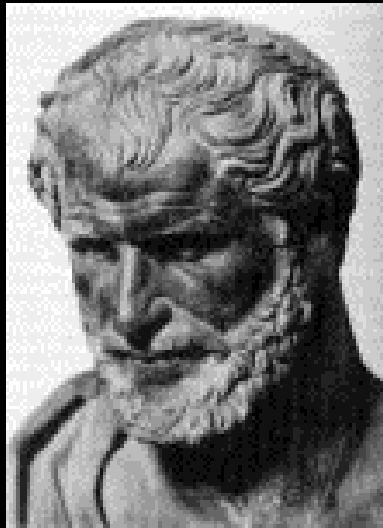




# Nieuwe Grenzen: de 'Large Hadron Collider' (I)

# Van ~400 jaren B.C. tot ~1869



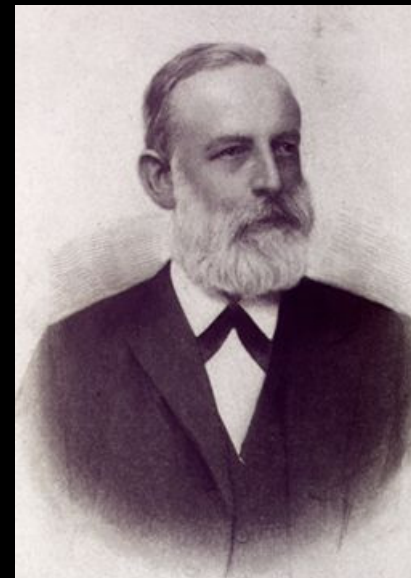
*"Er is niets anders dan atomen en ruimte,  
al het andere is een mening"*  
Democritus van Abdera

Dmitry Ivanovich Mendeleev



Julius Lothar Meyer

group	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18										
Ia	IIa	IIIa**	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	VIIIb	VIIIc	IXa	Xa	XIa	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb										
1	H												B	C	N	O	F	Ne										
2	Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar										
3	Na	Mg	IIIb***	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb					Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										
7	Fr	Ra	Ac	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****										
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71												
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu												
			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103												
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr												



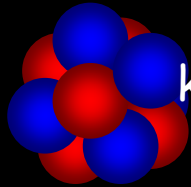
\* Numbering system recommended by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)  
 \*\* Previous IUPAC numbering system  
 \*\*\* Numbering system recommended by the Chemical Abstracts Service  
 \*\*\*\* For the names of elements 104-112, see Table 27.

# Focus op het atoom...

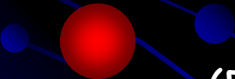
(- met de ontdekking van o.a. "straling" -)



1897  
elektron  
(Thomson)



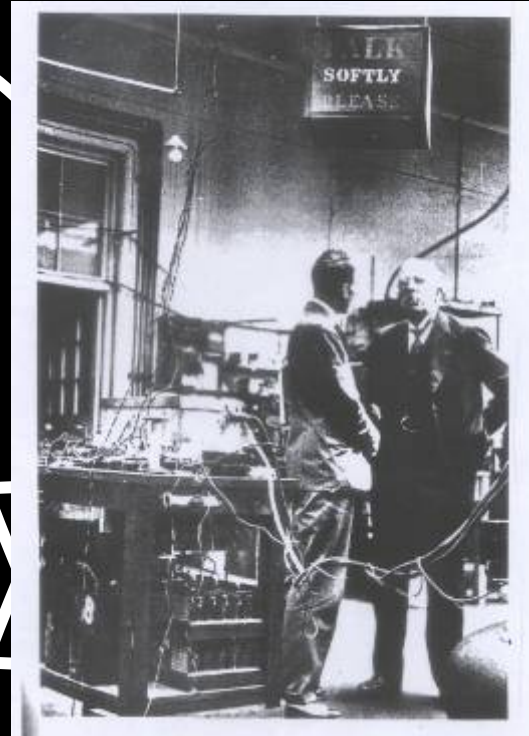
1911  
kern - "nucleus"  
(Rutherford)



1911  
proton  
(Rutherford)

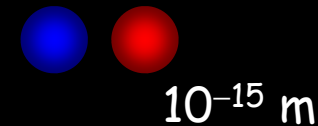
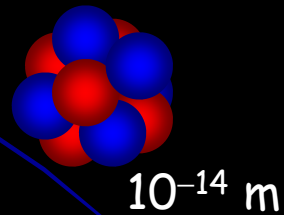
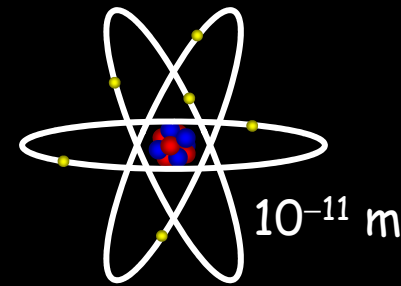
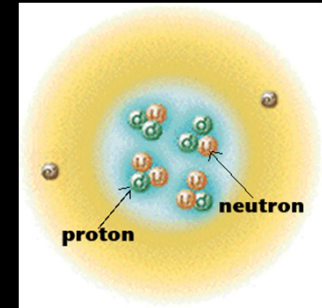
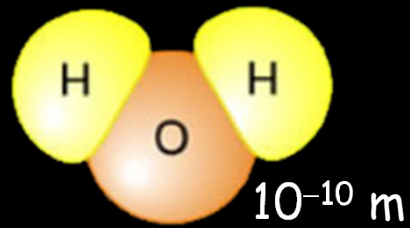


1932  
neutron  
(Chadwick)



*"It was the most incredible event that ever happened in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you"*

# ...op zoek naar de meest elementaire bouwstenen...



?



# "Klein zien"



- De golflengte van de straling waarmee een object onderzocht wordt moet kleiner zijn dan de afmetingen van het object zelf!
- DeBroglie (1924): golflengte  $\sim 1/p$   
met  $p = \text{impuls} (= mv)$   
(kin. energie  $= \frac{1}{2} p^2/m = \frac{1}{2} mv^2$ )
- Hoge energie = klein object

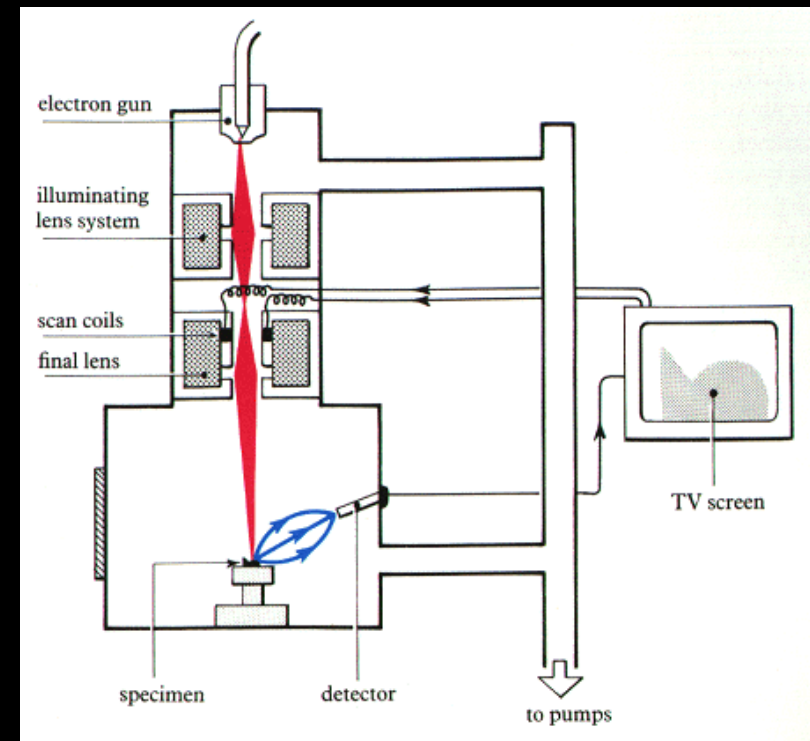


# "Oplossend vermogen" microscoop

De golflengte van de straling waarmee een object onderzocht wordt moet kleiner zijn dan de afmetingen van het object zelf:

$$\lambda \ll \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

Object:	Afmeting:	Stralingsenergie:
atoom	$10^{-10}$ m	0.00001 GeV ( $e^-$ )
kern	$10^{-14}$ m	0.01 GeV ( $\alpha$ )
nucleon	$10^{-15}$ m	0.1 GeV ( $e^-$ )
quark	?	> 1 GeV (*)

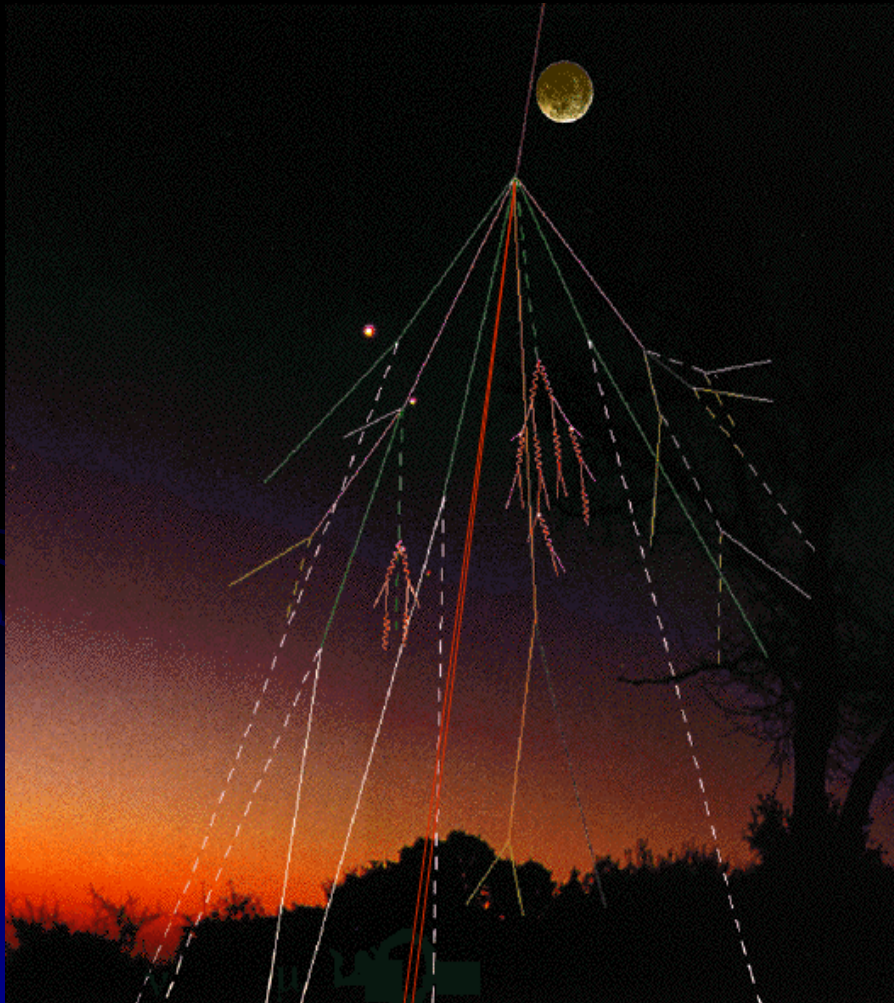


(\*) 1 GeV =  $10^9$  eV

# Wat betekent 1 eV aan "energie"?

Bewegende luchtmoleculen	1/40 eV
Licht van een lamp	$\sim 1$ eV
Röntgen apparaat in ziekenhuis	$\sim 1$ keV ( $10^3$ )
Radioactieve bron	1 - 10 MeV ( $10^6$ )
Lage energie kosmische straling	1 GeV ( $10^9$ )
"Large Hadron Collider"	14 TeV ( $10^{12}$ )
Ultra hoge energie kosmische straling	$\sim 10^{20}$ eV

# Kosmische straling: Lawines van deeltjes op aarde

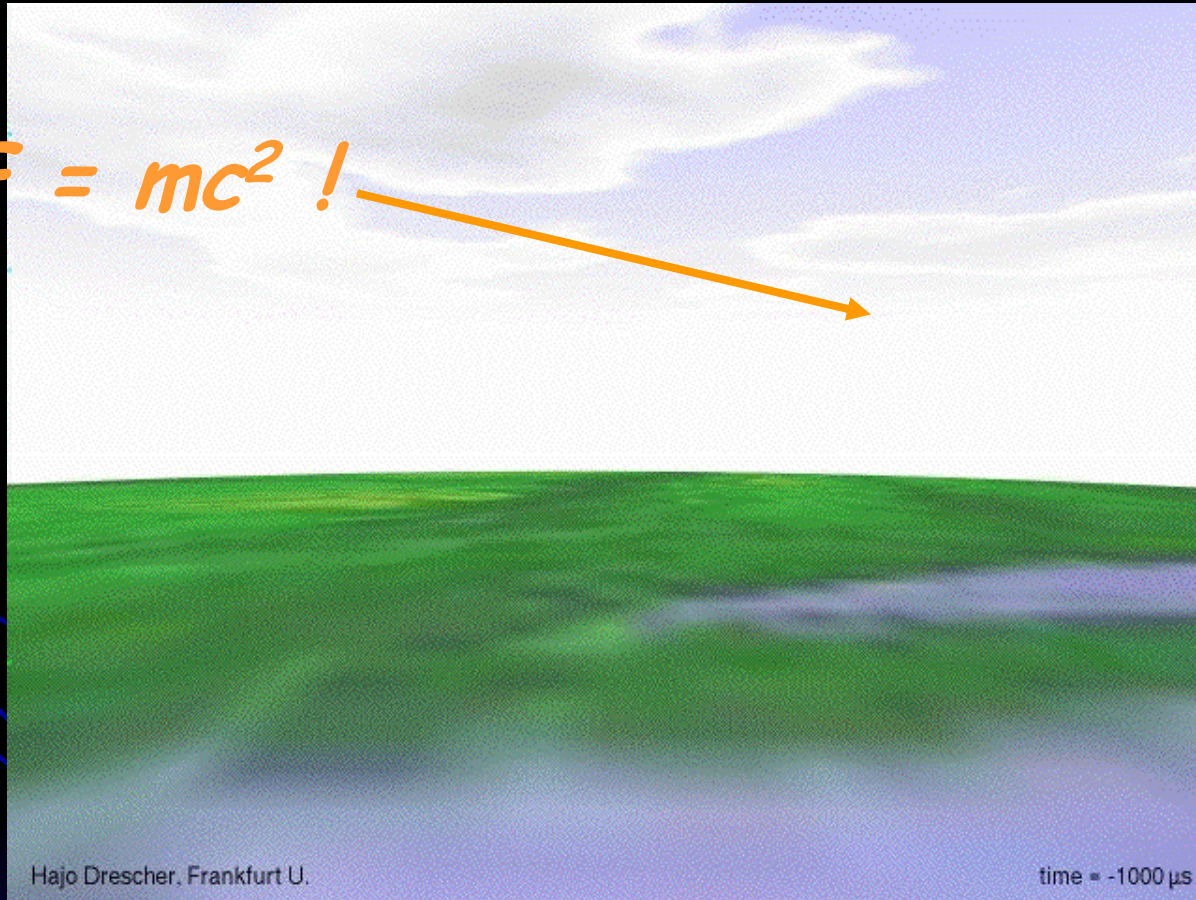


- Afhankelijk van de energie en het type deeltje, begint de lawine op  $\sim 40$  km hoogte
- Op  $\sim 10$  km hoogte is het aantal deeltjes maximaal
- Op aarde zijn alleen secundaire deeltjes over (muonen, elektronen, fotonen, protonen, neutronen)



