrein waar de lineaire elektronen versneller MEA net in bedrijf is. In 1978 wordt de mechanische werkplaats opgeleverd met een prachtige assemblagehal. In 1980 volgt de oplevering van het volledige gebouw waarna de volledige Amsterdamse werkgroep verhuist van het Zeeman laboratorium aan de Plantage Muidergracht naar de nieuwbouw. Op de eerste verdieping wordt de computerzaal ingericht, naar verluidt om bij dijkdoorbraak van een droge plek verzekerd te zijn. Alle dataverwerking wordt verricht met het zogenaamd mainframe. Programma's worden aangeleverd op ponskaarten, data worden gelezen van ponskaart, papertape of magneetband en computeroperators brengen de resultaten, uitgedrukt op kettingpapier enkele uren later uit de computerzaal, een plek waar de gebruiker meestal buiten gehouden werd. Tot ca 1985 zijn grote computers ofwel mainframes, zoals CDC6400, Nord100, Cyber173 en GOULD in gebruik geweest, waarna de PC snel terrein wint, aanvankelijk enkel als computer voor administratieve doeleinden (de MacIntosh) maar met name bij de theoretici is de ATARI een tijdje heel populair geweest. In 1985 is op het WCW terrein het 'ethernet based' local area network operationeel geworden.

Met de oprichting van het NIKHEF werd het mogelijk ook in Nederland aan detectorontwikkeling deel te nemen dankzij een omvangrijke technische ondersteuning. Het aantal medewerkers groeide en daarmee de mogelijkheid aan meerdere experimenten deel te nemen, ook buiten CERN verband, zoals bij DESY (Hamburg) of in Amerika bij SLAC en Fermilab. In dit overzicht zullen we alleen aandacht besteden aan de experimenten welke in CERN zijn gedaan.



Transport eerste drijtkamer vanuit SONCO op weg naar CERN. (1977)



Lichtgeleider voor scintillatietellers gebogen uit plexiglas

ACCMOR experiment

Een intensieve samenwerking met een groep van het Max Planck Instituut in München bracht de nodige technische kennis en heeft heel snel geleid tot de bouw van scintillatietellers en driftkamers; behalve het mechanische deel werd ook de elektronica, vereist voor de uitlezing van de signalen, door het NIKHEF gebouwd. De bouw vond plaats in een oud confectiepand (SONCO) aan de Plantage Muidergracht, waar de NIKHEF mechanische werkplaats was gevestigd tot de nieuwbouw in de Watergraafsmeer eind 1978 werd opgeleverd.

De samenwerking met München werd het begin van het ACCMOR experiment. Experimentele groepen uit Amsterdam- CERN- Cracow- München- Oxford en Rutherford bouwden samen een experimentele opstelling, een 'spectrometer', waarmee de botsingen van hadronen (energie 100-200 GeV) met protonen (later lichte kernen) bestudeerd werden. Deze collaboratie is gedurende ruim tien jaar zeer succesvol geweest. Diverse nieuwe technologieën zijn hier ontwikkeld en voor het eerst toegepast in een experimentele omgeving. Er is gebruik gemaakt van microprocessor systemen, o.a. de FAMP (Fast Amsterdam Microprocessor). In combinatie met de informatie van een vijftal door het NIKHEF gebouwde proportionele dradenkamers werd hiermee de impuls van de bij de botsing geproduceerde deeltjes 'on-line' berekend en konden bepaalde gebeurtenissen geselecteerd worden.

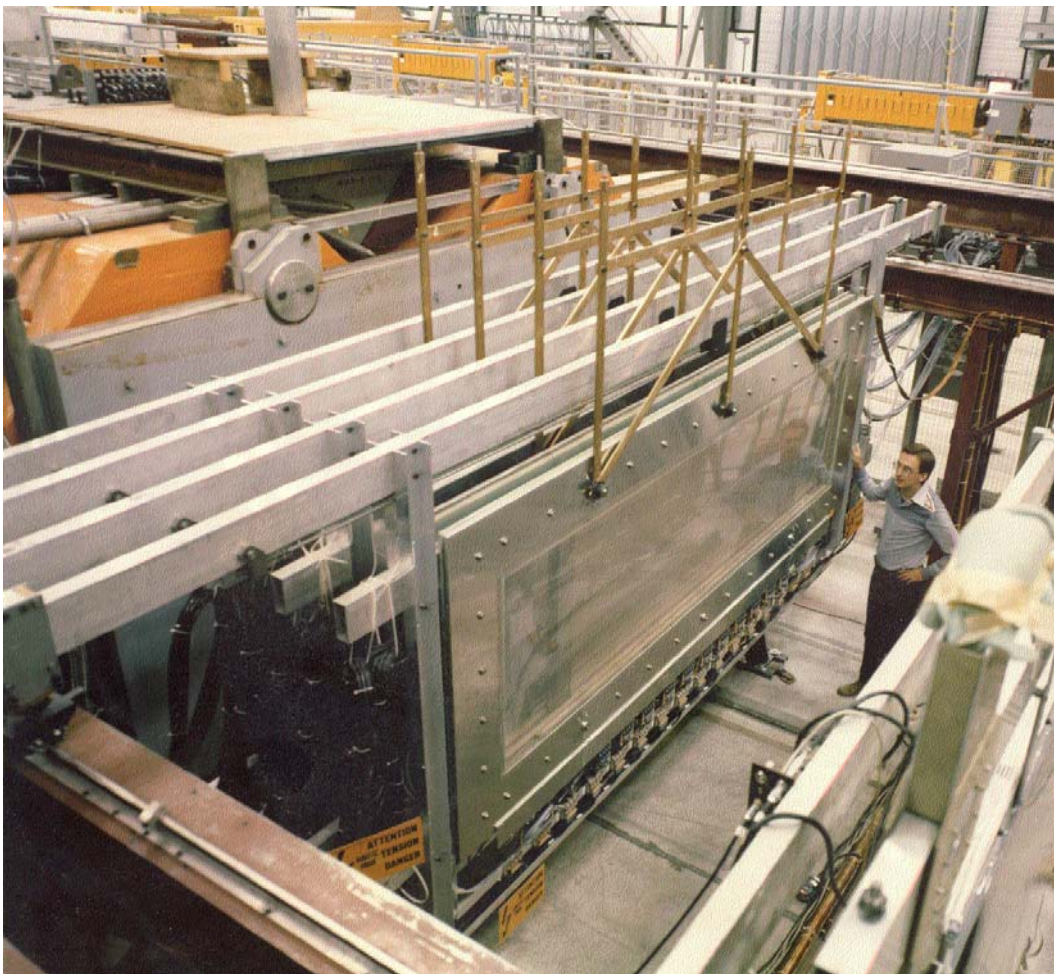
Een andere belangrijke ontwikkeling binnen het ACCMOR experiment was de toepassing van silicon strip detectoren. Rond 1980 hadden tests aangetoond dat met deze detectoren een fantastische positieresolutie kon worden gehaald, 10 micron! De München groep heeft toen een serie detectoren inclusief uitlees elektronica ontwikkeld en op die manier had het ACCMOR experiment de primeur een silicon strip telescoop te kunnen installeren voor en achter het target waarop de deeltjesbundel werd geschoten. Met zeer grote precisie kon vervolgens het interactiepunt gereconstrueerd worden. Deze ontwikkeling kwam precies op het juiste moment want de eerste 'charm' deeltjes waren net ontdekt bij de e^+e^- collider in SLAC. Met de ACCMOR spectrometer is in 1981 voor het eerst op systematische wijze de productie van charm deeltjes gemeten in hadronische interacties. De levensduur van de deeltjes bleek lang genoeg zodat het vervalpunt enkele honderden microns van de productievertex verwijderd was, voldoende om met de silicon strip detectoren gereconstrueerd te worden.

