

# ATLAS: 's-werelds grootste microscoop

Frank Filthaut

Radboud Universiteit Nijmegen / Nikhef

## Inhoud:

- Op zoek naar het kleinste
- Deeltjes en interacties
- Uitdagingen voor de deeltjesfysica
- De Large Hadron Collider

**Deel I: Op zoek naar het kleinste**

# Fysica of metafysica?

- Demokritos, ca. 460-370 BC:  
materie is opgebouwd uit atomen die zich “in de leegte” bevinden
- **ἄτομος** = ondeelbaar
- Leibniz, 1646-1716:  
“monaden”: ook ondeelbaar, maar zonder interacties
- Dalton, 1766-1844:  
materie is opgebouwd uit atomen die in chemische reacties niet veranderen

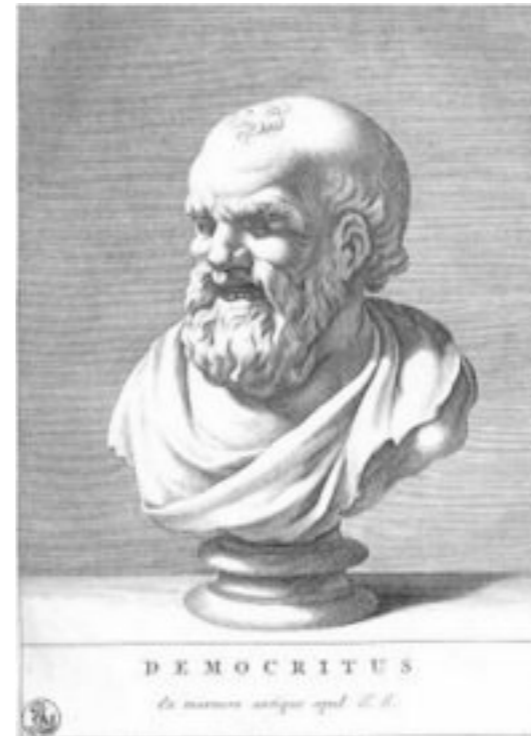


## Indrukwekkende intellectuele prestaties!

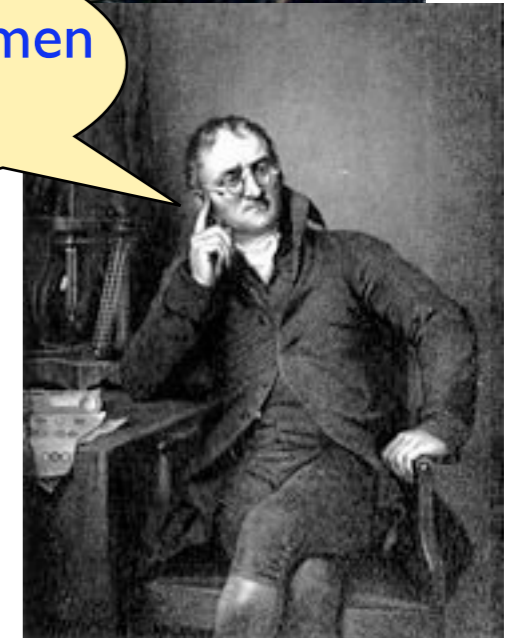
- maar zeker niet zonder competitie (andere ideeën)
- onmogelijk om zonder experiment tot eenduidige conclusies to komen

# Fysica of metafysica?

- Demokritos, ca. 460-370 BC:  
materie is opgebouwd uit atomen die zich “in de leegte” bevinden
- 'ατομος = ondeelbaar
- Leibniz, 1646-1716:  
“monaden”: ook ondeelbaar, maar zonder interacties
- Dalton, 1766-1844:  
materie is opgebouwd uit atomen die in chemische reacties niet veranderen



maar  
waaruit zijn atomen  
opgebouwd?