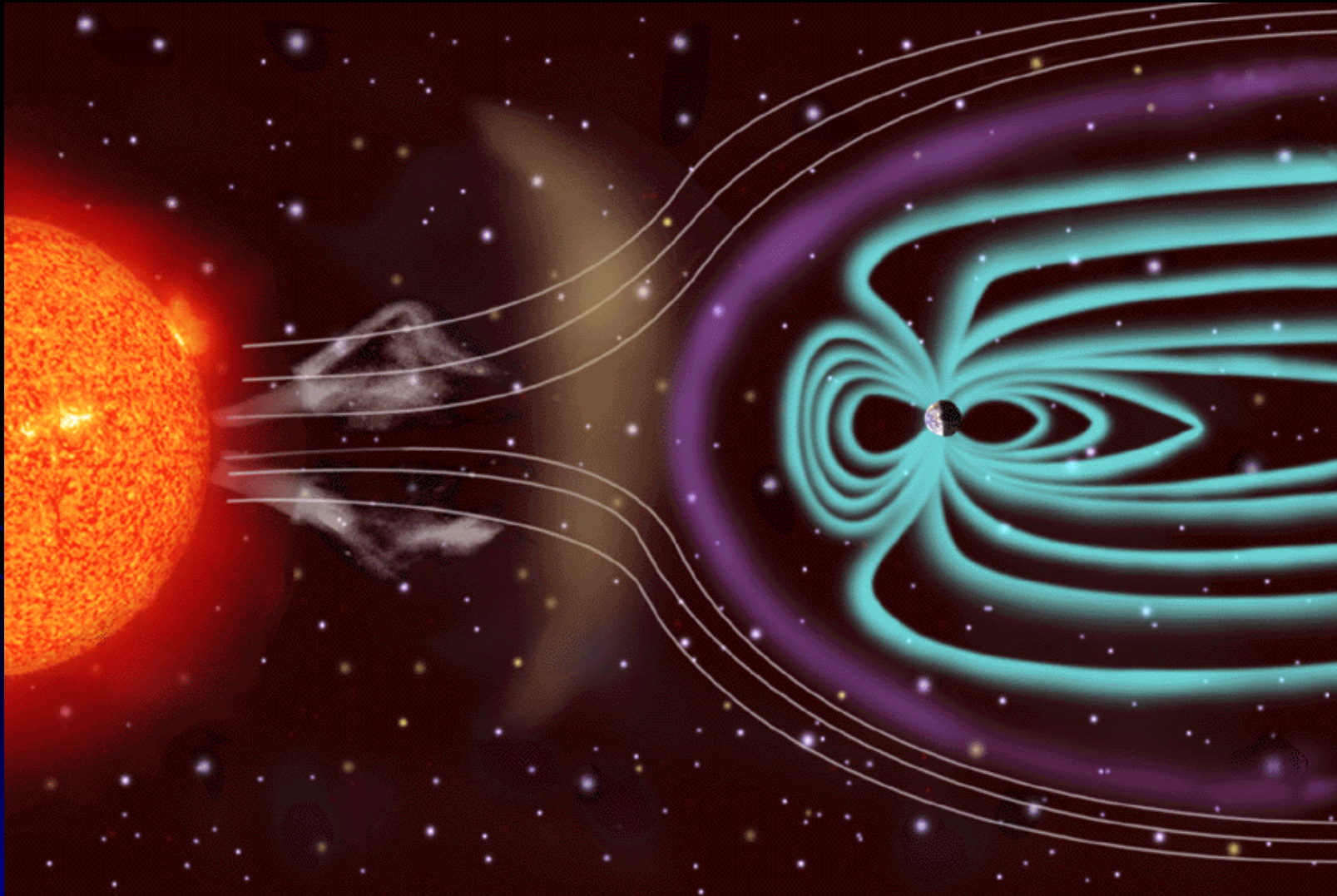
Hoog energetisch kosmisch deeltje botst en maakt via kerninteractie "nieuwe deeltjes"

$$E = mc^2 !$$



Computer simulatie van de formatie van een kosmische lawine.

# Zonnewind wordt afgebogen in het magneetveld van de aarde

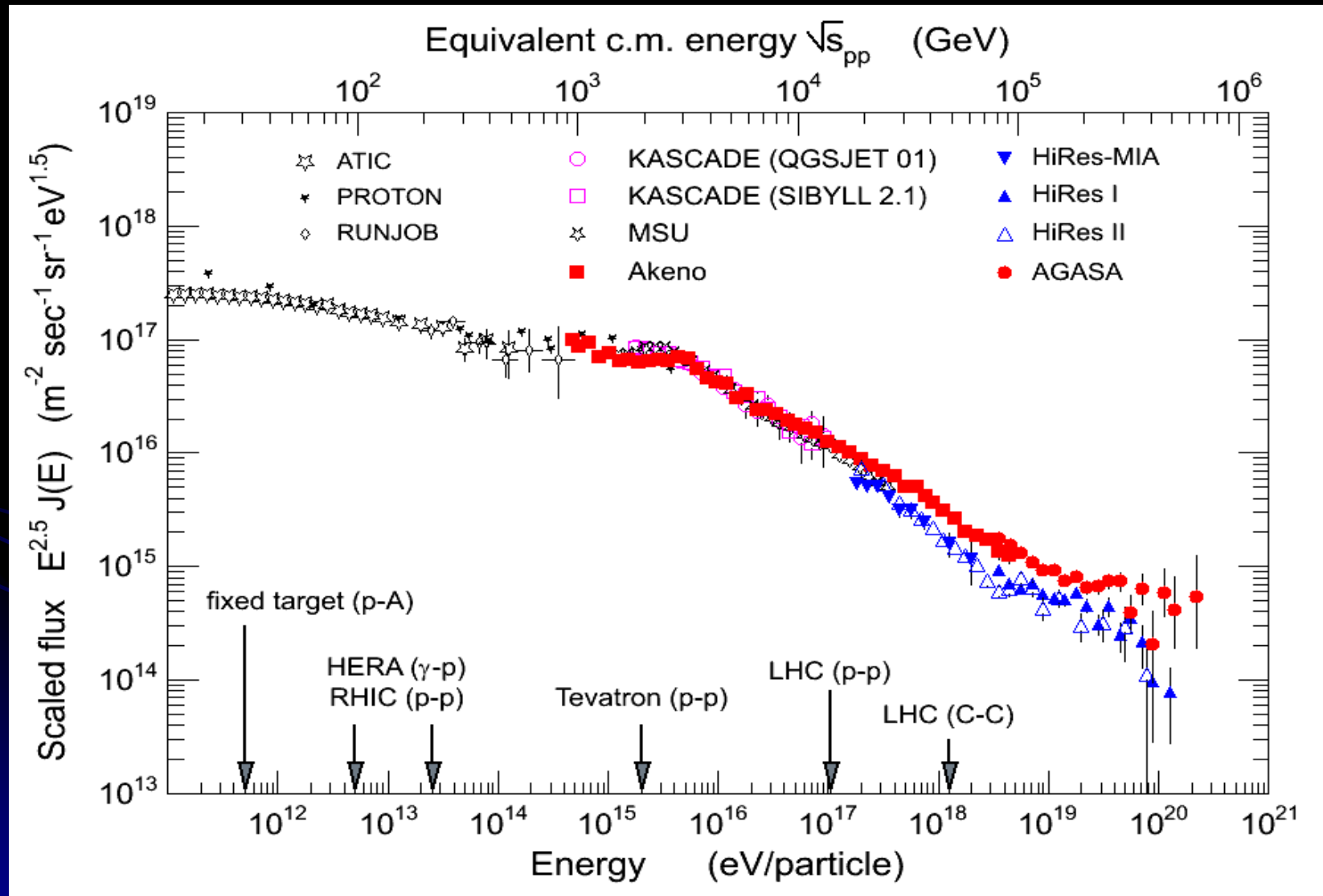


# Waarnemen van kosmische straling

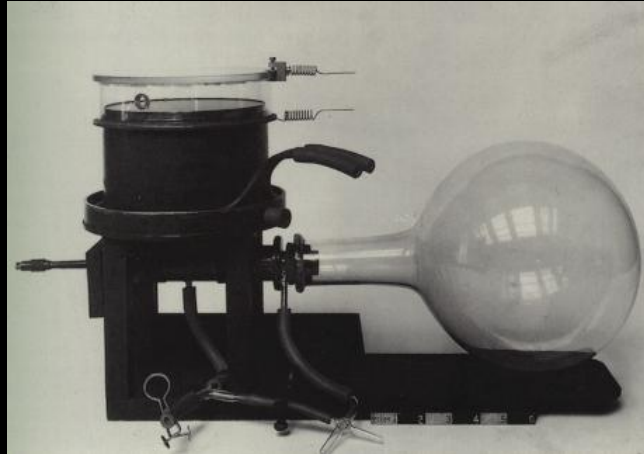


Noorderlicht...de "vingerafdruk" van zuurstof en stikstof !

# Ultra hoge energie kosmische straling !



# Elementaire deeltjes "zien"...



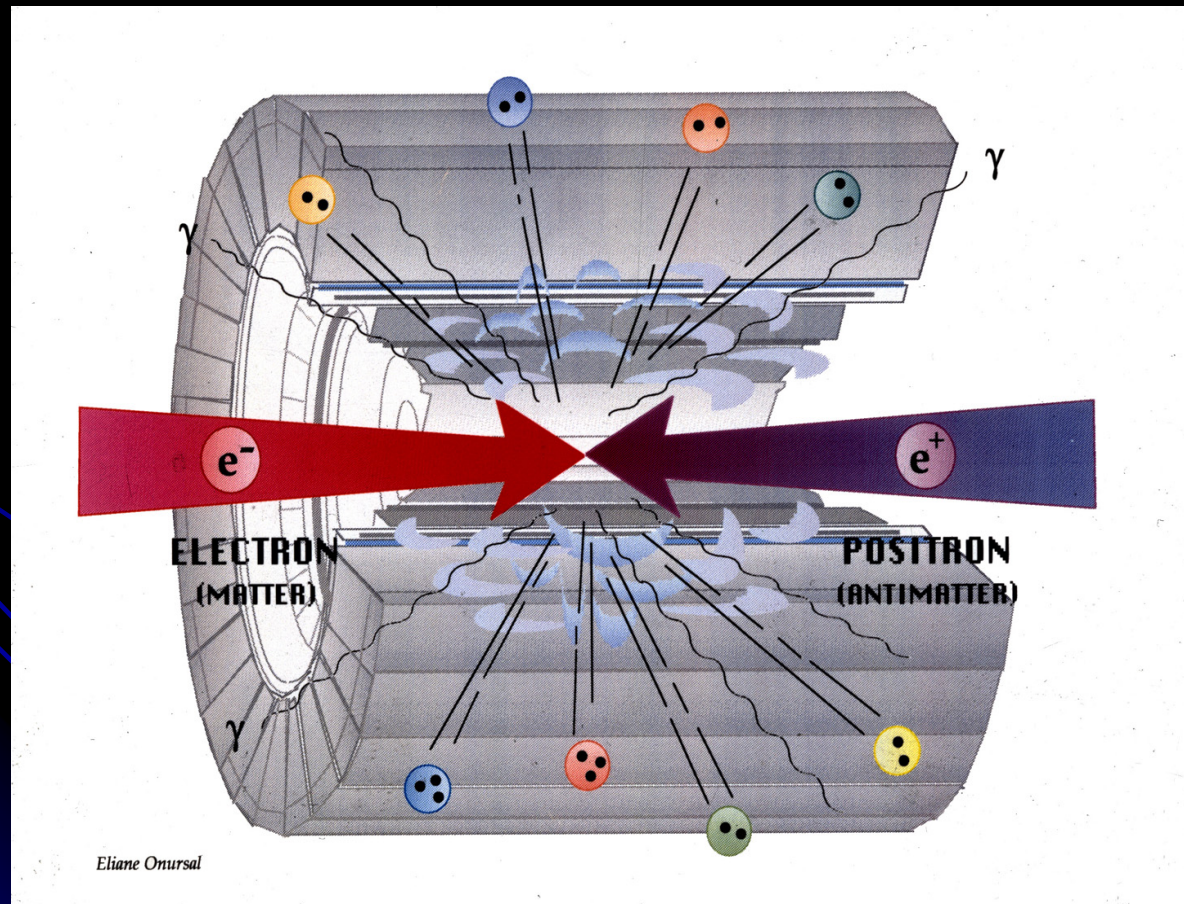
Wilson (1912)  
nevelkamer



Onderkoelde alcohol gebruikt ionisatie sporen als condensatie kernen !  
Dit levert de strepen op...

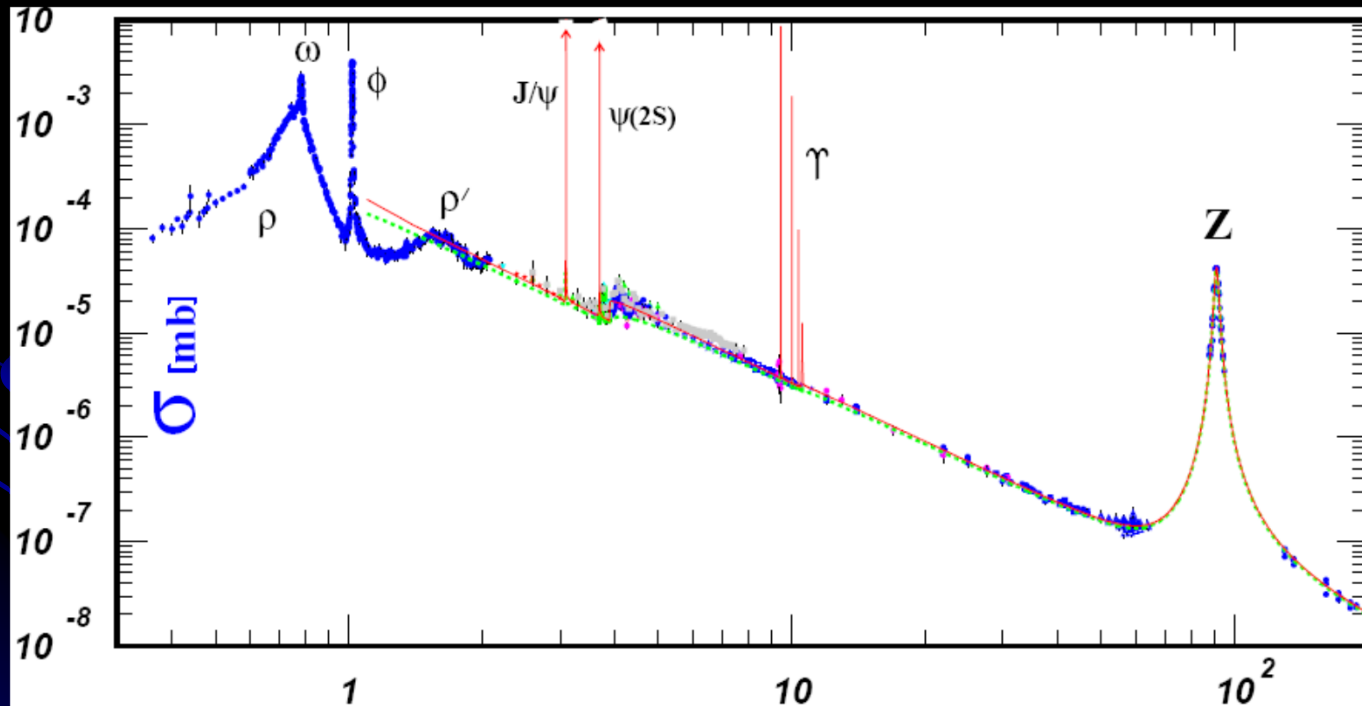
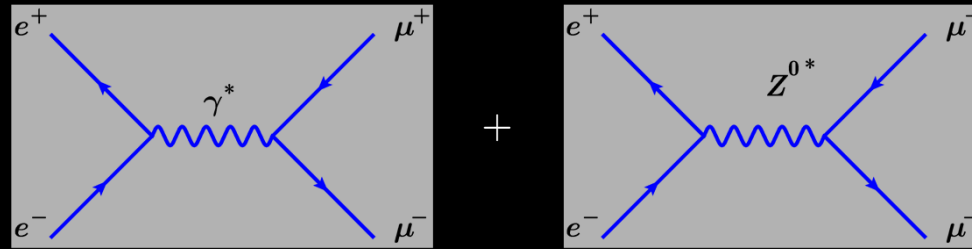
# Energie, materie en antimaterie:

- 1932: ontdekking positron (Anderson, in 1928 voorspeld door Dirac !)
- $E = mc^2$ : materie + antimaterie  $\leftrightarrow$  energie
- Beschrijving botsingen: Feynman formalisme