De meting van de productiekarakteristieken van charm deeltjes in hadronische interacties was een belangrijk resultaat en de bepaling van de levensduur van charm mesonen en hadronen heeft vele primeurs opgeleverd dankzij het feit dat silicon strip detectoren voor het eerst werden toegepast om secundaire vertices te meten. In 1984 is de telescoop uitgebreid met een aantal CCD's (Charge Coupled Devices), een prachtige detector ontwikkeld in Rutherford, waarmee een punt in de ruimte met 10 micron precisie gemeten werd.

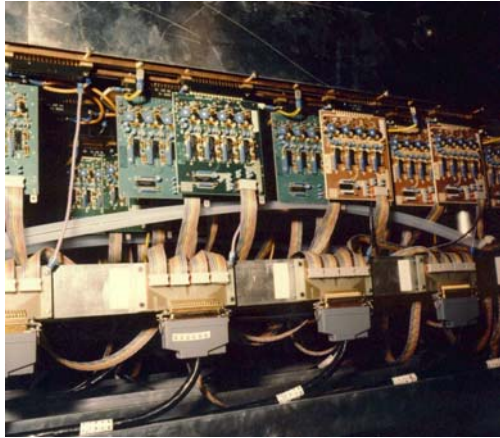


*Deeltjesbundel
op target*

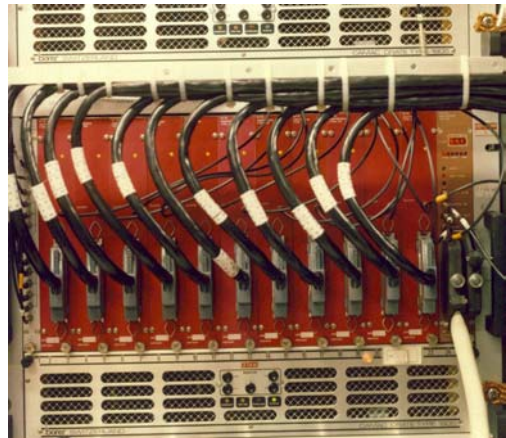
ACCMOR spectrometer in Noordhal bij CERN, 1979-1986



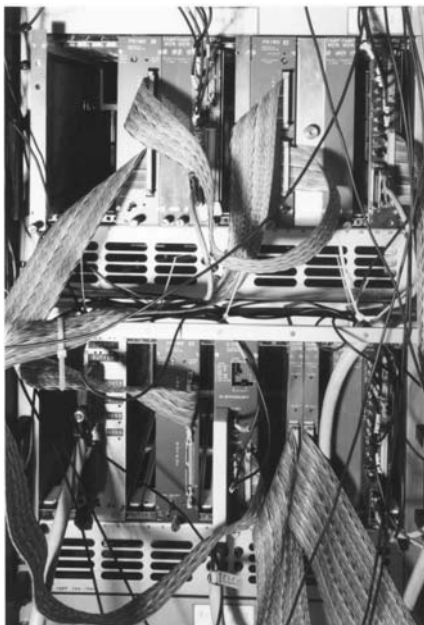
Dradenkamers gebouwd door NIKHEF, geïnstalleerd in ACCMOR experiment



Voorversterkers op driftkamer



Drift time recorder



FAMP systeem

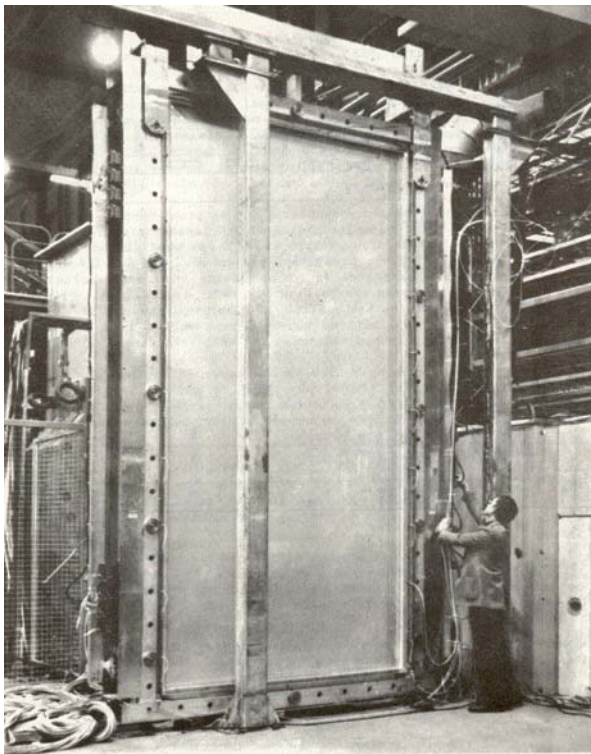


Siliconstrip detector waarmee verval van charm deeltjes voor het eerst is gemeten in 1981. De afmeting van de detector is $24 \times 36 \text{ mm}^2$

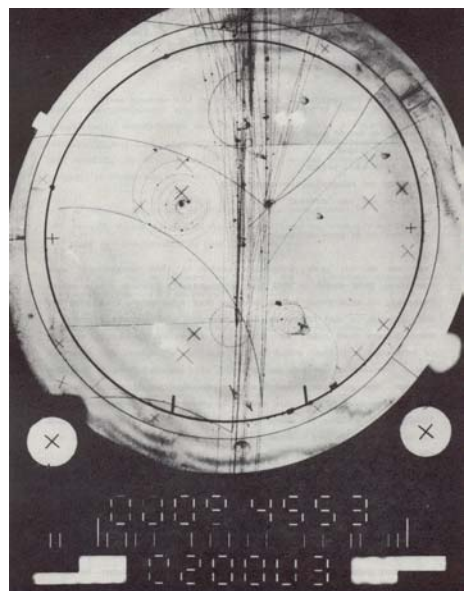
EHS experiment

Aansluitend op het glorie tijdperk van de bellenvatfysica is er een periode geweest dat men probeerde de voordelen van de bellenvat techniek en de zgn. teller experimenten te combineren om de tekortkomingen van het bellenvat bij hoge bundelenergieën te compenseren. Dit heeft geleid tot een aantal fraaie experimenten.