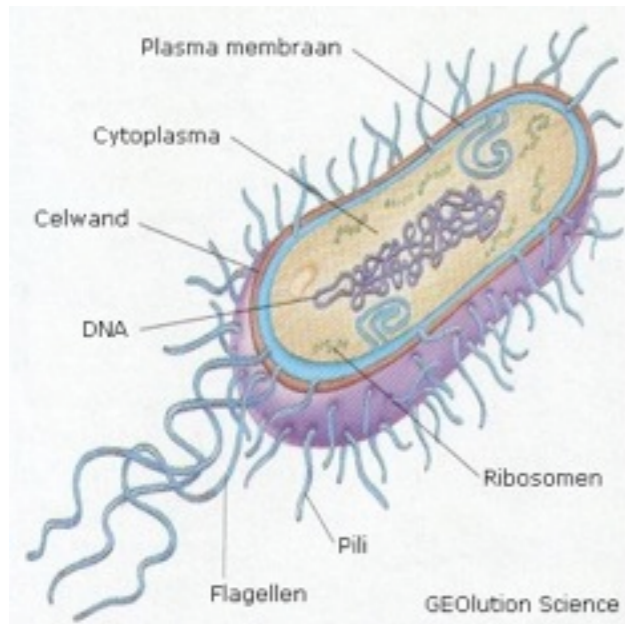


## Indrukwekkende intellectuele prestaties!

- maar zeker niet zonder competitie (andere ideeën)
- onmogelijk om zonder experiment tot eenduidige conclusies to komen

# De eerste microscoop

- **Antoni van Leeuwenhoek, 1632-1723:**
  - uitvinding van de microscoop
  - ontdekking eerste bacterieën (“kleine beestjes”), 0.5 - 500  $\mu\text{m}$