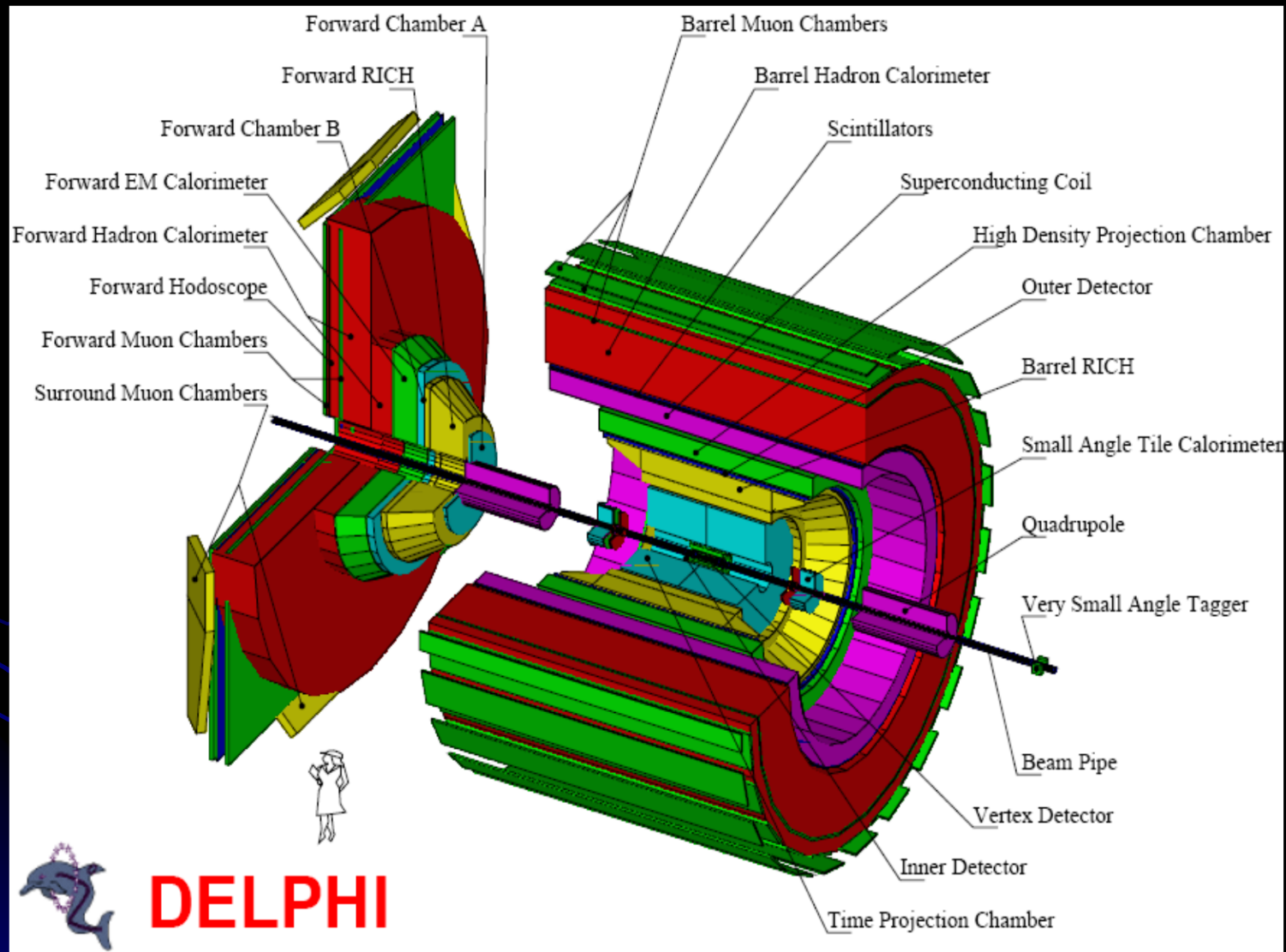
# Botsing van twee puntdeeltjes: $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$

(elektromagnetische en zwakke wisselwerking)



$$\sqrt{s} = \sqrt{(p_{e^-} + p_{e^+})^2} = \sqrt{4E^2} = 2E \quad (E \equiv E_{e^-} = E_{e^+})$$

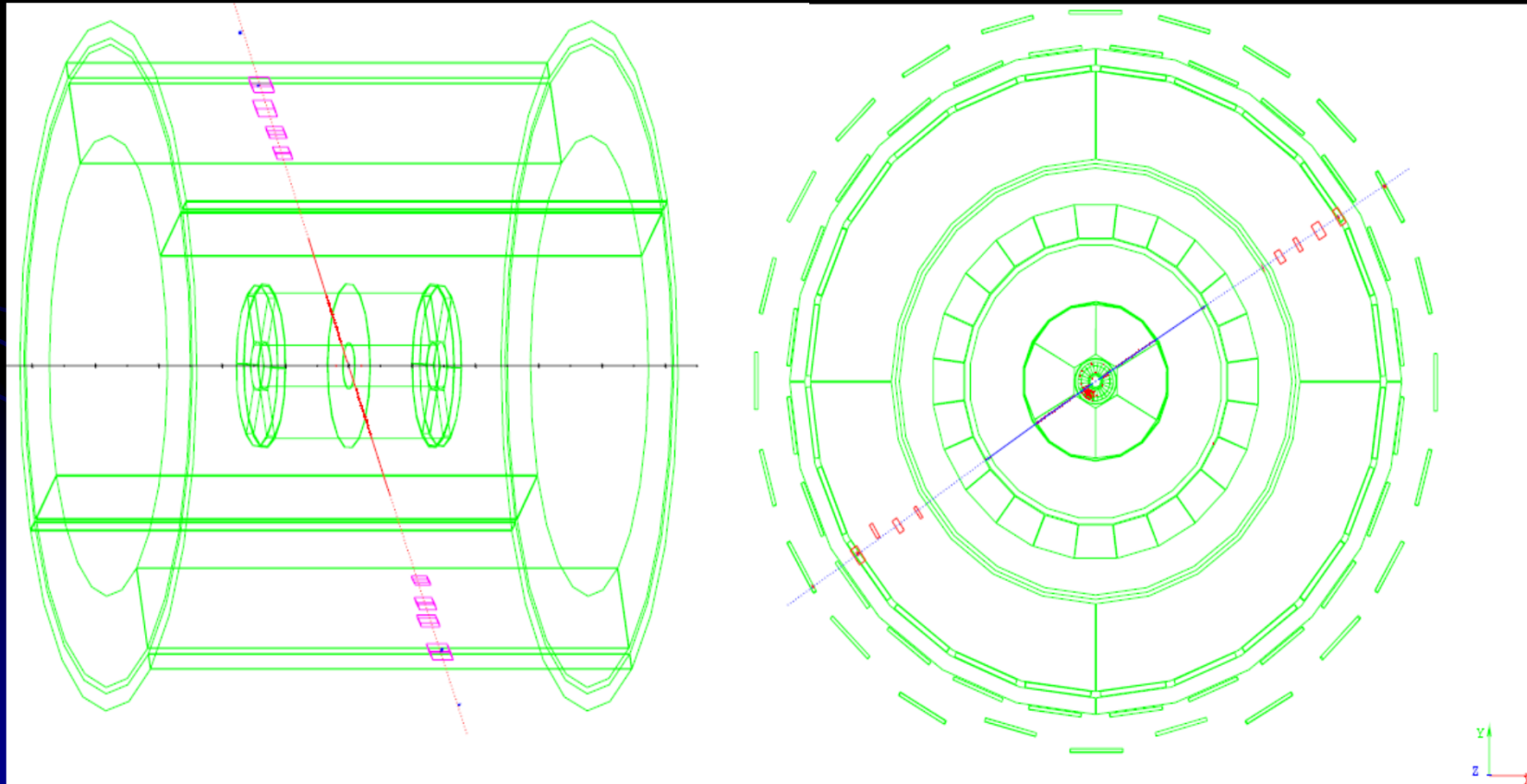
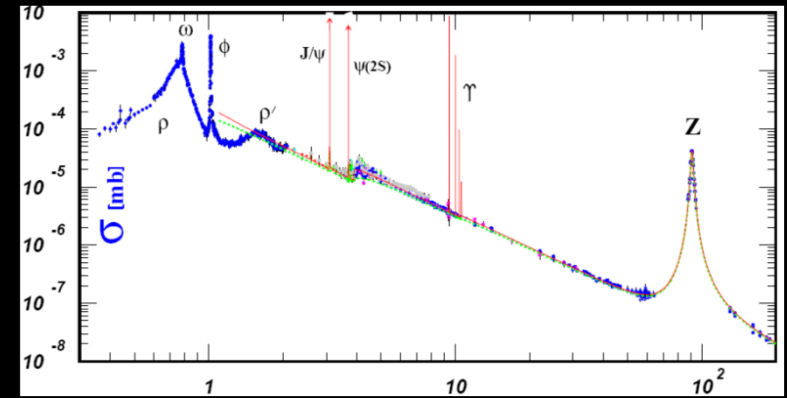
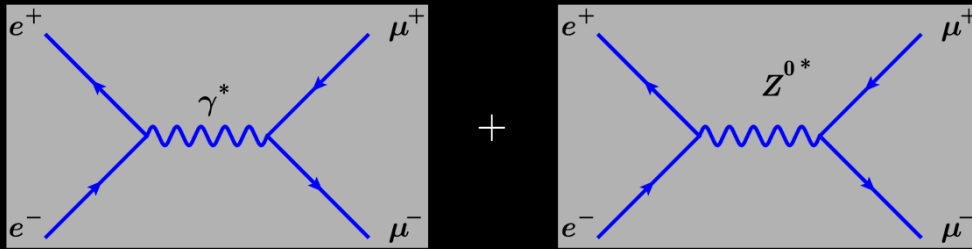
# Het DELPHI experiment (1989 - 2000)



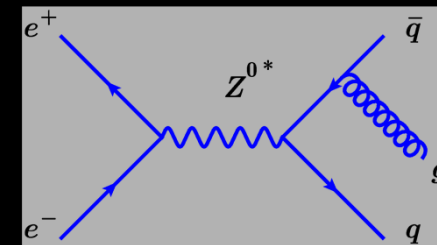
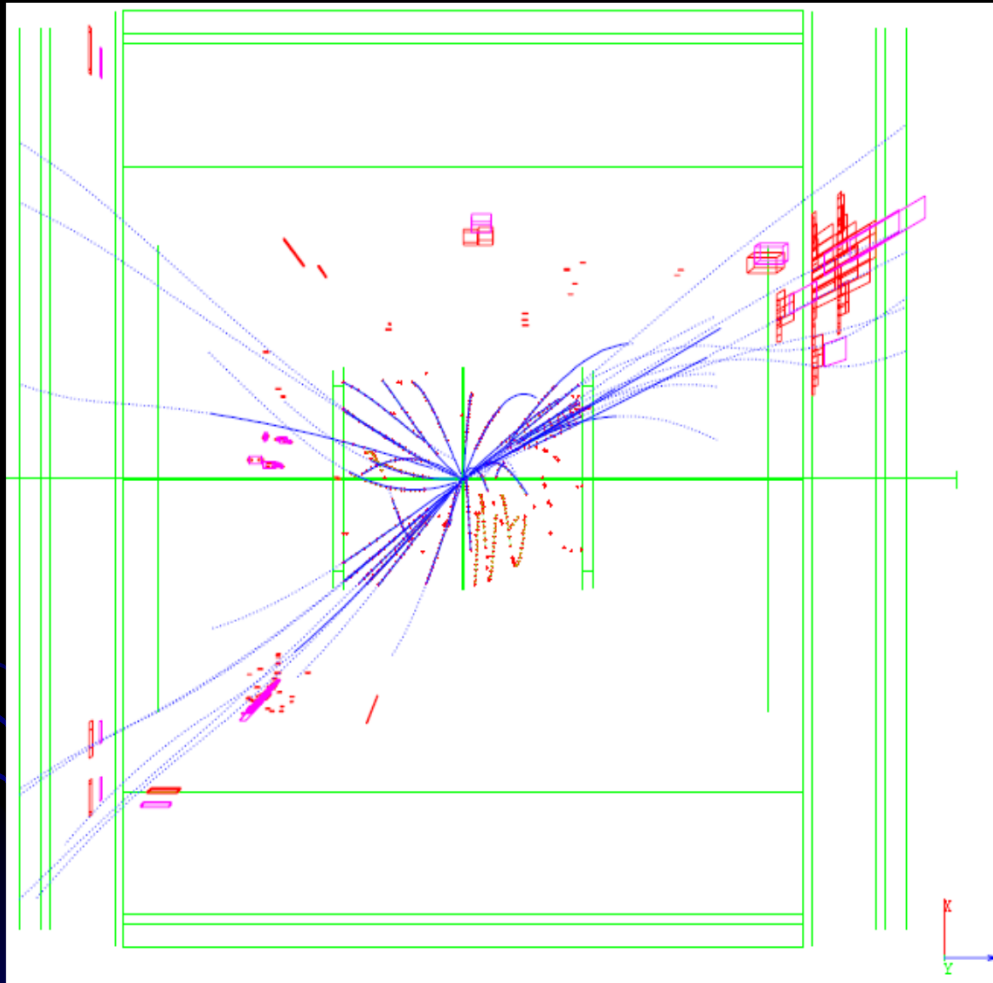
Aan de buitenzijde van het experiment bevinden zich muondetectoren



Run: 26154: gebeurtenis (1417) met twee muonen in eindtoestand bij  $\sqrt{s} \sim 91 \text{ GeV}$

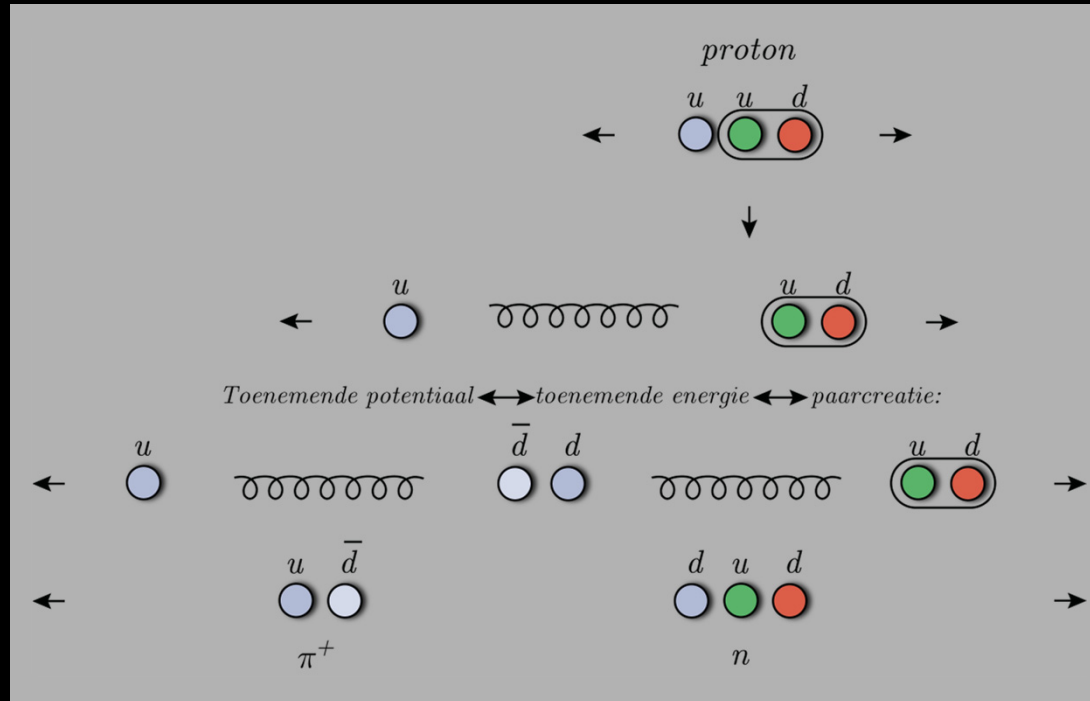


Een gecompliceerdere (QCD) gebeurtenis wordt in 1991 waargenomen  
( $\sqrt{s} = M_{Z^0} \approx 91 \text{ GeV}$ , Run: 26154, Event: 567):

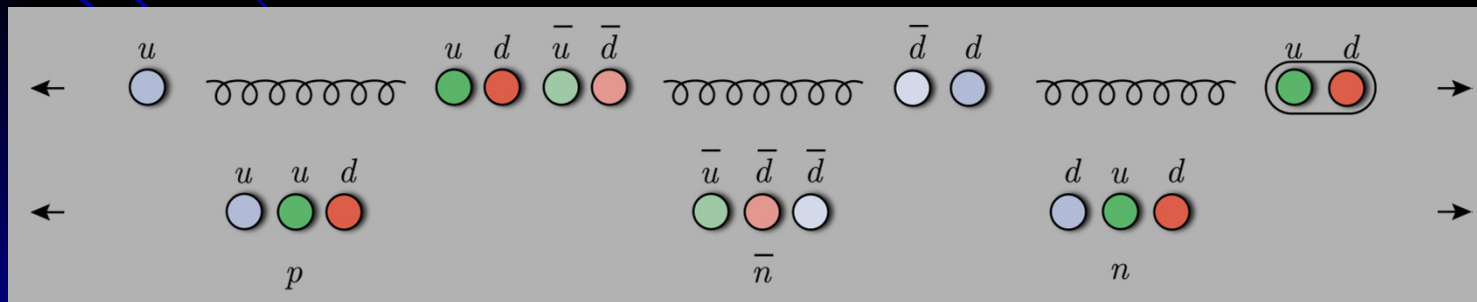


Elektron-positron botsing waarbij een  $Z^0$  vervalt  
naar een 3-jet eindtoestand.