Het meest succesvol is de European Hybrid Spectrometer (EHS) geweest. Hier werd een snel expanderend bellenvat (RCBC) gevuld met vloeibare waterstof als target gebruikt, gevolgd door een magnetische spectrometer voorzien van velerlei detectoren zoals scintillatietellers, dradenkamers, Cerenkov teller voor deeltjes identificatie en een calorimeter. Op deze manier werd de superieure vertex informatie van het bellenvat gecombineerd met de betere impulsbepaling en deeltjesidentificatie van de spectrometer. Er is ge-experimenteerd met verschillende bellenvaten, LEBC, RCBC en een holografisch bellenvat HOLEBC. Het NIKHEF heeft vier grote dradenkamers gebouwd voor de EHS spectrometer, het eerste grote project waarmee de nieuwe mechanische werkplaats van het NIKHEF is ingewijd. De Nijmeegse groep heeft aan meerdere EHS experimenten deelgenomen, met als doel de studie van de hadronische wisselwerking bij bundel energieën van 250-360 GeV. Hierbij kon goed gebruik gemaakt worden van de beschikbare scan- en meetapparatuur.



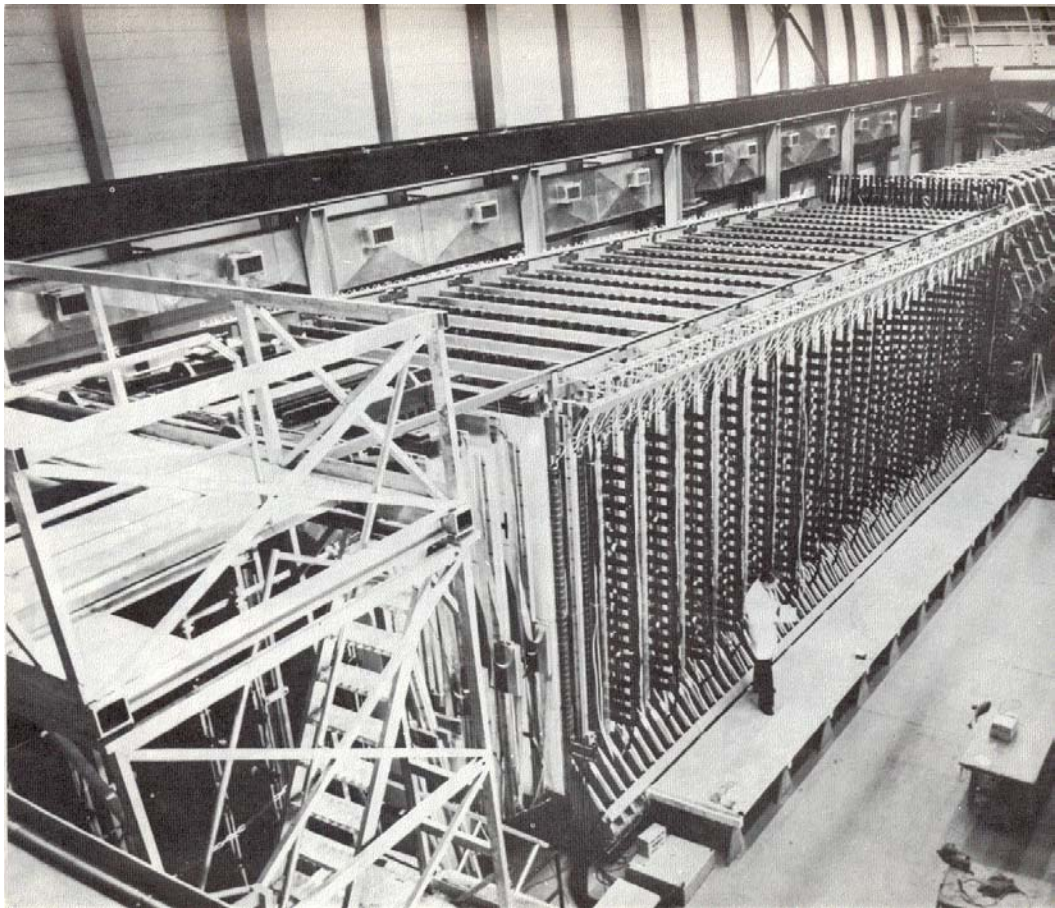
*EHS driftkamer gebouwd door NIKHEF
in de bundel op CERN*



Opname gemaakt met RCBC

CHARM experiment

Dankzij initiatieven van individuele fysici is bij de start van het NIKHEF aansluiting gezocht bij diverse experimenten om de expertise zo breed mogelijk te maken. Zo heeft een NIKHEF groep deel uitgemaakt van een neutrino ‘teller’ experiment om de neutrale stroom interactie te bestuderen. Dit experiment met het acroniem CHARM (waar de A staat voor Amsterdam) viel vooral op door het target dat was gekozen, te weten 200 ton marmer, verdeeld over 78 platen (3 x 3 meter en 8 cm dik in de bundelrichting). Met scintillatietellers gemonteerd tussen de platen werden de neutrino interacties gedetecteerd. De hardware bijdrage van het NIKHEF heeft zich beperkt tot het ontwerpen en construeren van de uitlees elektronica van de scintillatorsignalen.



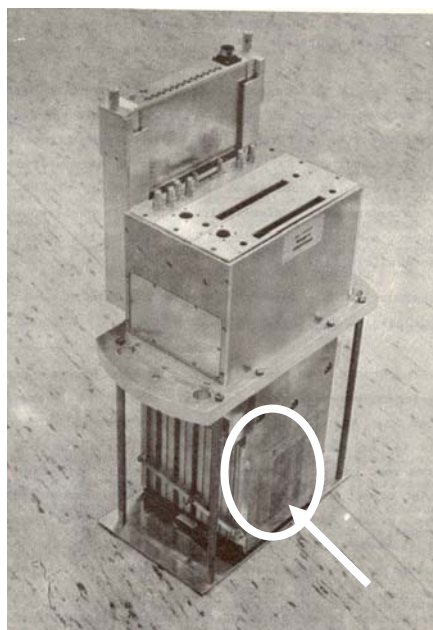
CHARM spectrometer 1977-1983

UA1 experiment

In het jaarverslag van 1979 wordt voor het eerst melding gemaakt van een NIKHEF activiteit met betrekking tot de proton-anti-proton botser welke in het SPS gerealiseerd gaat worden en in 1981 in bedrijf komt. Hier zullen 270 GeV protonen en antiprotonen met elkaar in botsing gebracht worden, op jacht naar de intermediaire vectorbosonen, het W en Z deeltje waarvan de massa inmiddels bij benadering bekend was. Een NIKHEF groep maakte destijds deel uit van een collaboratie onder leiding van prof. Ting. Een voorstel van deze collaboratie een experiment te doen bij deze nieuwe versneller werd door het CERN management afgewezen. Zodoende is het NIKHEF niet vanaf het begin betrokken geweest bij een van de twee grote experimenten UA1 en UA2 (Underground Area 1 en 2). Men hoorde overigens ook vaak de twijfel uitspreken dat het toch wel zeer moeilijk, zo niet onmogelijk, zou zijn om uit de brei van deeltjes die bij dergelijke energieën geproduceerd werden de paar gebeurtenissen te selecteren om de ontdekking van de nieuwe deeltjes te kunnen claimen. Na de hectische beginfase, waarin het W en Z deeltje ontdekt werden, is NIKHEF officieel lid van de UA1 collaboratie geworden en heeft een microprocessor systeem (FAMP) nog goede diensten bewezen voor de tweede niveau muon trigger.