E. coli (typisch  $\sim 1 \mu\text{m}$ )

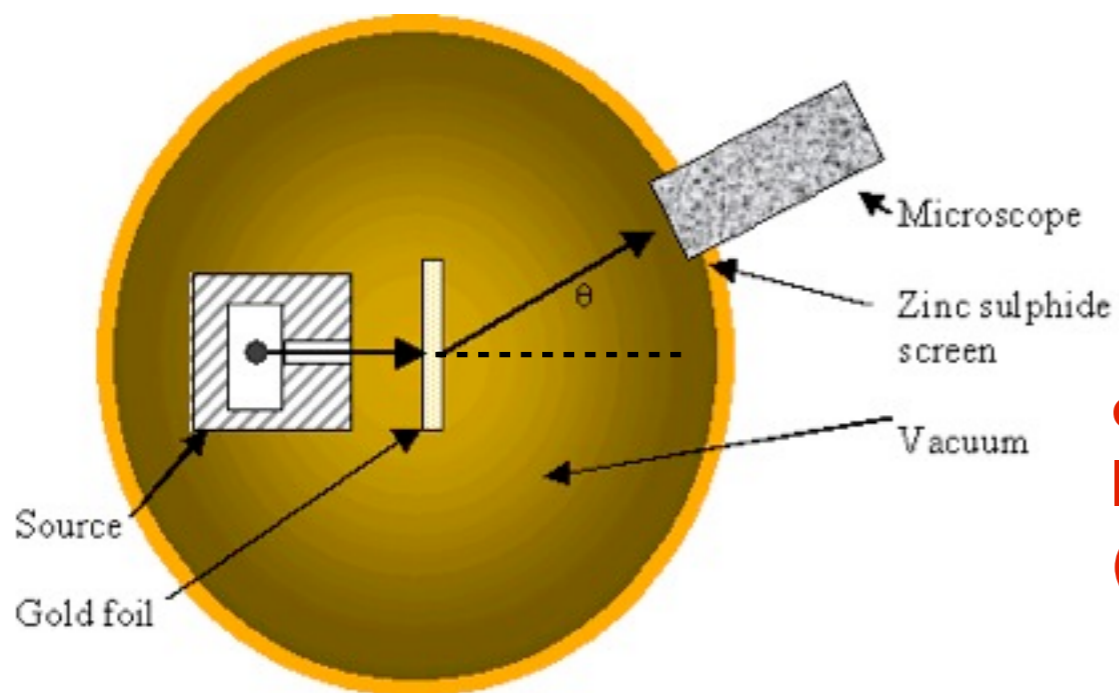


**Minimaal zichtbare afmetingen  $\sim \lambda$  (gelimiteerd door diffractie)**

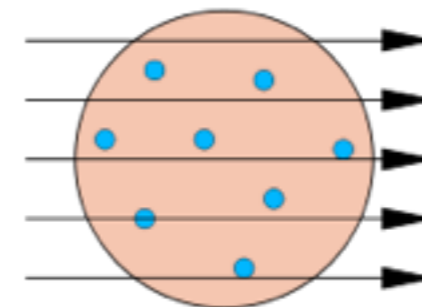
- limiet bij gebruik van zichtbaar licht: 0.5  $\mu\text{m}$
- verbetering tot  $\sim 1 \text{ \AA}$  mogelijk met **Scanning Tunneling Microscopy**, **Atomic Force Microscopy** (bestuderen van oppervlaktelagen)

# Verstrooiing van deeltjes

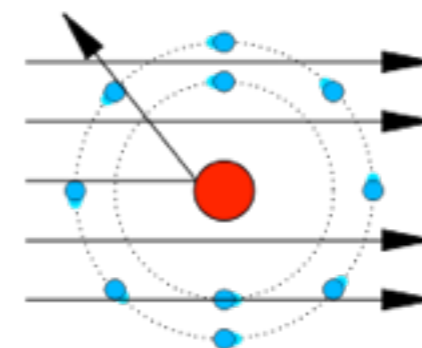
- Idee: “kijk” met deeltjes ipv. “normaal” licht
- Geiger, Marsden, 1909 (werkend voor Rutherford): verstrooiing  $\alpha$ -deeltjes ( $^4\text{He}$ -kernen) aan een goudfolie



diffuse  
ladingsverdeling  
(Thomson)



ladingsverdeling  
met kern  
(Rutherford)



# Rutherford-verstrooiing (vervolg)

Meting van verdeling van verstrooiingshoeken geeft precieze informatie over ladingsverdeling!

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto F(\vec{q}) \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$F(\vec{q}) = \int d^3x \rho(\vec{x}) e^{-i\vec{q}\cdot\vec{x}}, \quad \vec{q} = \vec{k}_{\text{uit}} - \vec{k}_{\text{in}}$$

- Verstrooiing mogelijk met verschillende soorten deeltjes
- **$\alpha$ -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor  $\alpha$ -deeltjes de sterke) wisselwerking
  - ▮▮▮ test (voornamelijk) de **elektrische ladingsverdeling**
- **neutronen (Chadwick, 1932)** voelen alleen de sterke wisselwerking
  - ▮▮▮ test de **verdeling van kernmaterie**



# Rutherford-verstrooiing (vervolg)

werkzame doorsnede meet interactiewaarschijnlijkheid, gecorrigeerd voor deeltjesflux

Meting van verdeling van verstrooiingshoeken geeft precieze informatie over ladingsverdeling!

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto F(\vec{q}) \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$F(\vec{q}) = \int d^3x \rho(\vec{x}) e^{-i\vec{q}\cdot\vec{x}}, \quad \vec{q} = \vec{k}_{\text{uit}} - \vec{k}_{\text{in}}$$

- Verstrooiing mogelijk met verschillende soorten deeltjes
- **$\alpha$ -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor  $\alpha$ -deeltjes de sterke) wisselwerking
  - ▮▮▮ test (voornamelijk) de **elektrische ladingsverdeling**
- **neutronen (Chadwick, 1932)** voelen alleen de sterke wisselwerking
  - ▮▮▮ test de **verdeling van kernmaterie**

# Rutherford-verstrooiing (vervolg)

Meting van verdeling van verstrooiingshoeken geeft precieze informatie over ladingsverdeling!

Fouriertransformatie van de ladingsverdeling  $\rho(x)$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto F(\vec{q}) \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$F(\vec{q}) = \int d^3x \rho(\vec{x}) e^{-i\vec{q}\cdot\vec{x}}, \quad \vec{q} = \vec{k}_{\text{uit}} - \vec{k}_{\text{in}}$$

- Verstrooiing mogelijk met verschillende soorten deeltjes
- **$\alpha$ -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor  $\alpha$ -deeltjes de sterke) wisselwerking
  - ▮▮▮ test (voornamelijk) de **elektrische ladingsverdeling**
- **neutronen (Chadwick, 1932)** voelen alleen de sterke wisselwerking
  - ▮▮▮ test de **verdeling van kernmaterie**

# Rutherford-verstrooiing (vervolg)

Meting van verdeling van verstrooiingshoeken geeft precieze informatie over ladingsverdeling!