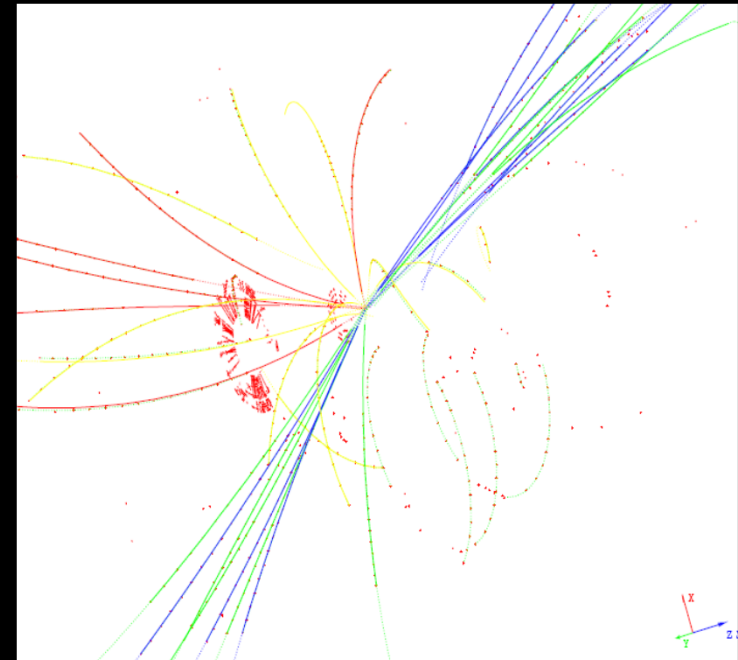
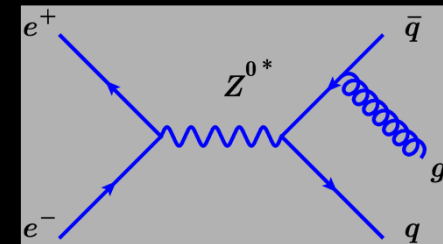
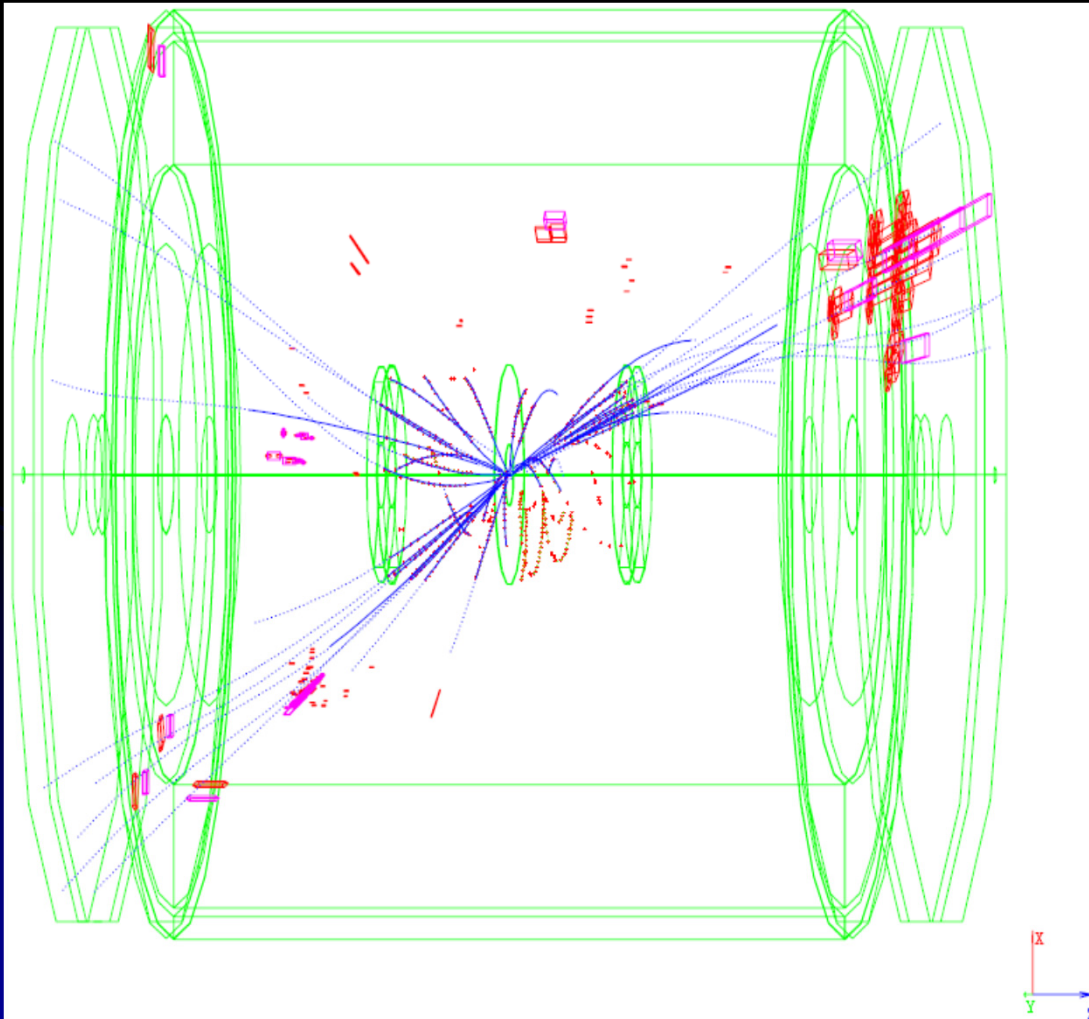
# Jets: formatie van mesonen (pionen etc.)... (...een grafische voorstelling...)



# ...en formatie van baryonen (proton, neutron etc.)



Inzoomen op het centrale gedeelte van de detector laat zien dat twee "jets" met energetische deeltjes onderscheiden kunnen worden. De geladen deeltjes in de derde "jet" zijn minder energetisch; zij worden door het magnetische veld sterker afgebogen...



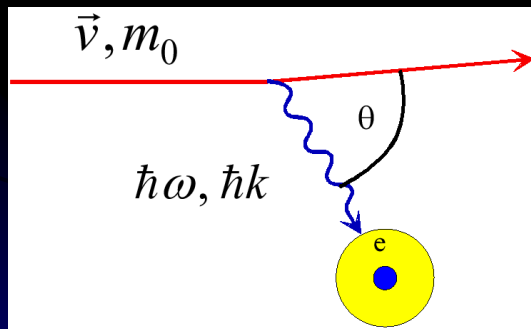
# Deeltjes detecteren: "It's all about the energy (loss)..."

- Bethe-Bloch:  
Energieverlies van ("zware",  $m > m_e$ ) deeltjes door ionisatie
- Elastische verstrooiing:  
Verandering van de richting van een deeltje in materie
- Cerenkov straling:  
Licht uitgezonden door deeltjes die in materialen reizen met verschillende diëlektrische (elektromagnetische) eigenschappen
- Transitie straling:  
Licht uitgezonden wanneer een deeltje de grens tussen twee verschillende materialen passeert

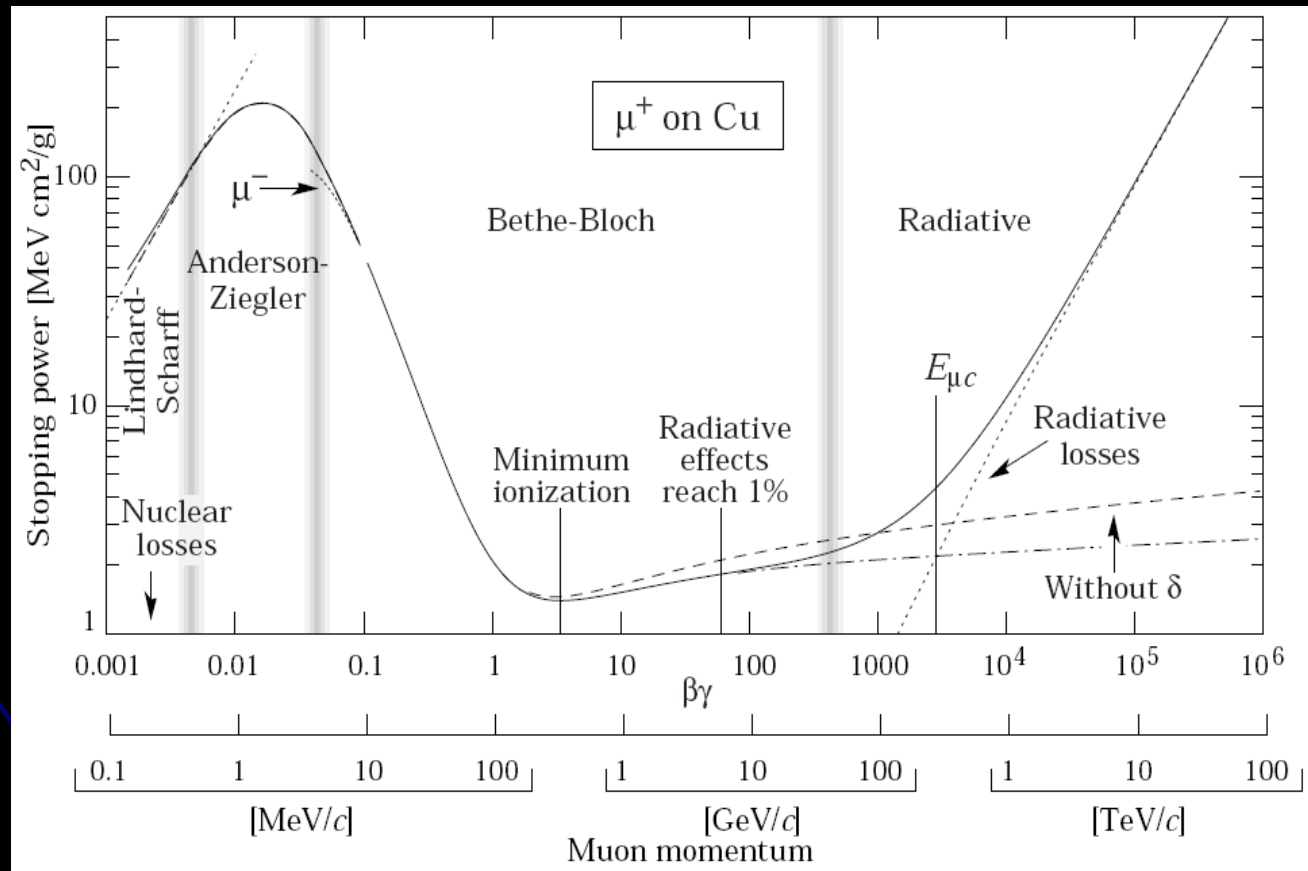
# Bethe-Bloch:

Gemiddelde energieverlies per eenheid van afgelegde weg:

$$\overline{\frac{\Delta E}{\Delta x}} = 2C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{Zz^2}{A} \rho \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2\gamma^2 \beta^2 m_e c^2 E_{\max}}{I_0^2} \right) - \beta^2 - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2} \right]$$

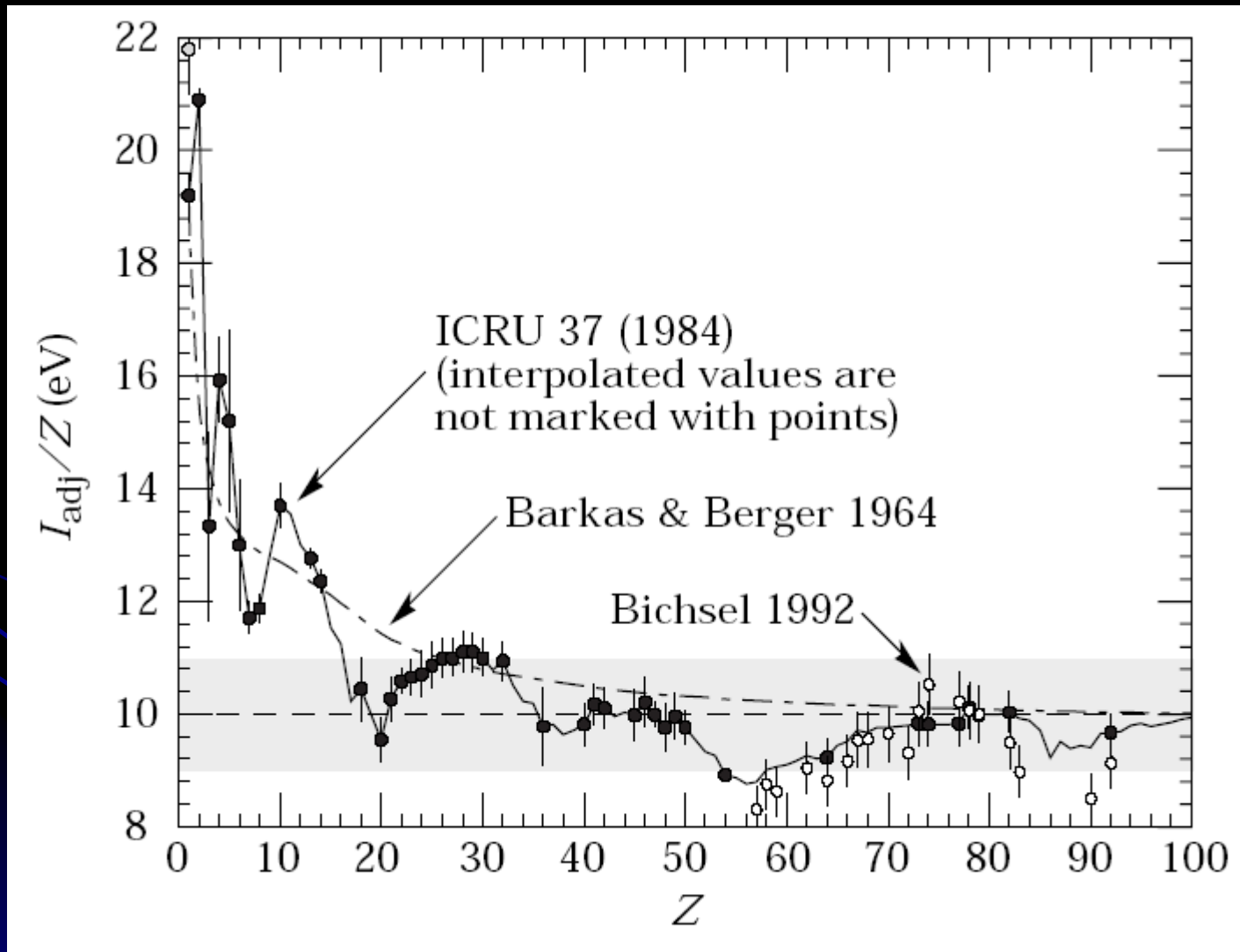


Energie-verlies sterk afhankelijk van  $\beta$  ( $= v/c$ )