UA4 experiment

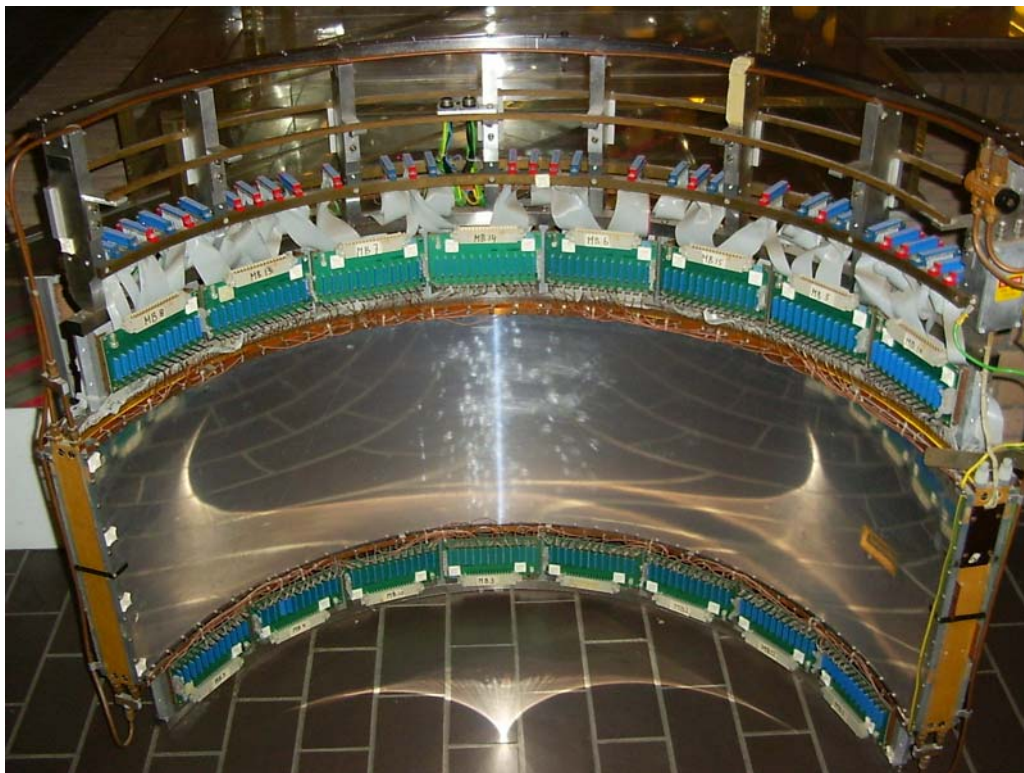
Wel heeft een NIKHEF groep een prominente rol gespeeld bij de voorbereiding van het UA4 experiment, waar o.a. de totale werkzame doorsnede van de proton-anti-proton botsingen werden gemeten, een totaal onontgonnen gebied bij deze bundelenergieën. De detectoren, waaronder kleine dradenkamers gemaakt door het NIKHEF, werden opgesteld 40m ter weerszijden van het UA2 experiment. Deze werden heel dicht bij de bundellijn gepositioneerd om de elastisch verstrooide (anti) protonen te kunnen detecteren.



Pakket dradenkamertjes UA4, 1979-1985

LEAR

Het fysica programma met LEAR, de Low Energy Antiproton Ring, vormt een spin-off van het anti-proton project op CERN dat gericht was op de studie van zeer intense anti-proton bundels nodig om de ontdekking van de intermediaire bosonen mogelijk te maken. LEAR een kleine opslagring met een diameter van slechts 20 meter kon zeer intense anti-proton bundels opslaan met een energie tussen 0.1 en 2 GeV. Stochastische koelsystemen zorgden voor een goede bundelkwaliteit. Alle manipulaties welke nodig waren om anti-protonen op een efficiënte manier in het SPS te krijgen werden hier getest. Eind 1982 komt de ring beschikbaar voor andere experimenten. Het energiegebied is ook zeer aantrekkelijk voor kernfysische experimenten. Dit is mogelijk ook een van de redenen dat het NIKHEF experimenten bij LEAR heeft gestart; in ieder geval hebben vele fysici een kernfysische achtergrond. Het SING experiment was het meest omvangrijk. Hier werd de totale werkzame doorsnede en twee deeltjes eindtoestanden gemeten voor proton-anti-proton botsingen met een bundelimpuls van 250-600 MeV/c. Het NIKHEF heeft voor het SING experiment o.a. een cirkelvormige dradenkamer gebouwd, opgesteld rondom het interactiepunt.



Helpt van de cirkelvormige dradenkamer van het SING experiment



Het NIKHEF gebouw (ca 1990).



Technische tekeningen op het bord (ca 1990).

Periode 1986-2004

In oktober 1981 wordt het project LEP (Large Electron Positron collider) officieel goedgekeurd door de Council van CERN. Er gaat een tunnel gegraven worden met een omtrek van 27 km, 60-150 m onder de grond, waar de nieuwe versneller geïnstalleerd moet worden. Elektronen en positronen worden met elkaar in botsing gebracht. Aanvankelijk zal de zwaartepuntsenergie ca 90 GeV zijn voor de studie van de eigenschappen van het Z-deeltje; vervolgens is het plan deze te verhogen tot ca 200 GeV om W- paarproductie te onderzoeken. Op vier plaatsen rond de ring zullen experimenten opgesteld worden om de botsingen te bestuderen. De doorsnede van de tunnel moet groot genoeg zijn om in de toekomst een proton-proton botser te kunnen huisvesten.

In 1982 is al duidelijk dat NIKHEF aan twee (van de vier) LEP experimenten gaat deelnemen. De technische afdelingen van het NIKHEF, met haar prachtige nieuwbouw, hebben al een goede reputatie opgebouwd bij de collega fysici met als gevolg dat het NIKHEF verantwoordelijk wordt voor het ontwerp en de productie van belangrijke delen van de te bouwen experimenten, waarvan de omvang groter is dan ooit tevoren.



NIKHEF medewerkers aan de bouw van de L3 muonkamers (ca 1988)

Hoewel de activiteiten op CERN hoofdzakelijk geconcentreerd zijn op de organisatie rond het bouwen van de LEP versneller en de vier experimenten, is er in diezelfde periode nog een intensief fysica programma gaande met behulp van een hoge intensiteit muonenbundel, een secundaire bundel van het SPS. Verder is er het zware ionen programma, waar o.a. lood en goud kernen versneld worden in het SPS en na extractie in botsing worden gebracht met diverse targets. Aan beide programma's hebben NIKHEF fysici meegewerkt.