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto F(\vec{q}) \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

$$F(\vec{q}) = \int d^3x \rho(\vec{x}) e^{-i\vec{q}\cdot\vec{x}}, \quad \vec{q} = \vec{k}_{\text{uit}} - \vec{k}_{\text{in}}$$

in- en uitgaande  
golfvectoren,  
 $\vec{p} = \hbar\vec{k}$

- Verstrooiing mogelijk met verschillende soorten deeltjes
- $\alpha$ -deeltjes/elektronen “voelen” de electromagnetische (en voor  $\alpha$ -deeltjes de sterke) wisselwerking
  - ▮▮▮ test (voornamelijk) de elektrische ladingsverdeling
- neutronen (Chadwick, 1932) voelen alleen de sterke wisselwerking
  - ▮▮▮ test de verdeling van kernmaterie

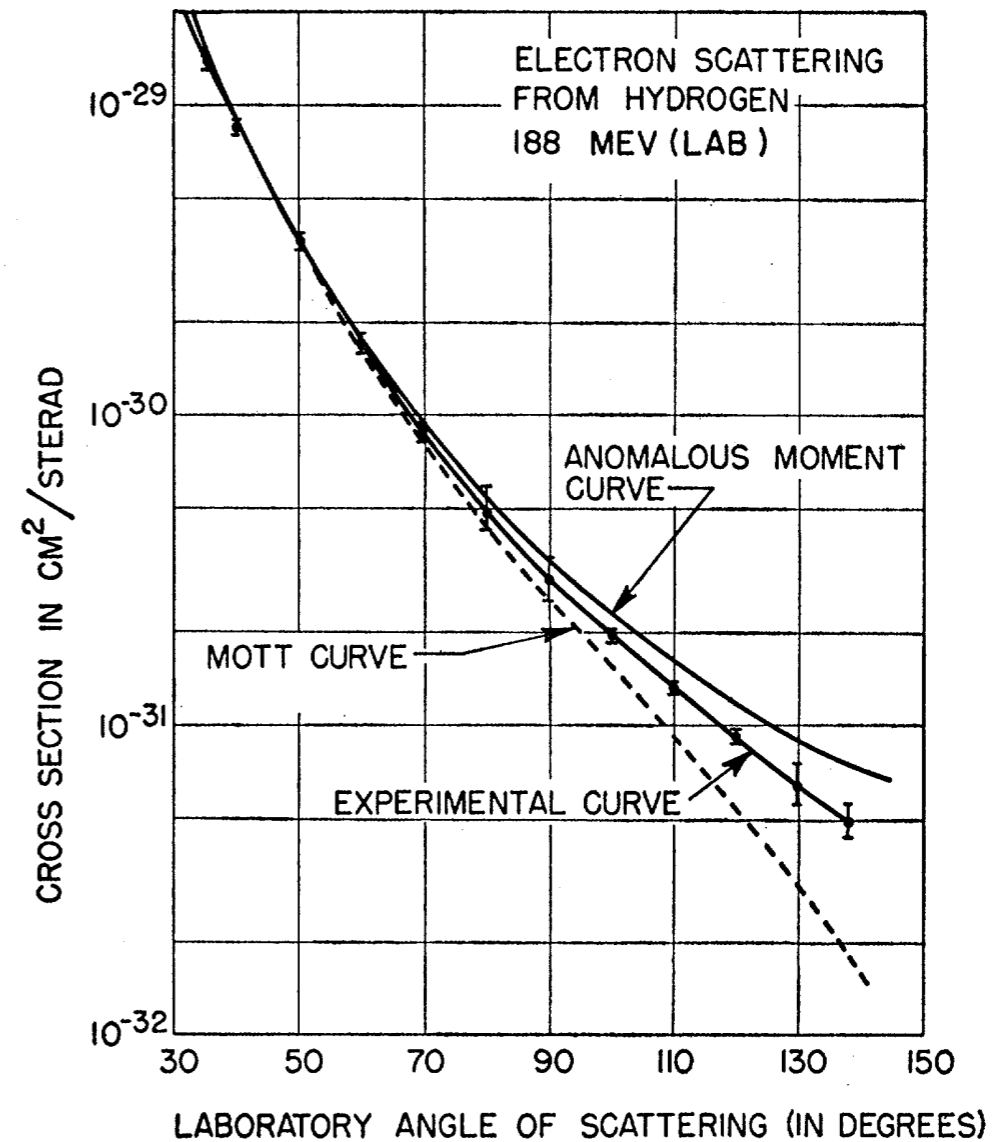
# Structuur van het proton

- Met hogere bundelenergieën kunnen kleinere afstanden zichtbaar gemaakt worden (de Broglie-golflengte  $\lambda = h/p$ )

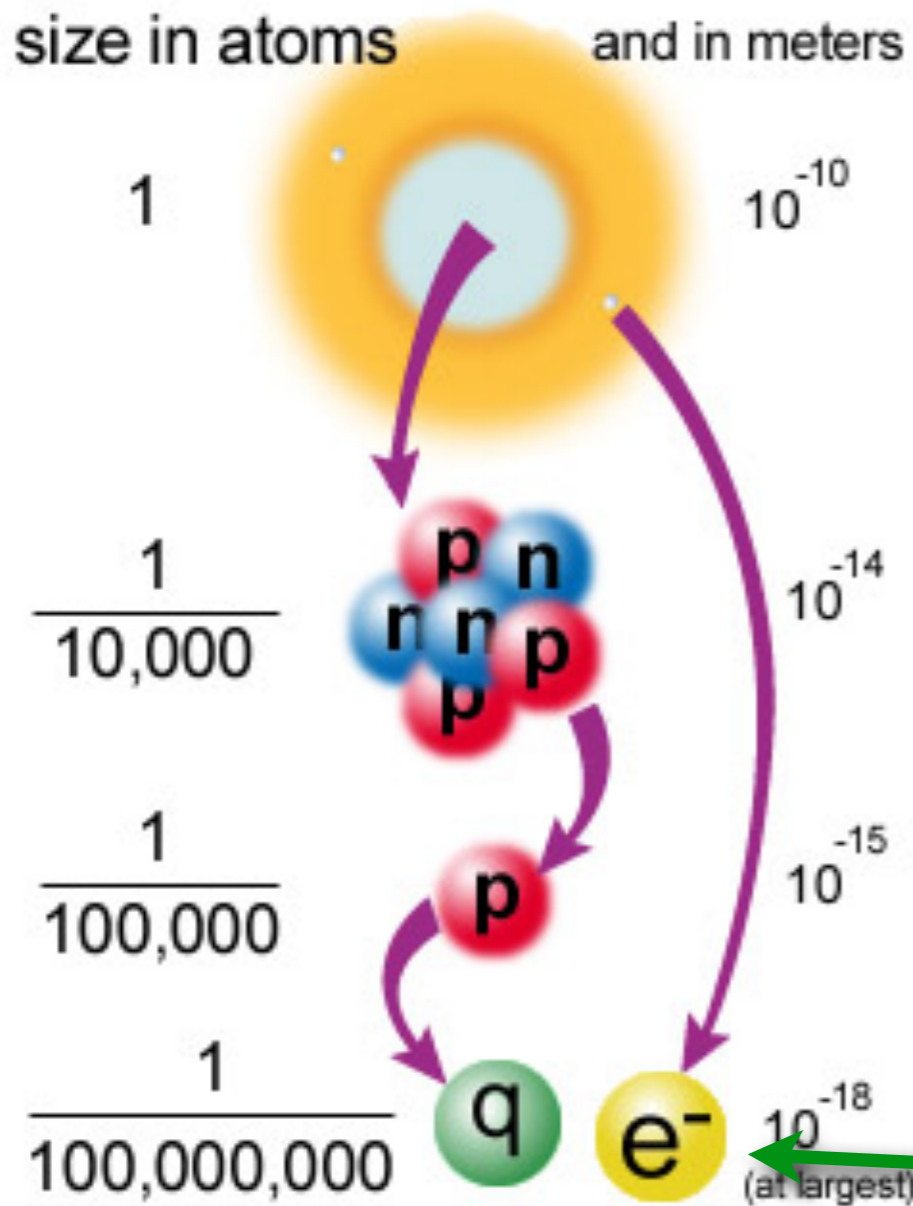
- Hofstadter, 1955: elastische elektron-proton verstrooiing bij hoge energieën ( $\sim 200$  MeV)