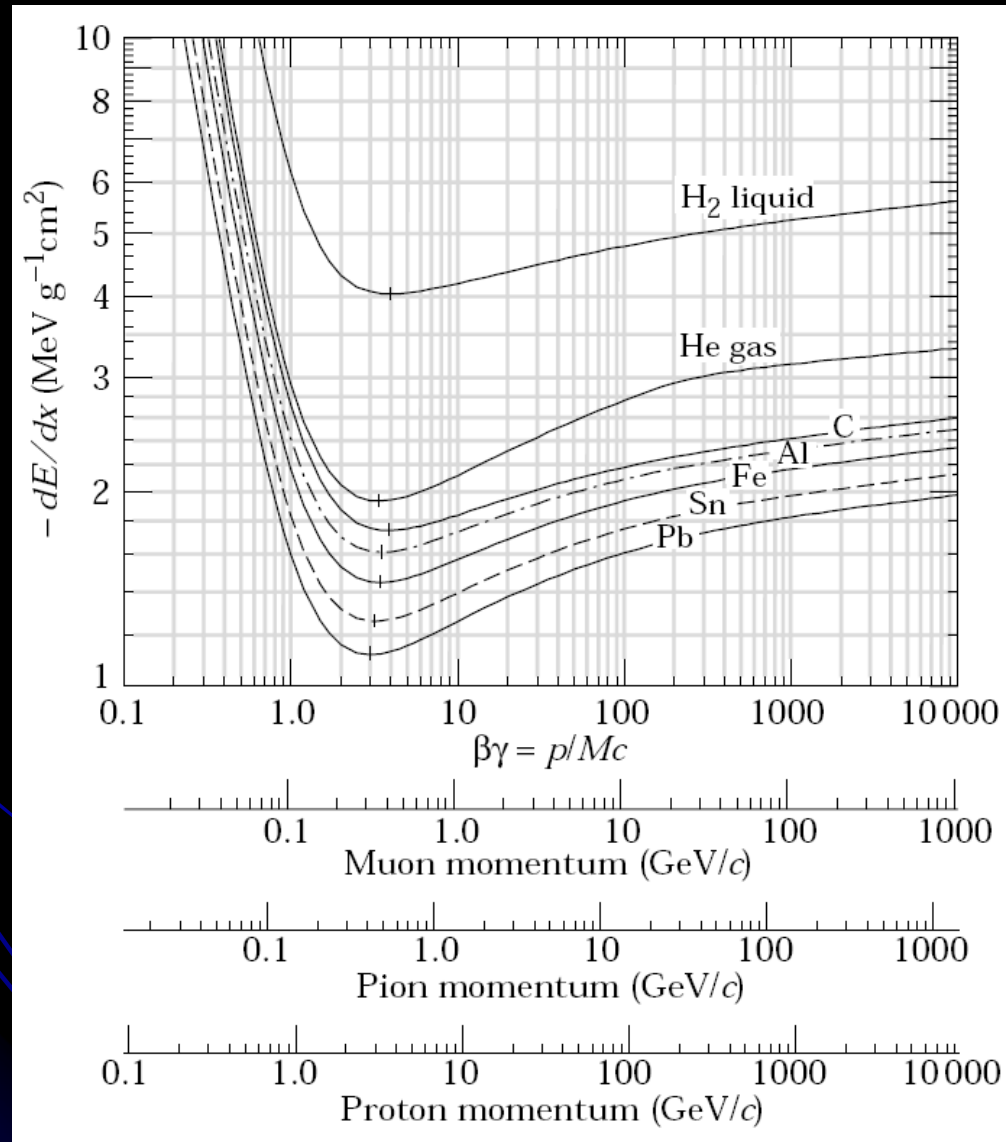


# ...gemiddelde ionisatie-energie...

(als functie van de kernlading)

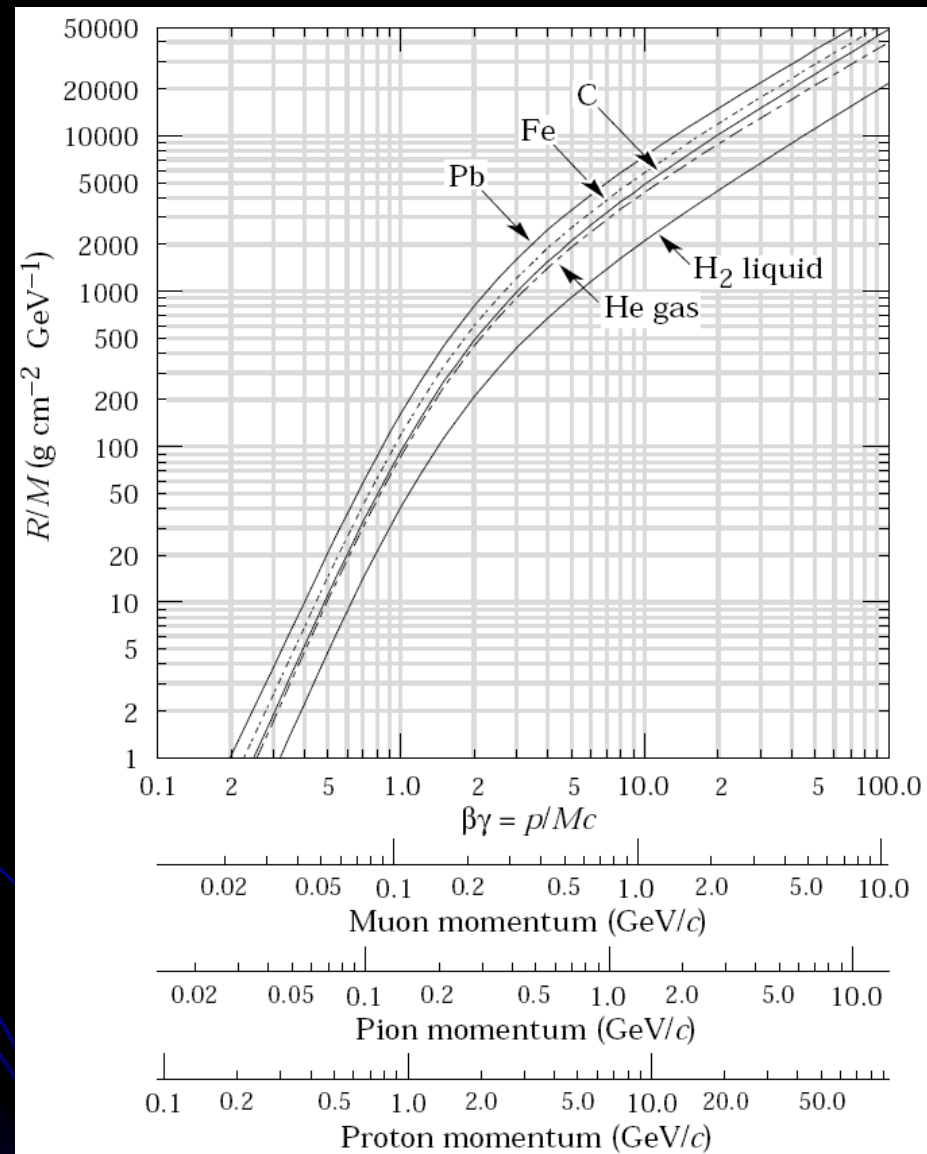


# ...gemiddeld (ionisatie) energieverlies... (voor verschillende materialen)

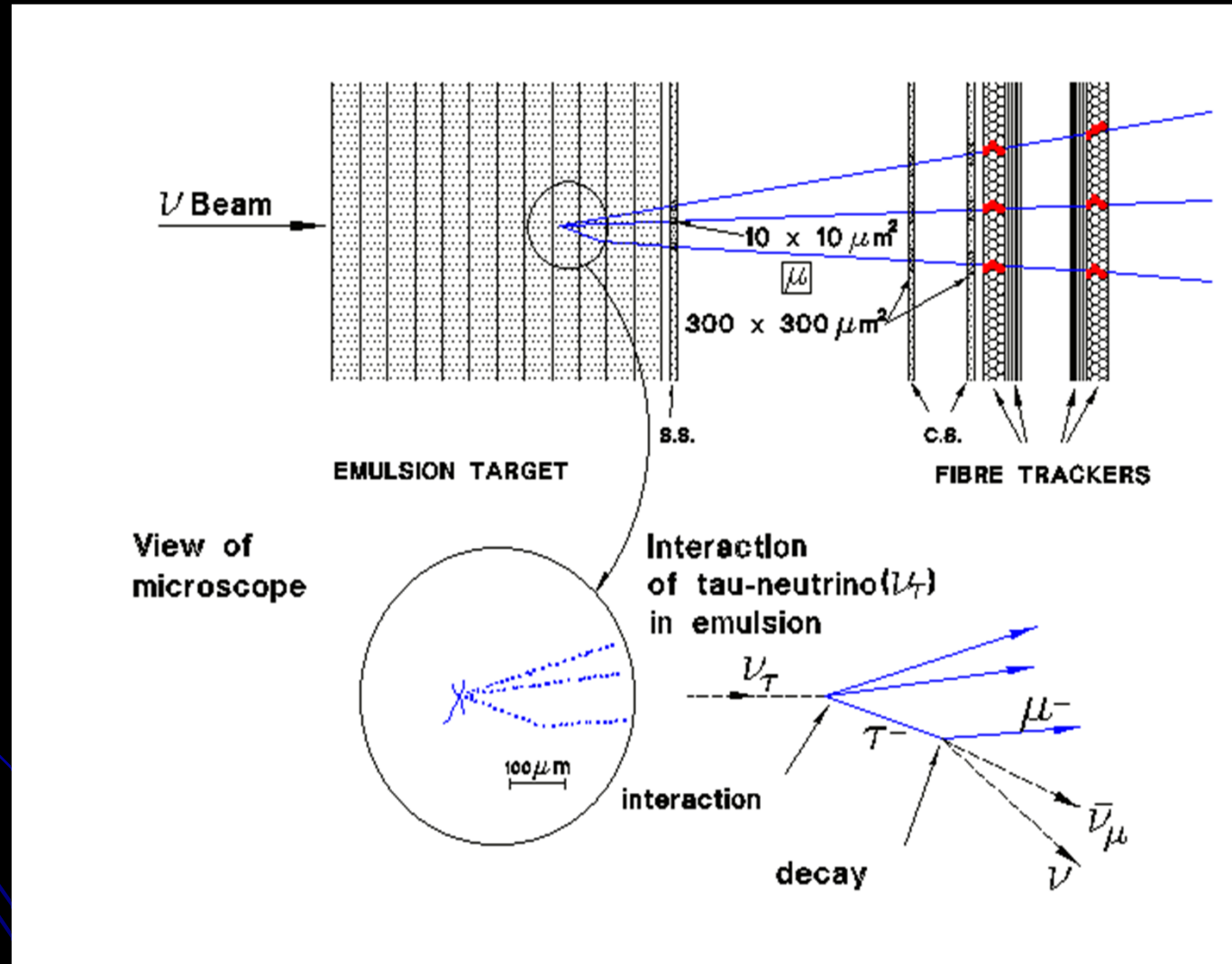




# ...deeltjes stoppen of doorlaten ?



# Van film tot LHC-experiment...

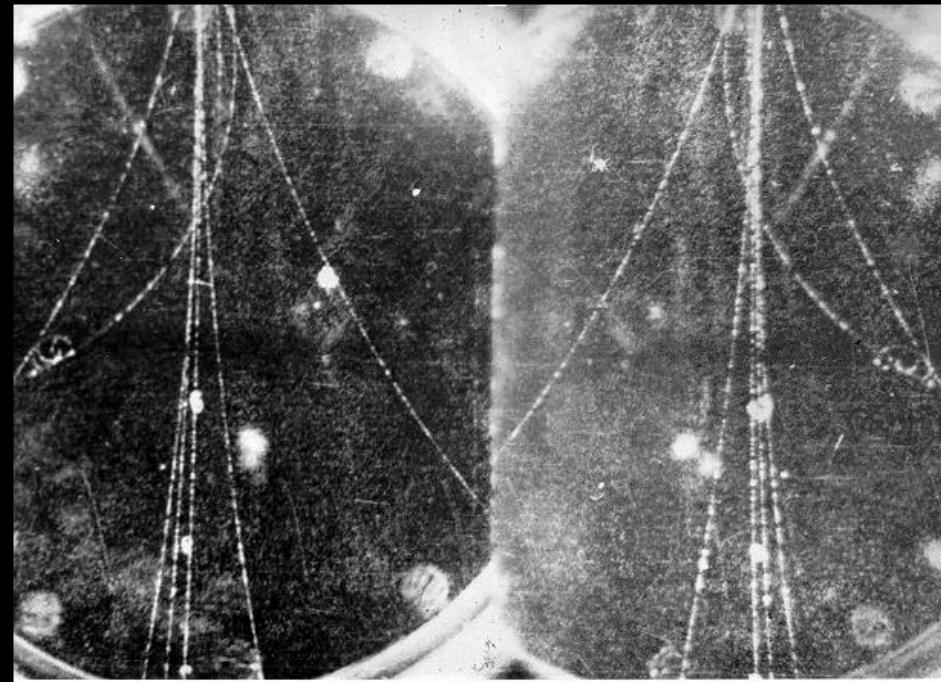
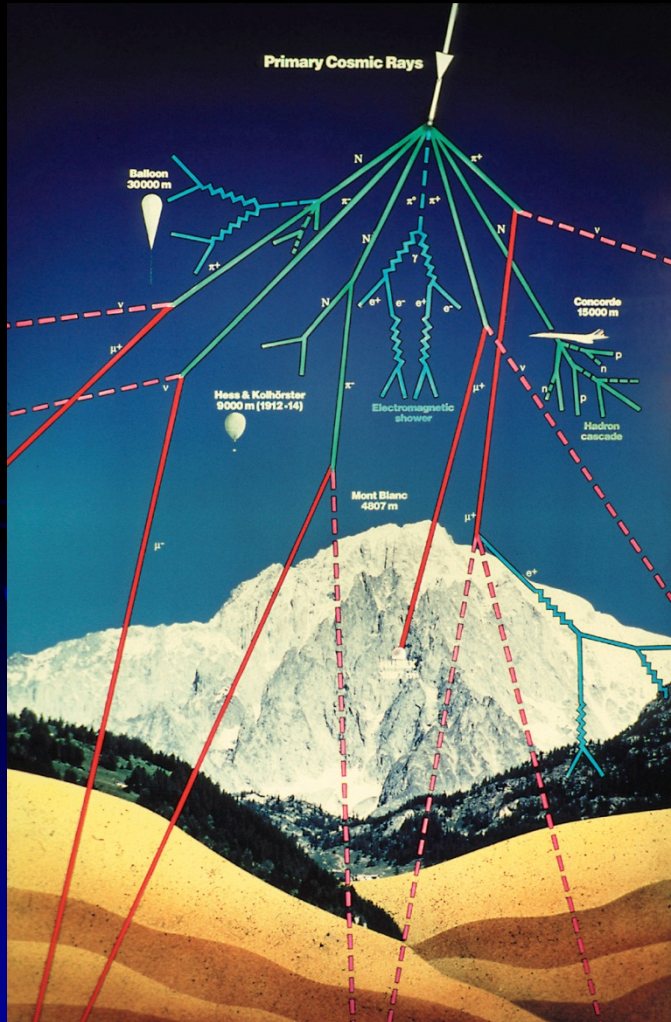


Energie-depositie zorgt voor chemische reactie in film (Ag-halide)

# ...nevelkamer...

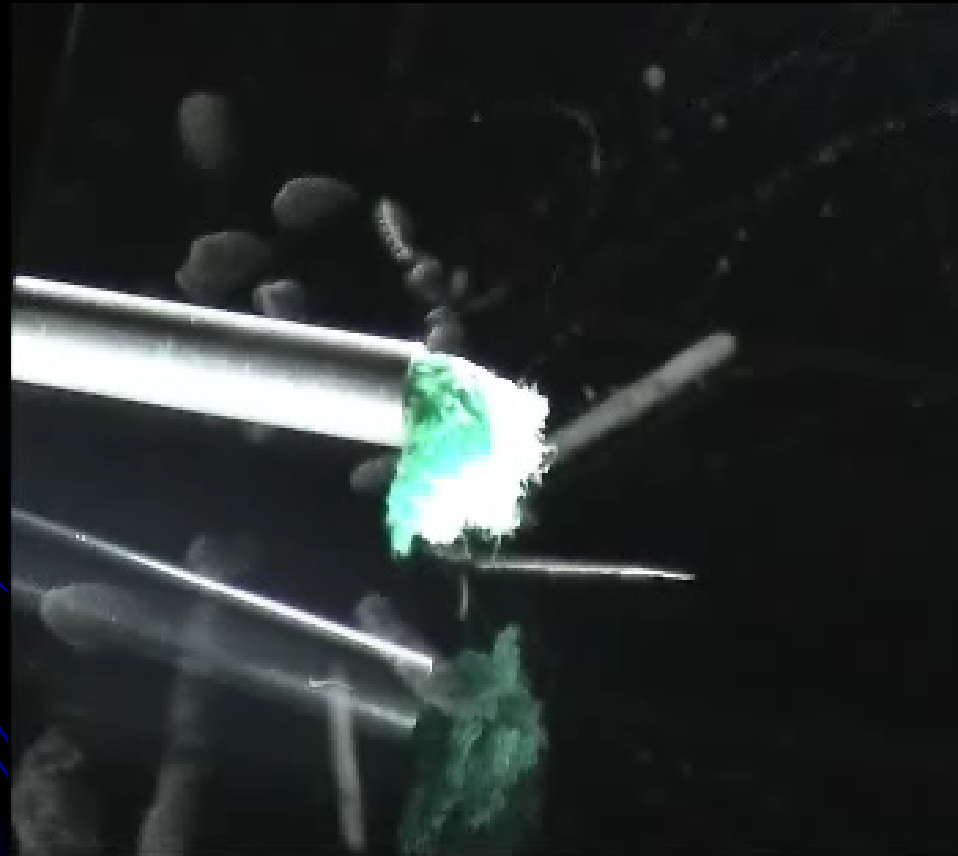
- Detectie principe:
  - Mengsel van gas en damp
  - Volume-expansie zorgt voor druk- en temperatuurverlaging; de damp raakt oververzadigd Een (geladen) deeltje dat door de damp gaat ioniseert het gas; condensatie aan de ionen (die relatief lang leven) !
  - Druppels vormen spoor
- Expansie (Wilson) kamer:
  - Herhaalde expansie-compressie cyclus
  - Afhankelijk van grootte van het volume; "dode tijd"
  - Toepassing in experimenten met lage "telsnelheid" (kosmische straling)
- Diffusie kamer:
  - Continue stroom van oververzadigde damp
  - Geen "dode tijd"
  - Toepasbaar in versneller experimenten