NMC,SMC experiment

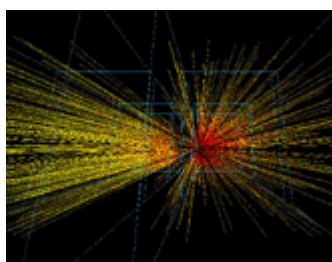
De New Muon Collaboration en de Spin Muon Collaboration waren opvolgers van de European Muon Collaboration die het fysica programma met een muonenbundel afkomstig van het SPS in een apart gebouwde experimenteerhal startte in 1982.

Hoofddoel van het NMC experiment was de meting van de proton en neutron structuur functie, terwijl SMC gebruik maakte van een gepolariseerd target en bijgevolg toegang had tot de meting van gepolariseerde structuurfuncties. Het NIKHEF heeft voor het SMC experiment een aantal grote driftkamers gebouwd en een groot aandeel gehad in de bouw van het gepolariseerde target. De expertise op het gebied van vacuüm techniek verkregen bij de bouw van de elektronen versnellers op het NIKHEF kwam hier goed van pas.

Aansluitend op een onderzoeksproject binnen de instrumentatie afdeling betreffende de ontwikkeling van een nieuw type detector heeft het NIKHEF voor het SMC experiment een telescoop van MSGC detectoren gebouwd. De MicroStrip Gas Chamber kon met zeer hoge resolutie de positie van een geladen deeltje bepalen en was daarom geschikt als vertex detector voor SMC, waar het target uit twee secties was opgebouwd.

Zware ionen experimenten

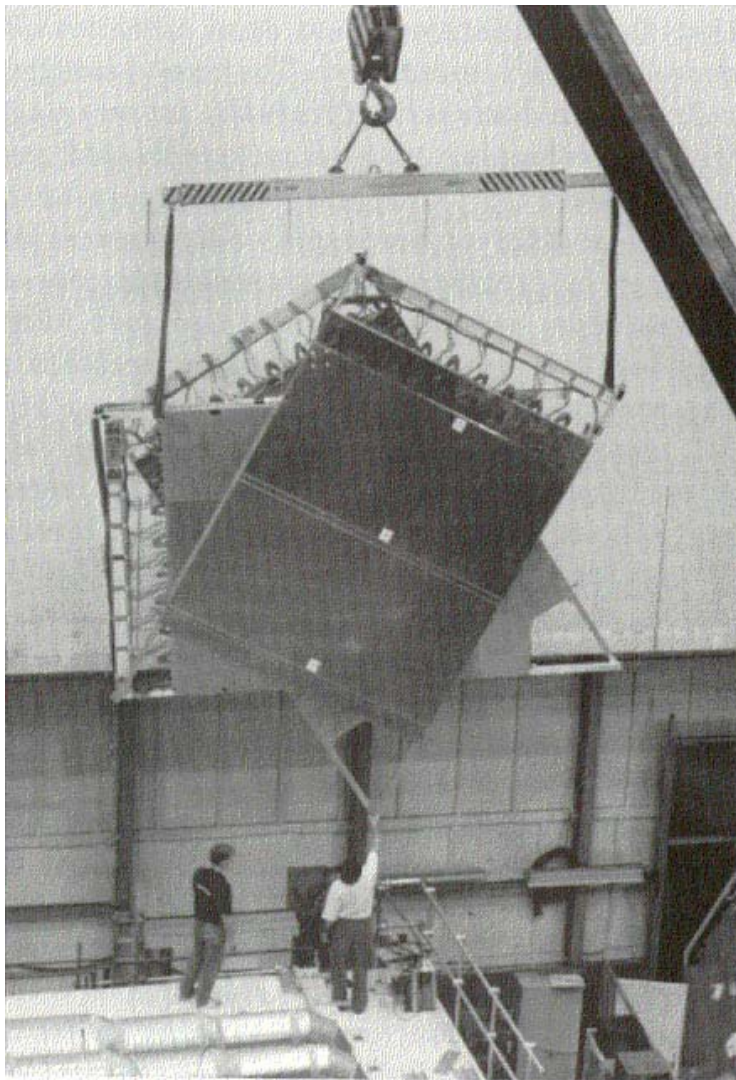
Het zware ionen programma omvat de studie van botsingsprocessen tussen zware kernen, zoals lood, zwavel en goud. Het doel is aanwijzingen te vinden voor de vorming van een quark gluon plasma, een nieuw soort materie toestand dat gevormd kan worden bij heel hoge energiedichtheden. Het NIKHEF heeft aan de analyse van een drietal experimenten gewerkt welke bij het SPS zijn uitgevoerd. Begin 2000 heeft CERN een persconferentie gegeven met de boodschap dat de combinatie van de resultaten van de experimenten duidelijke aanwijzingen geven voor het bestaan van een nieuwe materie toestand in overeenstemming met theoretische voorspellingen. Hogere bundelenergieën zijn echter nodig om de eigenschappen van het quark gluon plasma in kaart te brengen.



*Zware ionen botsing gemeten
door het NA49 experiment*

CHORUS experiment

Het laatste 'fixed target' experiment waaraan het NIKHEF heeft meegewerkt was opgesteld in de neutrino bundel afkomstig van het SPS. Dit experiment was op zoek naar neutrino oscillaties $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ met behulp van een pakket emulsie als actief target. Voor de spectrometer heeft het NIKHEF een scintillator array gebouwd, samen met een trigger en data acquisitie systeem. In een ietwat later stadium is meegewerkt aan het scan systeem voor de emulsies en kwam een serie honeycomb dradenkamers (een nieuwe detector ontwikkeld door NIKHEF voor toekomstige experimenten) goed van pas als muon detector. Helaas bleek de ontdekking van neutrino oscillaties voor CHORUS een stap te ver te zijn.



De honeycomb dradenkamer van CHORUS gebouwd door NIKHEF. 18 vlakken worden geïnstalleerd in de detector.