# 1932: Carl Anderson ontdekt het positron in kosmische lawines

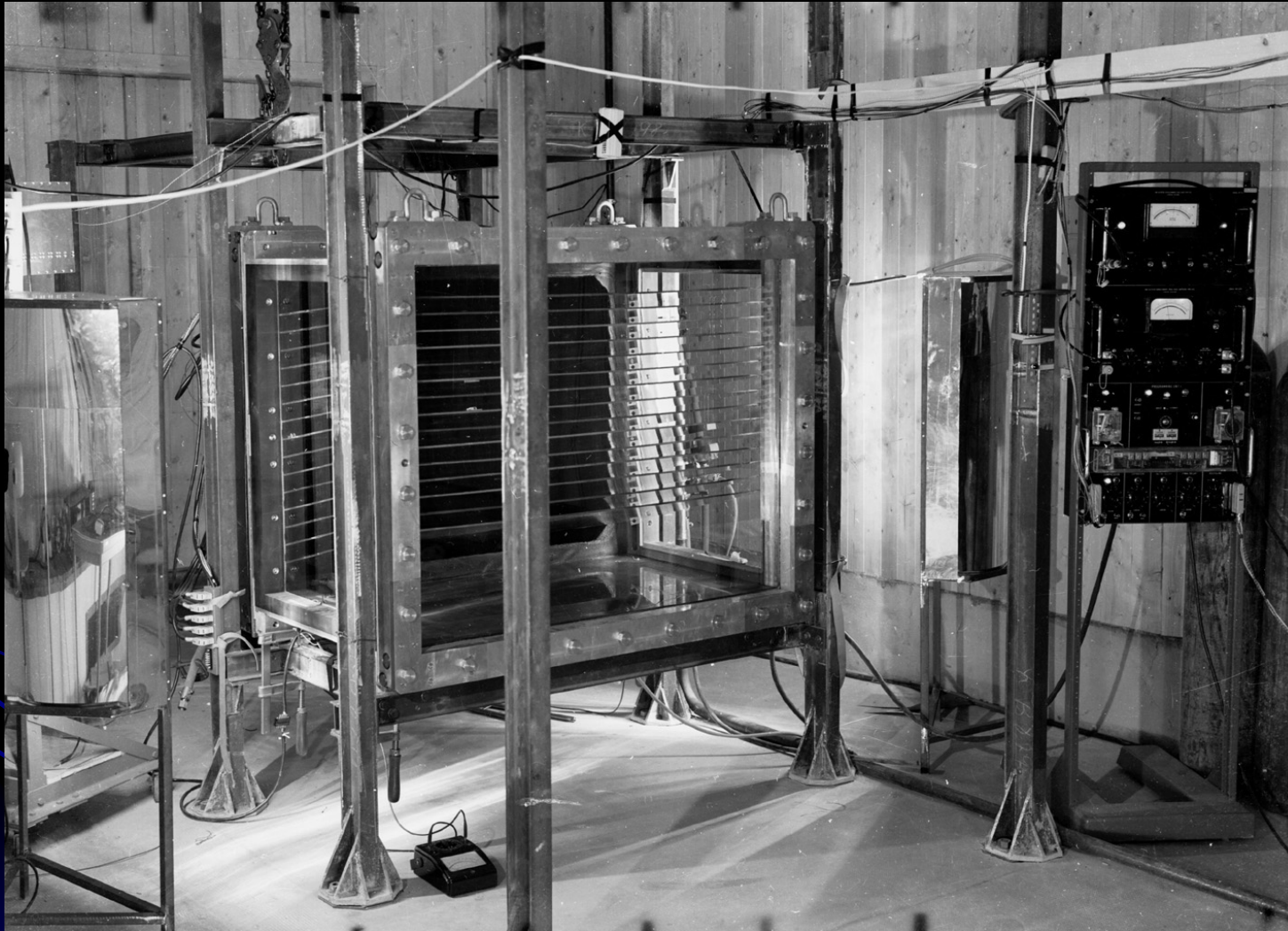


© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

...meerdere  $\alpha$ -deeltjes uit het  
kousje (thorium)  
van een kampeer-gaslamp...



...nevelvat...

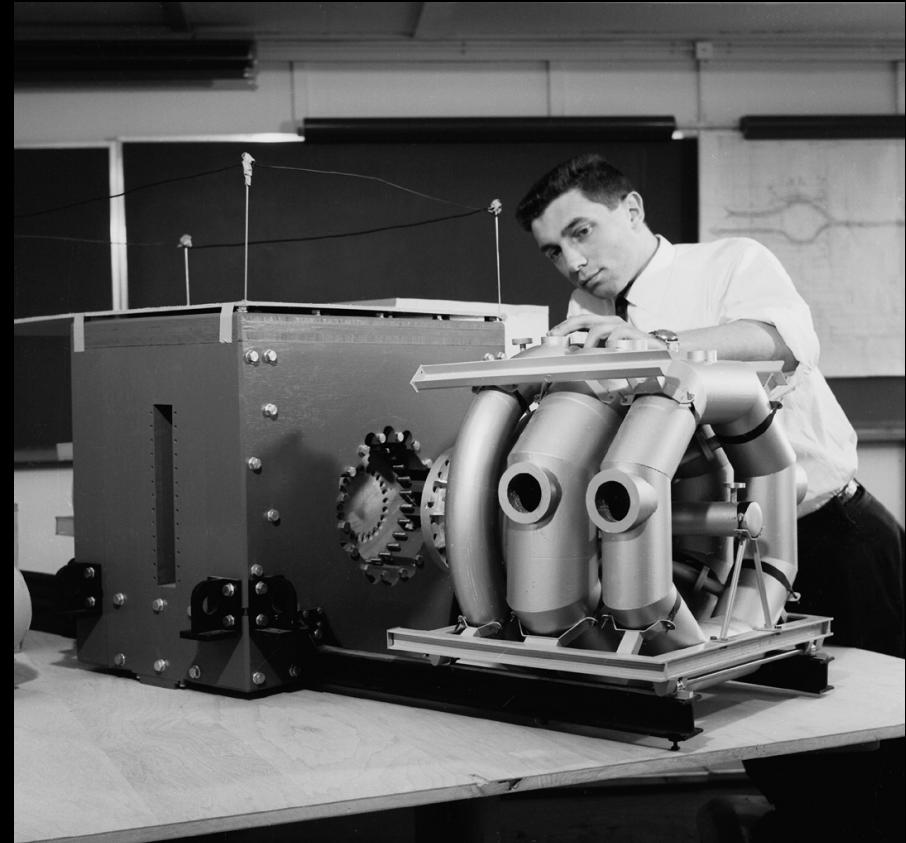


Kosmische straling onderzoek: Wilson (multi-laags) kamer (nov. 1955)

# ...bellenvaten...

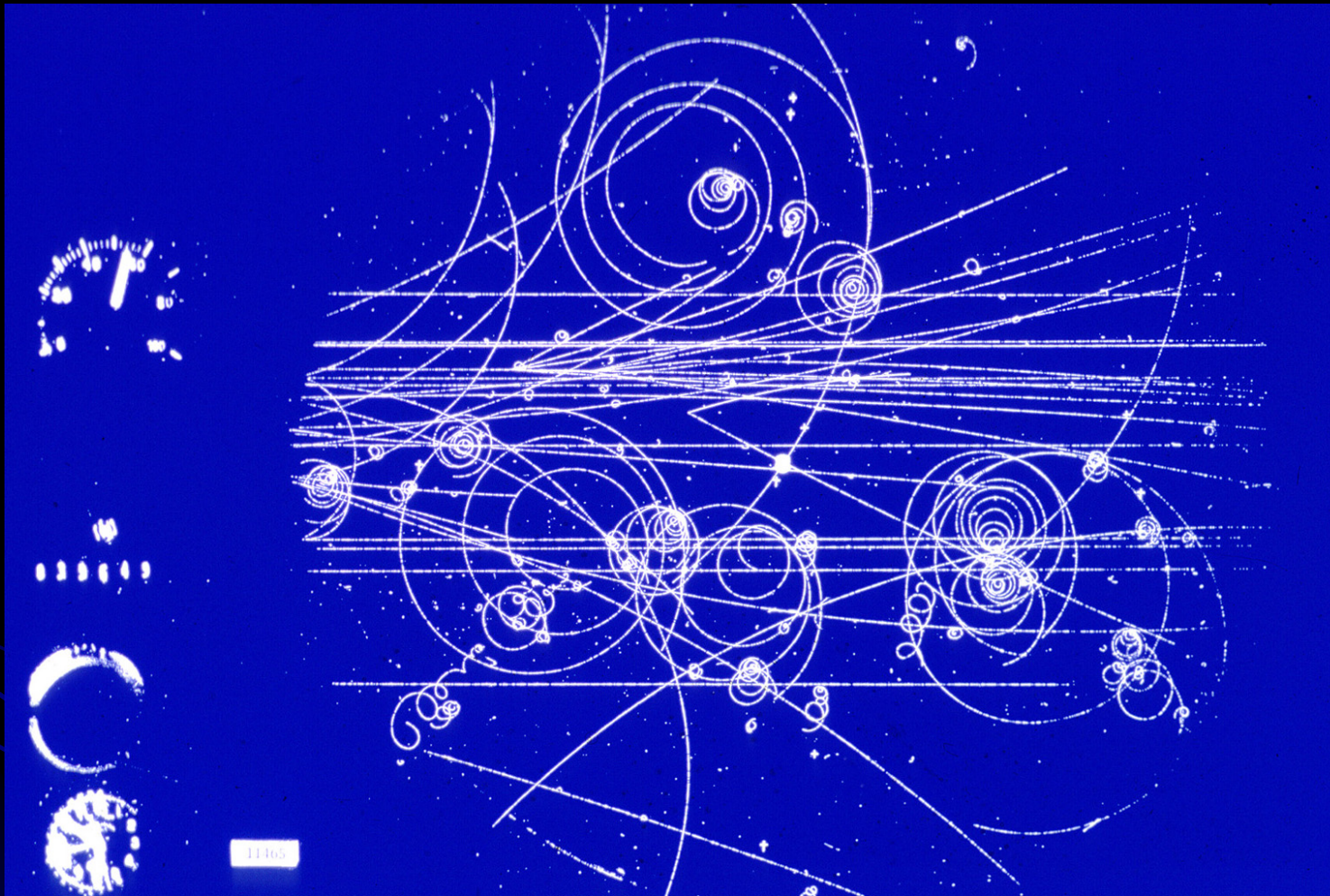
## Detectie principe:

- "super verhitte" vloeistof (diethyl-ether  $\sim 100$  °C boven het kookpunt) begint te koken wanneer een geladen deeltje passeert (Glaser - 1952). Er ontstaan bellen die m.b.v. een camera geregistreerd worden
- Werkt beter als de druk verlaagd wordt
- Drukverlaging door snelle volume-expansie
- Korte opname-tijd
- In tegenstelling tot nevelkamer: verdamping i.p.v. condensatie



CERN "zware vloeistof ( $C_3F_8$ ,  $CF_3Br$ )" bellenvat (maart 1960)

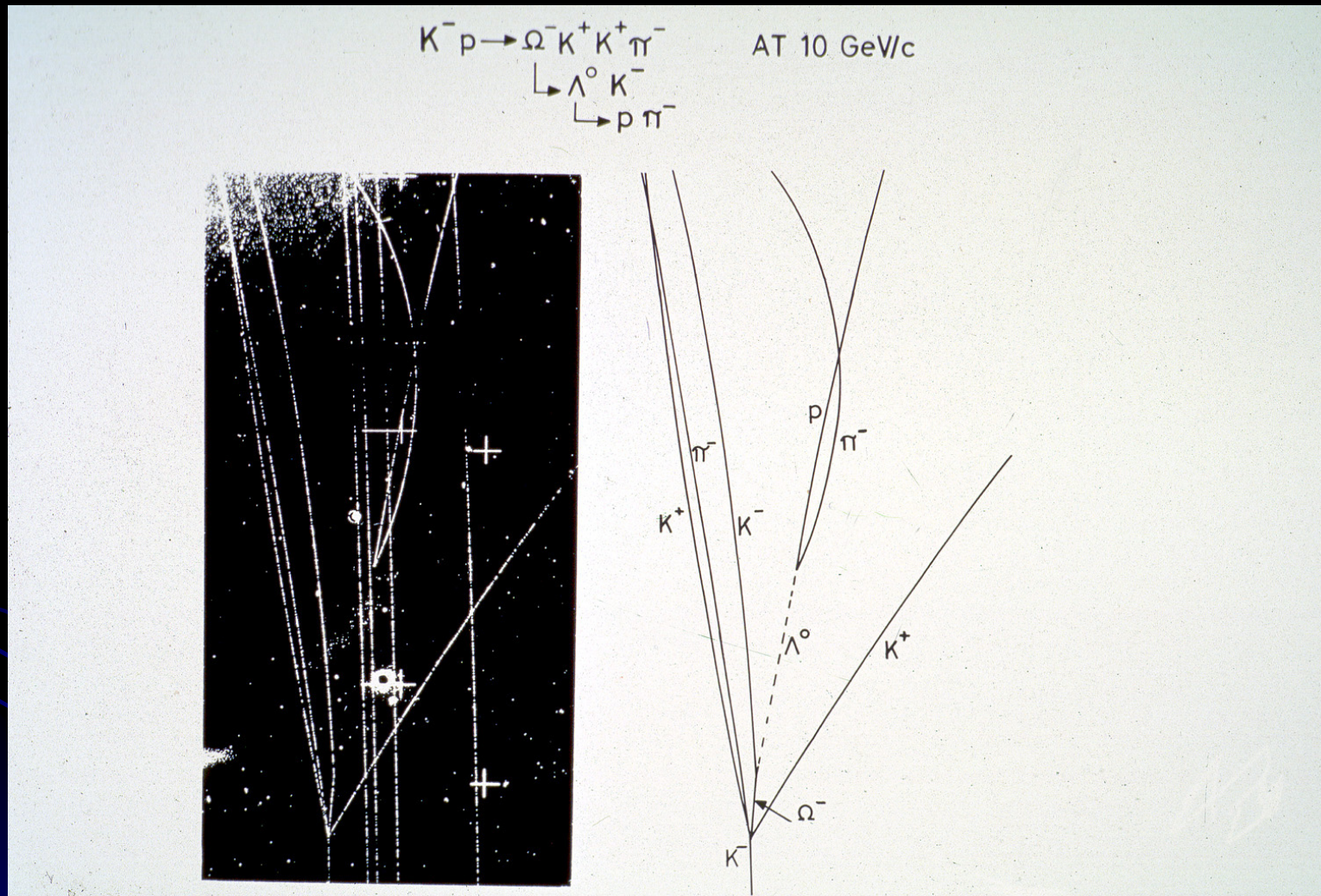
# ...bellenvat-foto...