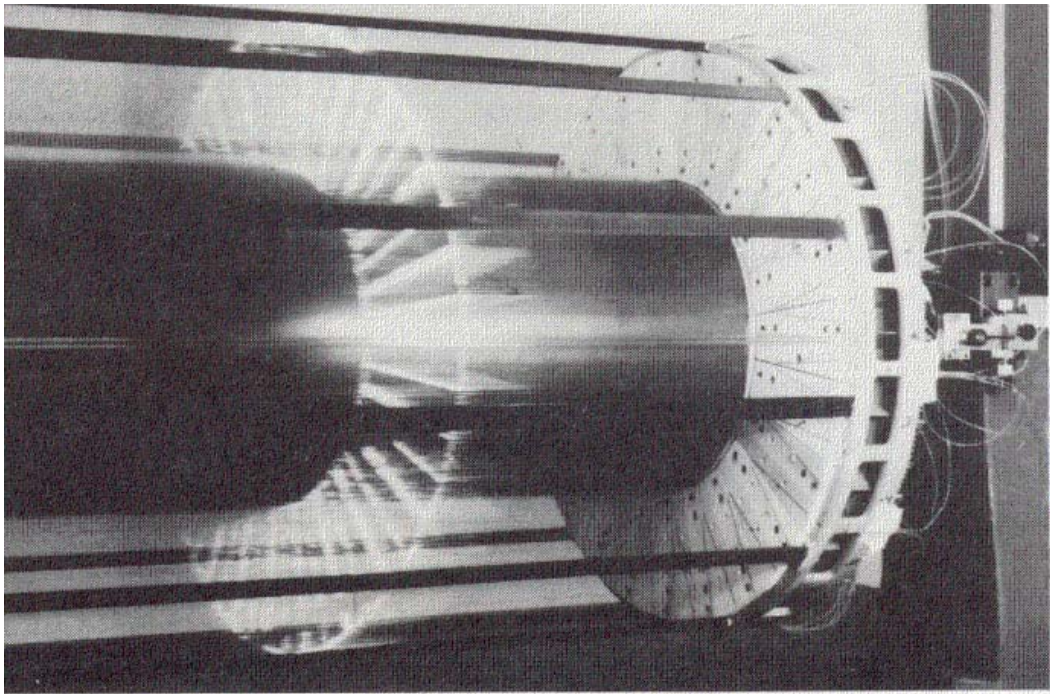
De LEP experimenten

De bouw van de LEP experimenten legde een zware claim op de capaciteit van alle technische afdelingen. Met de komst van een nieuwe versneller en het besef dat een hermetische, zgn multi purpose detector een absolute noodzaak was is de schaalvergroting bij de hoge energiefysica experimenten ingezet. Voor twee experimenten, het DELPHI en het L3 experiment moest in een vrij kort tijdsbestek een groot aantal detectoronderdelen gemaakt worden.

DELPHI experiment

Voor het DELPHI experiment heeft NIKHEF de cilindrische dradenkamer, de binnenste 'tracking' detector, gebouwd, alsmede de uitleeselektronica en de nodige 'Fastbus' modules voor de trigger elektronica. Deze kamer is tijdens de energie upgrade van LEP vervangen door een grotere, ook gebouwd door NIKHEF.

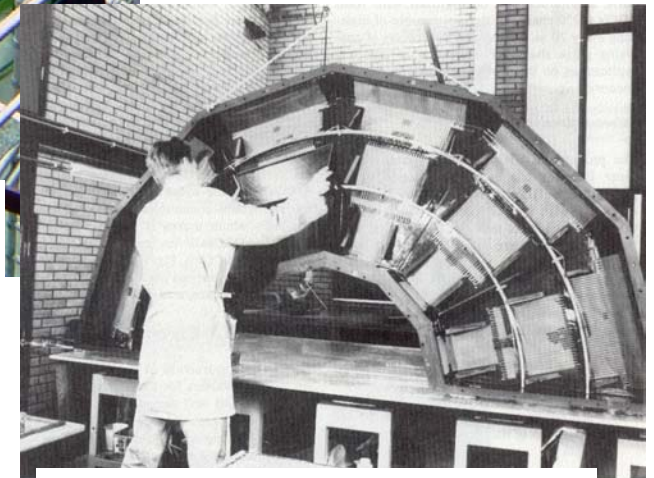
Voor de RICH (Ring Imaging Cherenkov) zijn oa kleine dradenkamers gebouwd voor de detectie van de 'ringen'. Ook de draagstructuur voor de Barrel RICH, een imposante cylinder, 4 meter diameter en 4 meter lang, met de nodige krappe toleranties, is door NIKHEF 'gewalst' en gelast; tenslotte zijn voor de endcap RICH de vloeistof radiator elementen geconstrueerd.



De cilindrische dradenkamer van DELPHI gebouwd door NIKHEF

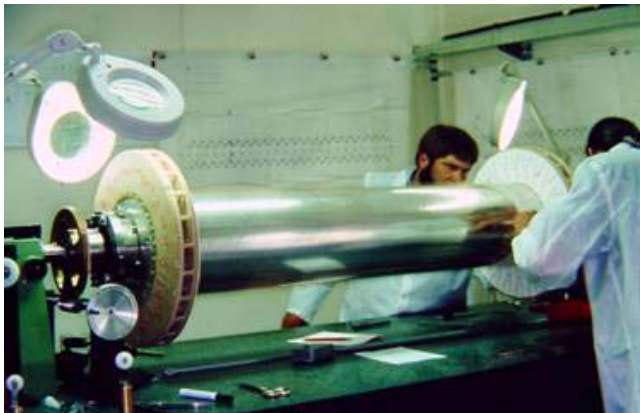


*Cylinder voor ondersteuning van
barrel Rich DELPHI*



Fig

Assemblage onderdeel endcap RICH



Upgrade innerdetector van DELPHI

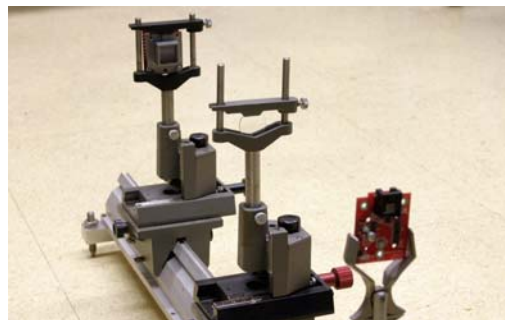
L3 experiment

Het L3 experiment is zodanig ontworpen dat de meting van individuele elektronen en muonen op een zo nauwkeurig mogelijke manier zou geschieden en bijgevolg de meting van de vervalsproducten van het W en Z deeltje optimaal zou zijn.

Het NIKHEF heeft 34 grote dradenkamers gemaakt voor de detectie van muonen. Een belangrijk deel van de uitleeselektronica en het muon triggersysteem is ontworpen en geproduceerd door de elektronica-afdeling. Een aparte ontwikkeling op de afdeling instrumentatie was de stikstof laser, gebruikt voor de calibratie van drifttijden in de dradenkamers, en een uitlijnsysteem (mbv een LED en CCD) voor de onderlinge positionering van dradenkamers binnen grote experimentele opstellingen. Dit systeem heeft onder de naam RASNIK grote bekendheid verworven; een sterk gemoderniseerde versie is ontwikkeld voor de toekomstige LHC experimenten. Voor een upgrade project van de luminositeitsmonitor heeft het NIKHEF in 1992 een siliconetracker gebouwd welke in combinatie met een elektromagnetische calorimeter de positie en energie van het verstrooide elektron onder heel kleine hoek kon meten. Dit project was een van de eerste activiteiten op het gebied van silicium stripdetectoren op het NIKHEF.



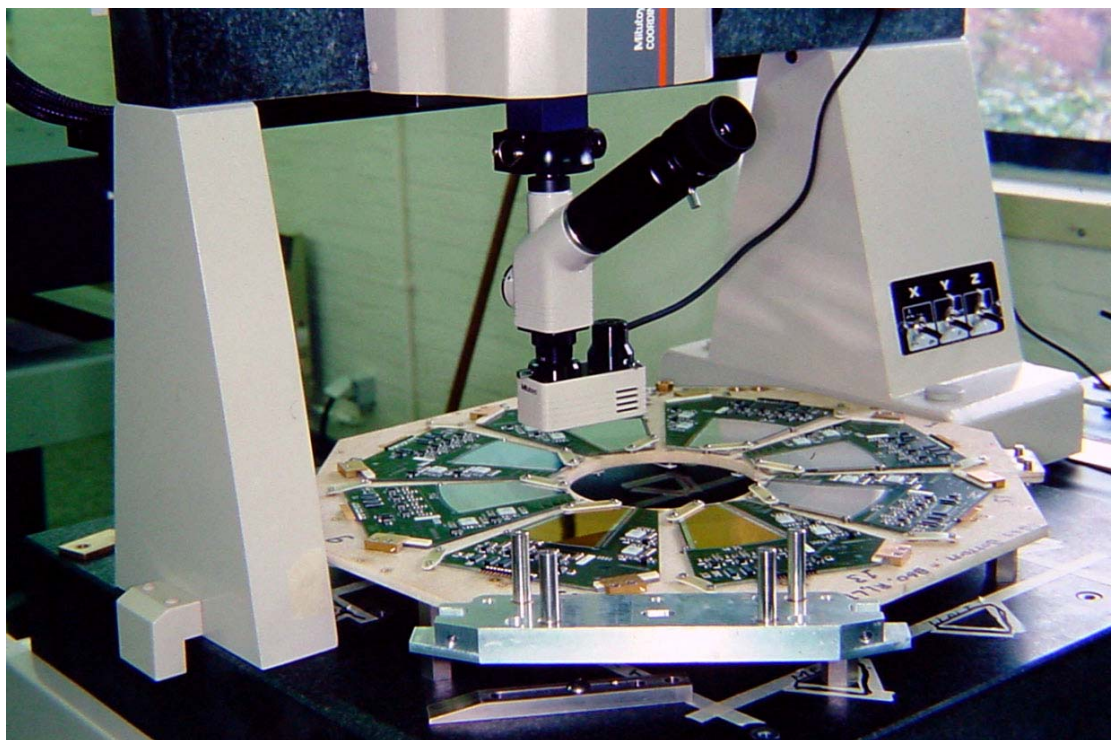
Werken aan L3 muonkamer



RASNIK opstelling

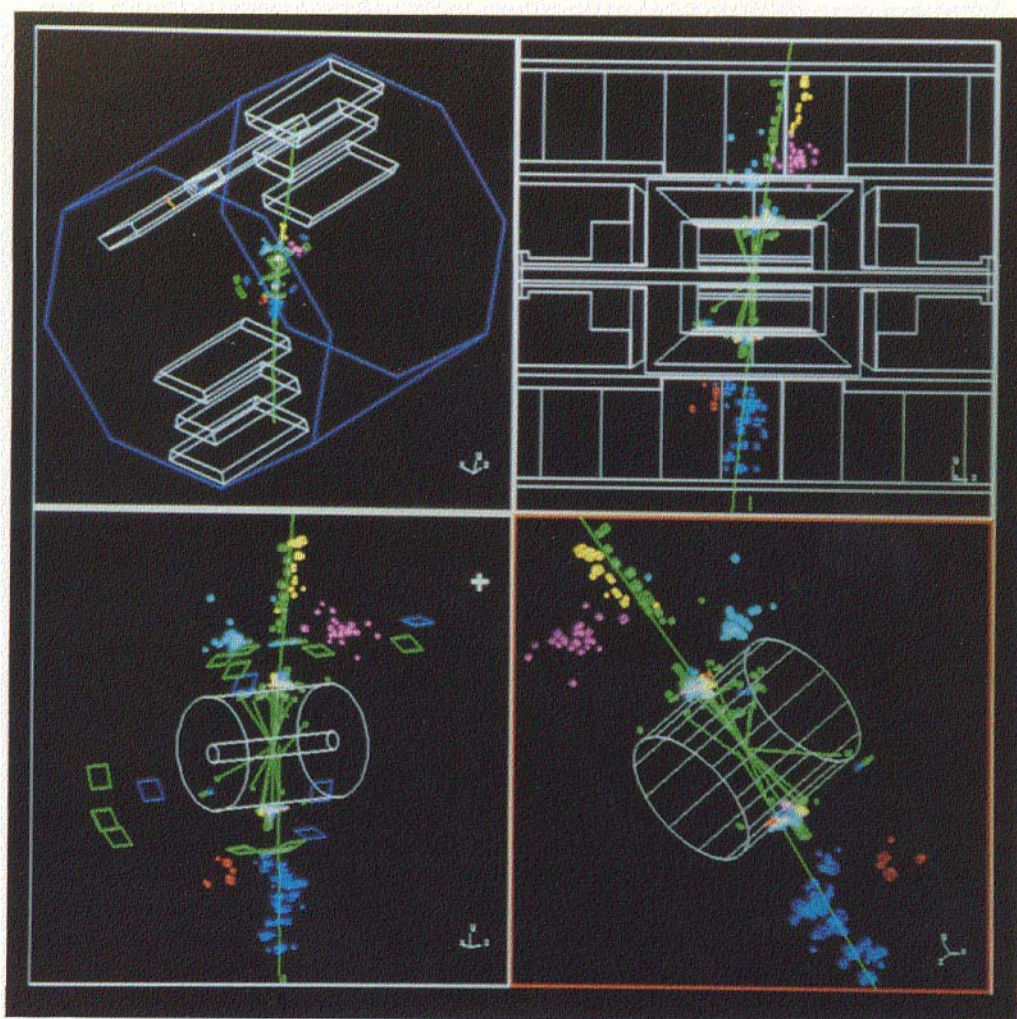


Laserbox L3



Precisiemeting silicontracker L3

Hoewel de ontwikkeling van computer programma's voor reconstructie van experimentele data in dit rapport niet aan bod komen vermelden we hier de (NIKHEF) inspanningen binnen de L3 collaboratie op het gebied van de visualisatie van deeltjes botsingen. Met name bij de botsende bundel experimenten, waar de detector opgebouwd is uit lagen, die elk een eigen functie hebben bij de reconstructie en identificatie van de geproduceerde deeltjes vormt een eventdisplay een onmisbaar hulpmiddel.

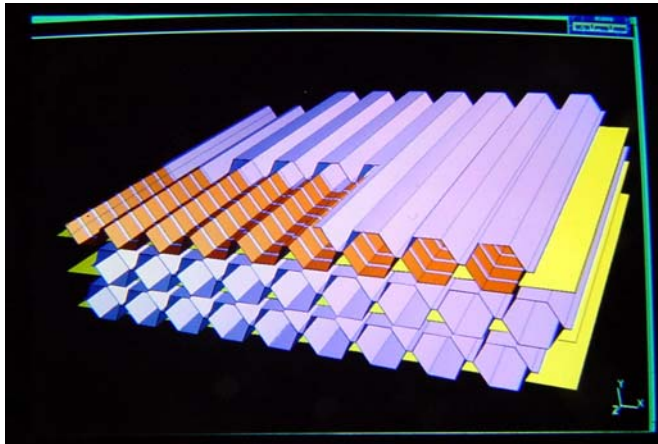


Voorbeelden van een inter-actief event display, ontwikkeld op het NIKHEF voor het L3 experiment. Alle detector onderdelen kunnen onderzocht worden op de aanwezigheid van een signaal. Op spectaculaire wijze worden de botsingen van elementaire deeltjes in beeld gebracht.