16 GeV  $\pi^-$  op vloeibaar waterstof produceert een  
jet van deeltjes in het CERN 30 cm bellenvat

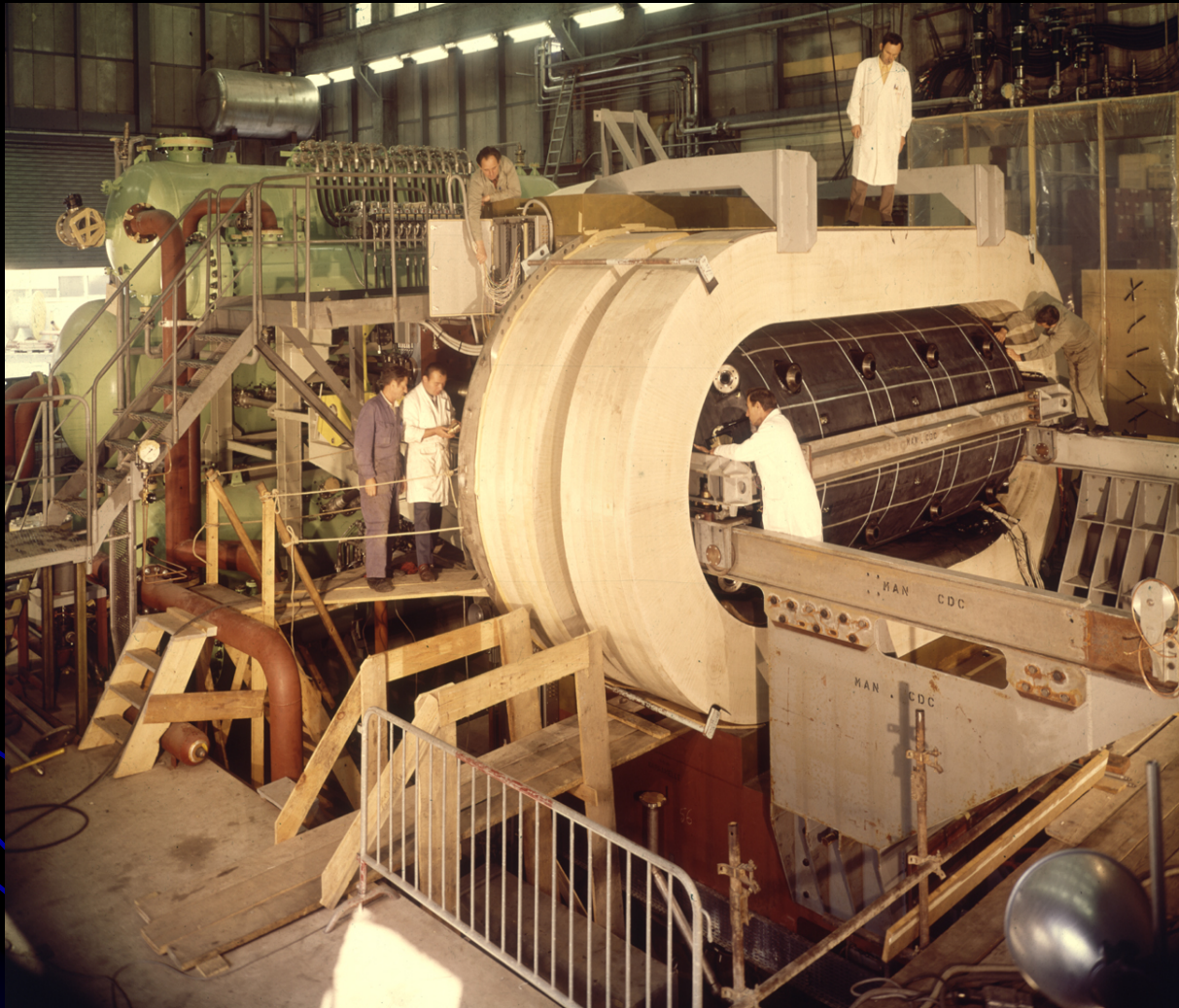


...en een beroemde...



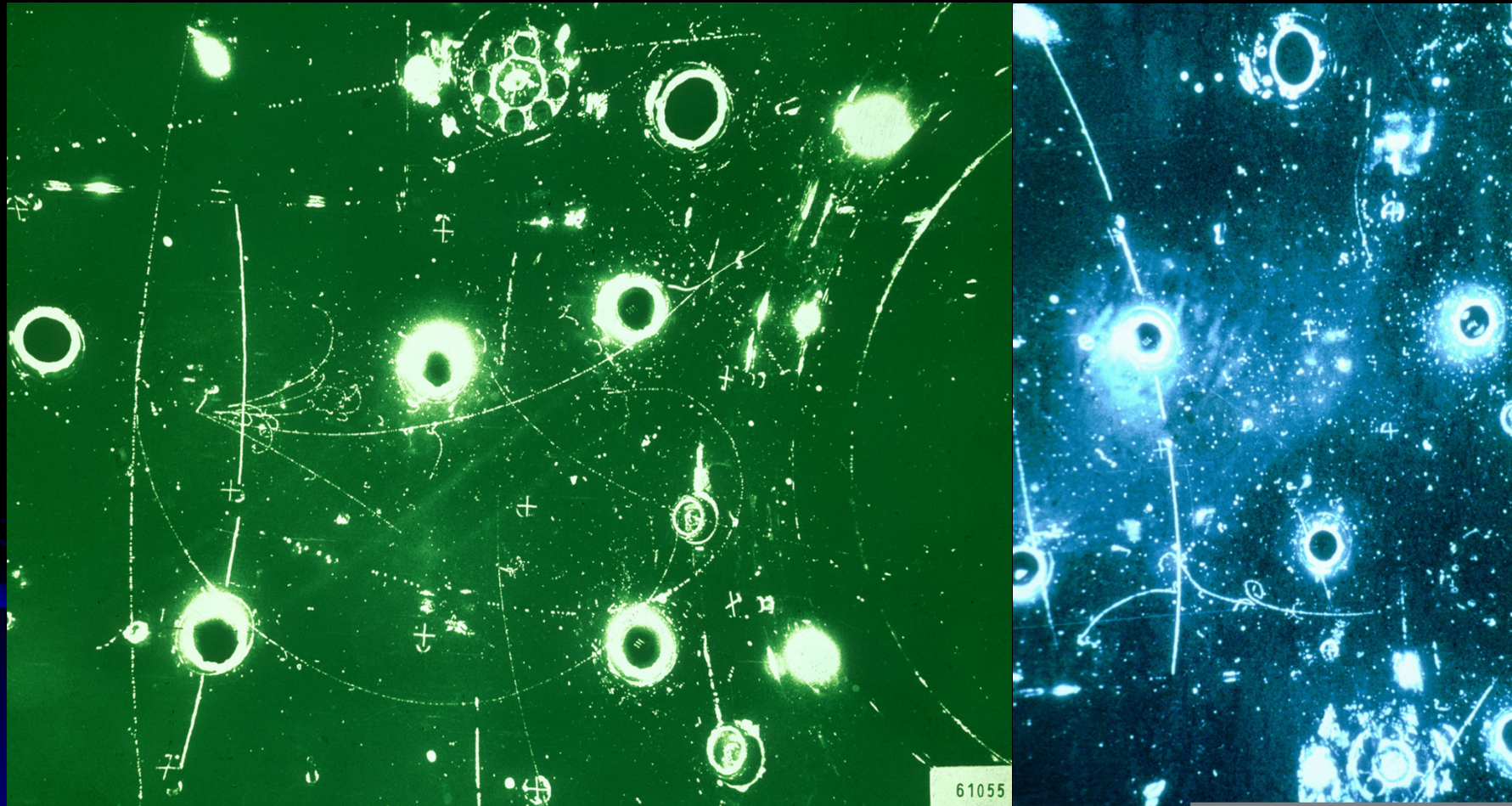
•  $\Omega^-$  productie in 2 m CERN bellenvat

...bellenvaten...



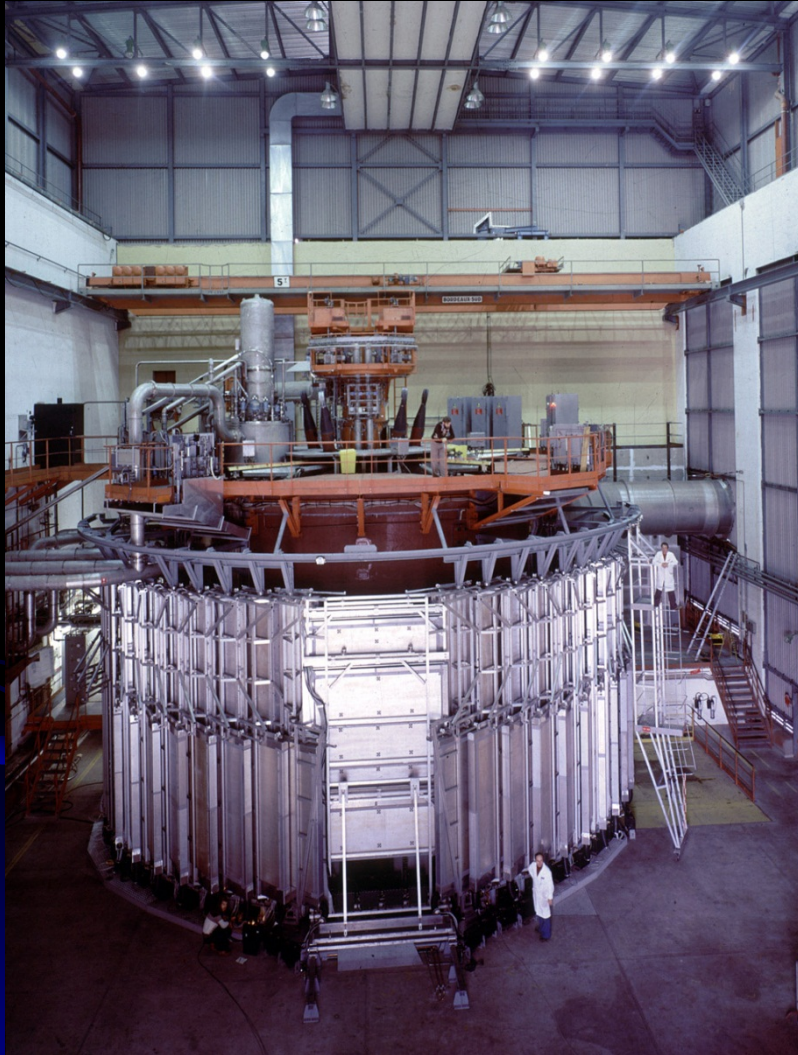
CERN Gargamelle "zware vloeistof" bellenvat (sept. 1970)

...bellenvaten...



CERN Gargamelle: eerste bewijs voor bestaan neutrale zwakke stroom

...bellenvaten...

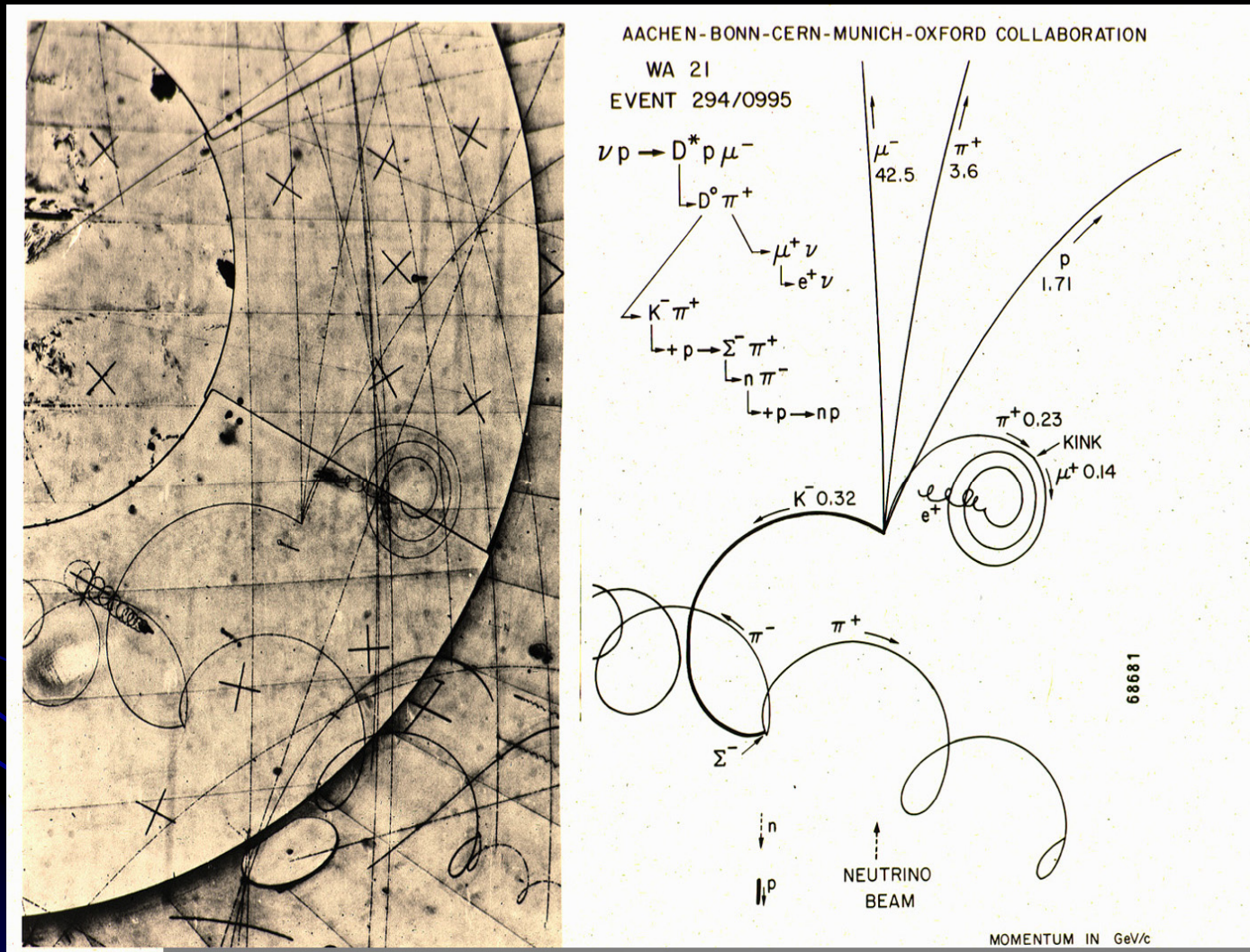


Het BEBC experiment in 1977



Het BEBC experiment in 1997

...een deeltje met een "charm" quark...



Productie en verval van een  $D^*$  (WA21, dec. 1978)

...filmbewerking...

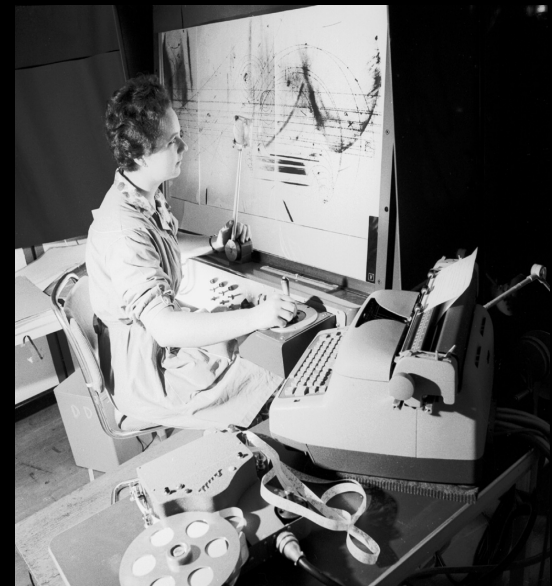


(maart 1978)

# ...en analyse...



1958



1961



1971



1967



1974

# Vonkenkamer...

- Detectie principe:
  - Paren van elektrisch geleidende platen in een edelgas (mengsel van He-Ne)
  - Van ieder paar wordt 1 plaat geaard, de ander wordt verbonden met een (gepulste) hoogspanningsvoeding die zorgt voor een elektrisch veld van  $\sim 20\text{kV/cm}$
  - Externe scintillatoren zorgen voor het moment van "vuren" van de hoogspanning
  - Primaire ionisatie zorgt vervolgens voor lawines van elektron/ion paren zodat een ontlading (vonk) ontstaat tussen de platen
  - Korte periode van meten  $\sim 1\text{ ms}$ , tot een deeltjes frequentie van  $\sim 10^6\text{ Hz}$
  - Lange "dode tijd":  $\sim 100\text{ ms}$