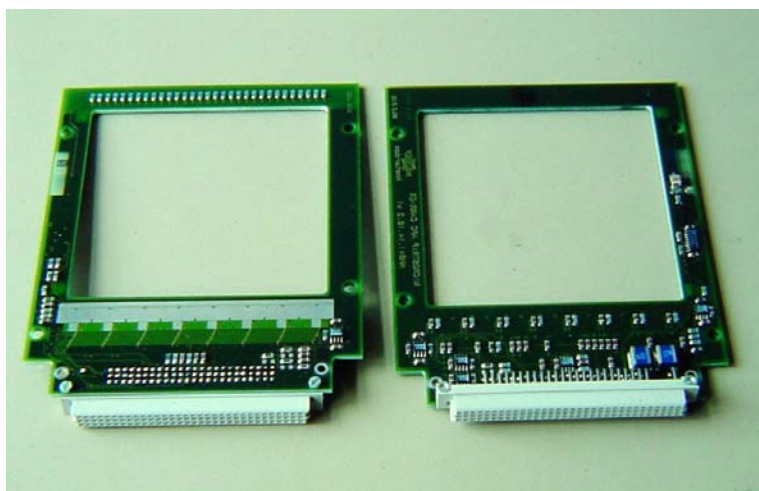
LHC

De eerste voorbereidingen voor de Large Hadron Collider experimenten dateren al van 1991. Binnen de instrumentatiegroep werd een prototype gebouwd van een nieuw type driftkamer, de 'Honeycomb'kamer, waarin de doorsnede van de driftcellen een honingraat structuur hebben. Tegelijkertijd werd er gewerkt aan een detector waarmee een zeer hoge positieresolutie kon worden verkregen, de Micro-Strip Gas Chamber, MSGC. Deze zou mogelijk een concurrent kunnen worden voor silicium strip sensoren omdat het zich liet aanzien dat de prijs aanmerkelijk lager zou kunnen worden. Dit laatste was een belangrijk gegeven aangezien de nieuwe experimenten bij LHC een groot aantal vierkante meters nodig zouden hebben.

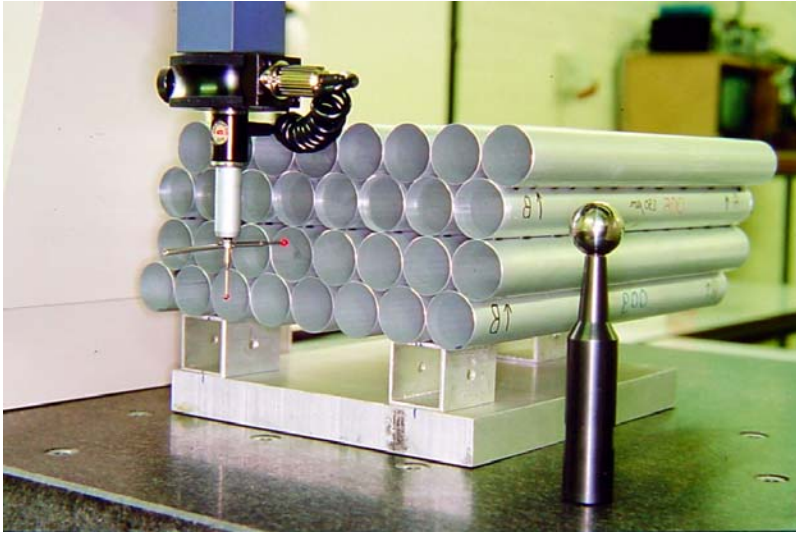
Na de prototype fase zijn beide detectoren succesvol toegepast in fixed target experimenten, maar is uiteindelijk besloten dat deze voor de LHC experimenten niet gebruikt zullen worden.



Ontwerp voor Honeycomb dradenkamer



Frames voor MSGC



Het begin van de MDT's voor ATLAS.....



En de eerste MDT detector uit een serie van 100

Hoewel de eerste ideeën over de layout van de experimenten al sinds 1992 besproken werden is de LHC pas in December 1994 officieel goedgekeurd door de CERN Council. Als wetenschappelijk directeur van CERN (1989-1994) heeft Walter Hoogland (directeur NIKHEF 1983-1989) een belangrijke rol gespeeld bij het tot stand komen van deze beslissing.

Op het NIKHEF wordt in 1994 besloten dat er slechts aan één ‘multipurpose’ experiment kan worden deelgenomen, het experiment dat uiteindelijk de naam **ATLAS** zou krijgen. Het heeft echter niet lang geduurd of het NIKHEF had ook de nodige bemoeienis met het heavy ion experiment **ALICE** en met **LHC-b**, het experiment dat CP violatie gaat meten in vele verschillende B-verval modes.

De productie van vele detectoronderdelen voor alle drie experimenten is in volle gang.

Voor ATLAS worden 100 grote muon kamers (Monitored Drift Tubes) gebouwd en een groot deel van de endcap silicon tracker.

Voor LHC-b worden een groot aantal dradenvlakken gebouwd, nodig voor de reconstructie van de deeltjes afkomstig van het B-verval. De vlakken worden gevormd door zgn. strootjes ofwel Straw Tubes, gevuld met een gas en een signaaldraad gemonteerd op de ‘as van de cylinder’. Een belangrijk onderdeel van het LHC-b experiment is de Vertex Locator (VELO), een zeer gecompliceerde mechanische constructie welke het mogelijk maakt om de silicon stripdetectoren, die de primaire en secundaire vertices moeten reconstrueren, zo dicht mogelijk bij de primaire protonbundel te plaatsen.

Tenslotte wordt voor ALICE een aanzienlijk deel van de silicon vertex detector gebouwd.

Voor alle projecten zijn modules in ontwikkeling voor de uitlezing van de signalen en hun calibratie; tevens worden triggersystemen ontwikkeld om de gegevens welke beschikbaar komen bij de botsingen te kunnen filteren opdat alleen de meest interessante gebeurtenissen overblijven.

Door CERN wordt nu alles gedaan om de LHC versneller in 2007 operationeel te hebben, een uitdaging waarbij Jos Engelen (directeur NIKHEF 2002-2003) als wetenschappelijk directeur van CERN (2004-) een grote rol zal spelen.

Referenties:

- [1] CERN History, 3 volumes, A.Hermann et al. 1987.
- [2] '25 jaar hoge energie fysica' J.Kluyver, S.Wouthuysen. FOM Jaarverslag 1970
- [3] 'Van kosmische straling tot NIKHEF sectie H' B.Jongejans Jaarverslag 1978 NIKHEF-H