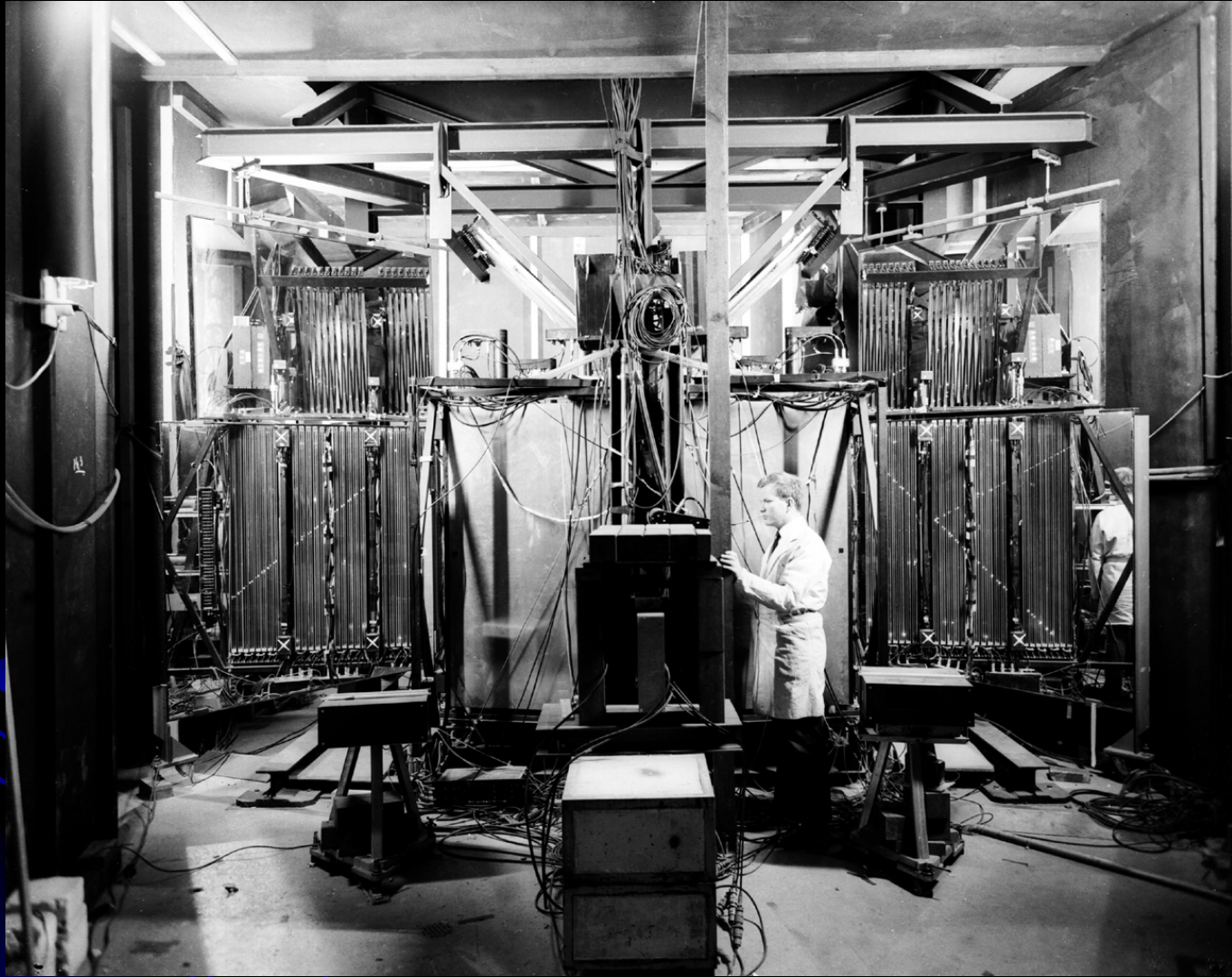


# Elektrisch geladen kosmische deeltjes doorkruizen vonkenkamer...



...ioniseren het gas. De vrije lading zorgt  
voor een kortstondige kortsluiting...

...vonkenkamer...

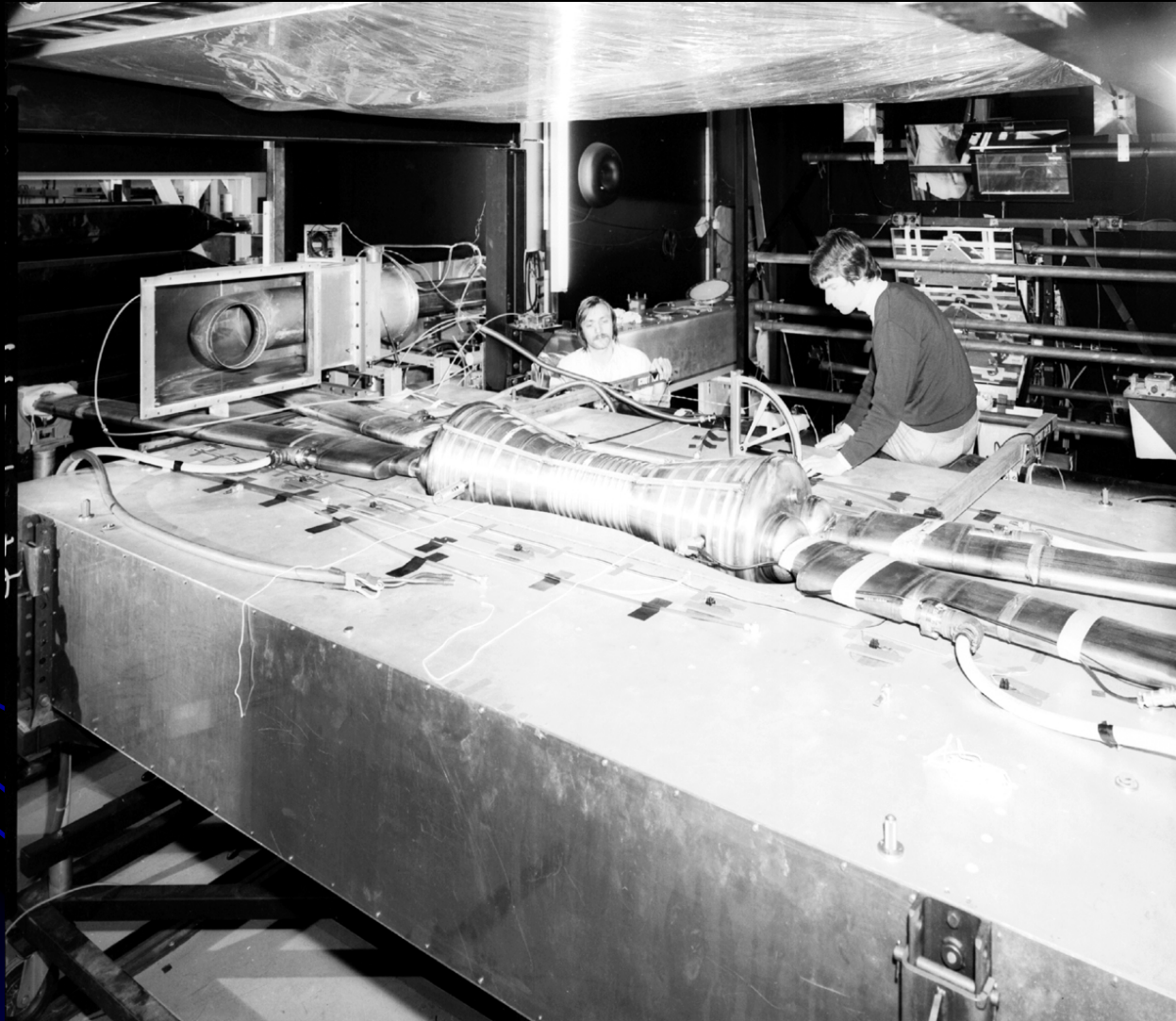


Kosmische straling gemeten in een vonkenkamer in PS11 (april 1969)

# "Streamer"-kamer...

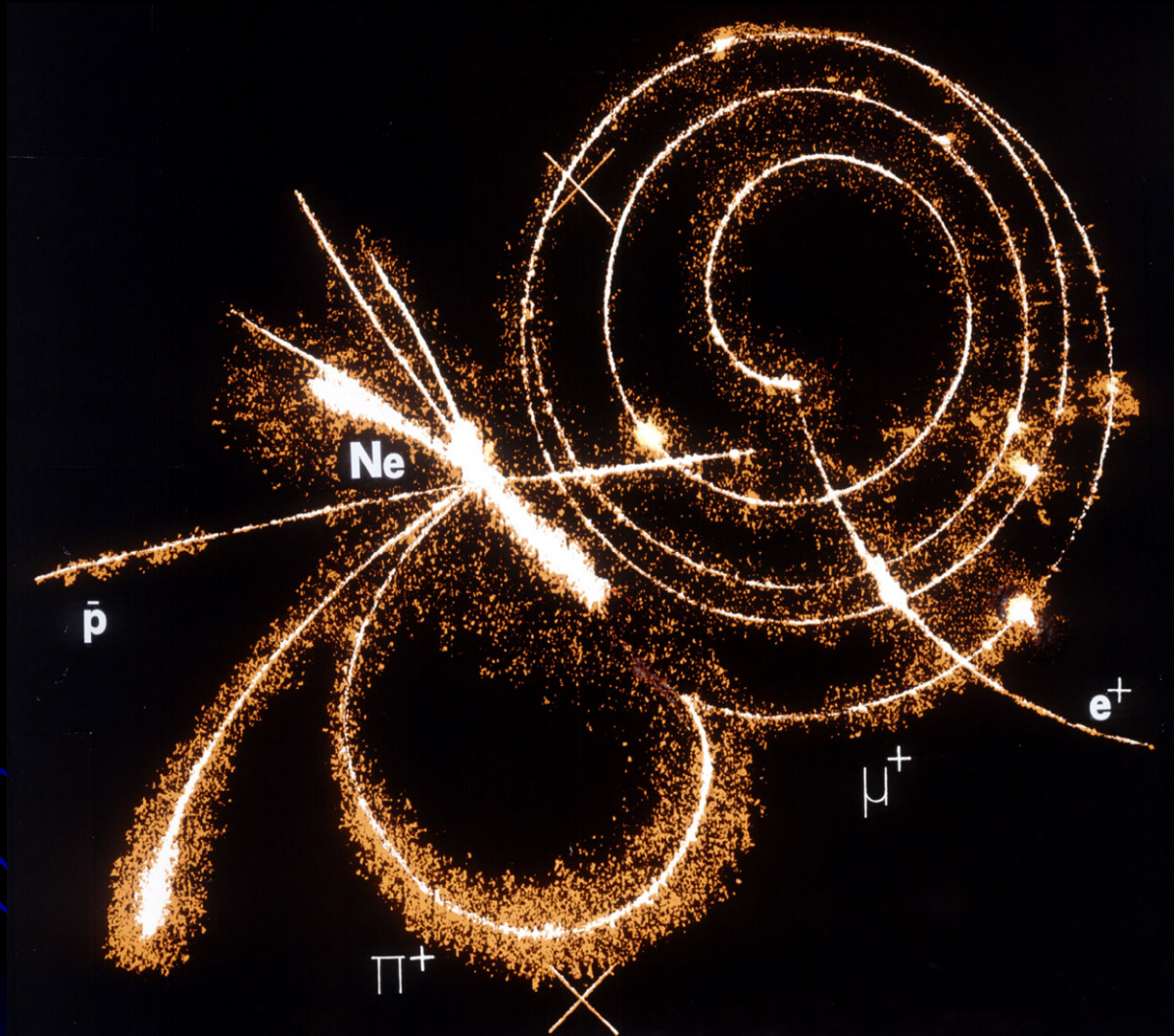
- Detectie principe:
  - Chikovani in 1963: vonkenkamer met een grote afstand tussen de platen
  - Van ieder paar wordt 1 plaat geaard, de ander wordt verbonden met een (gepulste) hoogspanningsvoeding ( $\sim 50$  kV) die zorgt voor een elektrisch veld van  $\sim 20$  kV/cm voor zeer korte tijd ( $\sim 15$  ns)
  - Externe scintillatoren zorgen voor het moment van "vuren" van de hoogspanning (trigger)
  - Primaire ionisatie zorgt vervolgens voor lawines van elektron/ion paren met lokale ontladingen ("streamers")
  - Korte periode van meten  $\sim 1$   $\mu$ s, tot een deeltjes frequentie van  $\sim 10^6$  Hz
  - Lange "dode tijd":  $\sim 300$  ms
  - Deeltjes identificatie mogelijk voor deeltjes met impuls  $< 1$  GeV/c door dichtheid "streamer" te meten

# "Streamer" kamer



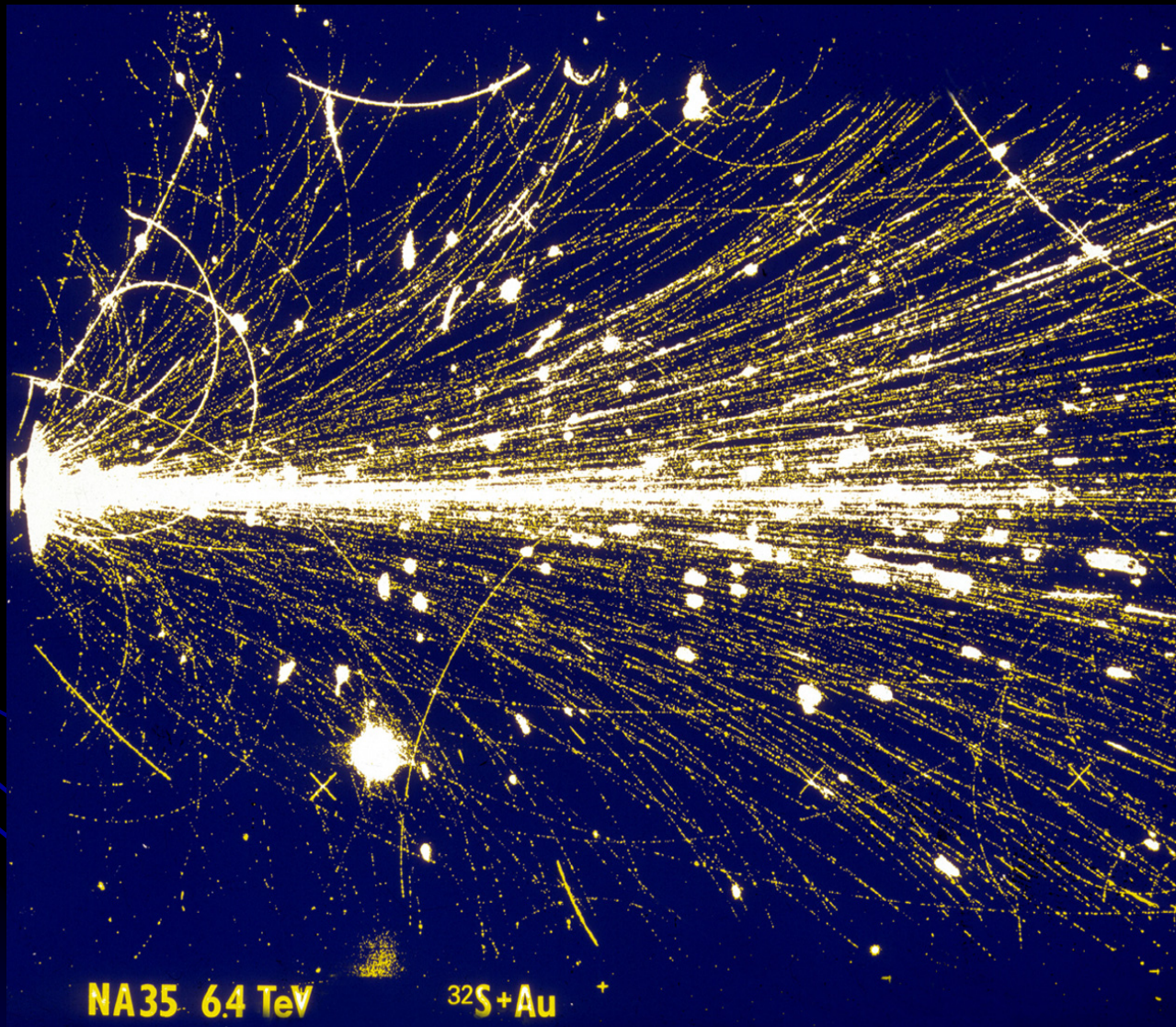
R701 "lage" streamer kamer aan de CERN ISR (jan. 1974)

# Opname in "Streamer" kamer



600 MeV antiproton interactie (LEAR - PS179) met een neon-kern waarbij een  $\pi^+$  geproduceerd wordt dat vervolgens vervalst via:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

# Opname in "Streamer" kamer



NA35: 6.4 TeV zwavel-ion geschoten op een goud doel (juli 1991)

# Samenvatting...

- Gepresenteerde detectietechnieken hebben serieuze beperkingen:
  - Beperkt ruimtelijk oplossend vermogen (precisie positiebepaling)
  - Slechte tijddresolutie (bepaling precieze tijdstip)
  - Gecompliceerde technologie om juiste moment van meten te kiezen ("trigger"). Meestal is hier een apart apparaat voor nodig
  - Lage verzadigingsdrempels zodat metingen met beperkte frequentie uitgevoerd kunnen worden
  - Mediumveranderingen met een "lange" hersteltijd ("dode tijd")
  - Gecompliceerde besturing en "Fingerspitzen Gefühl" nodig om stabiel meten te garanderen

Volgende week:

Moderne detectietechnieken en...

...vindt CERN dit jaar het Higgs deeltje?