- het proton is geen puntdeeltje maar heeft eindige afmetingen,  $r_p \approx 0.7$  fm
- ook gedetailleerde studies van zwaardere kernen



# Structuur van het proton (2)



Herhaling van Rutherford's  $\alpha$ -deeltjes experiment: **diep-inelastische electron-proton verstrooiing**  $e^- + p \rightarrow e^- + X$



Friedman, Kendall, Taylor ('68): het proton (en het neutron) **bevatten deeltjes zonder verdere substructuur!**

- quarks

# Deel II: Deeltjes en interacties

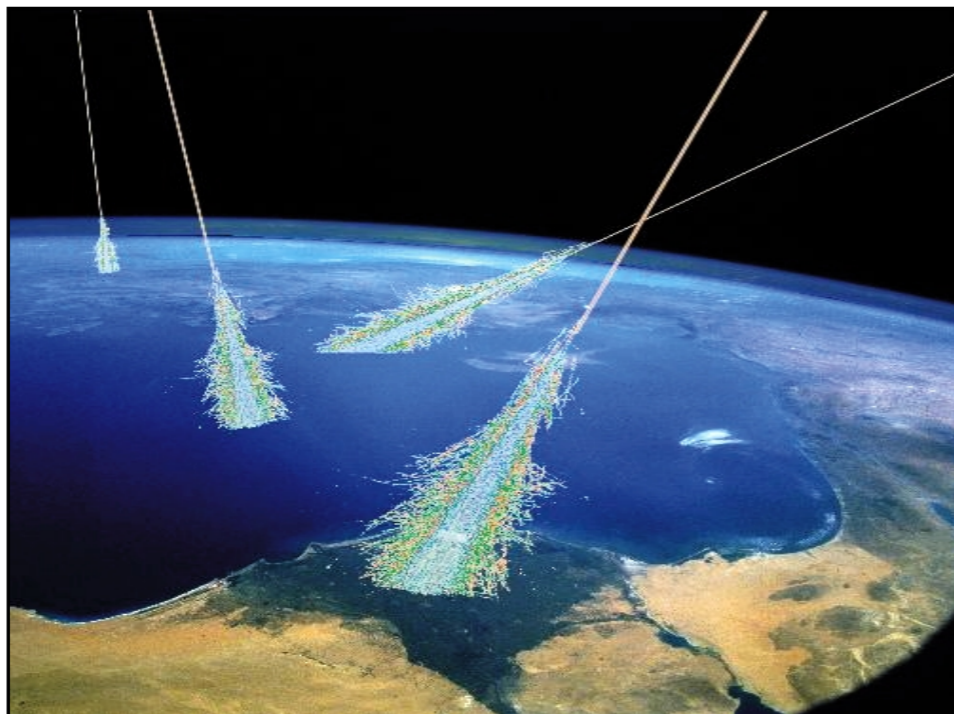
# Quantum-Electrodynamica

- Voortgekomen uit combineren **Speciale Relativiteitstheorie** en **Quantummechanica**  $\Rightarrow$  **quantum-veldentheorie**

- **Dirac (1928)**: **spin** wordt integraal onderdeel van de bewegingsvergelijking (Dirac-vgl)

$$(i\partial_{\mu}\gamma^{\mu} - m)\psi = 0$$

- bonus: **antideeltjes**
- **Anderson (1932)**: ontdekking  $e^{+}$  mbv kosmische straling



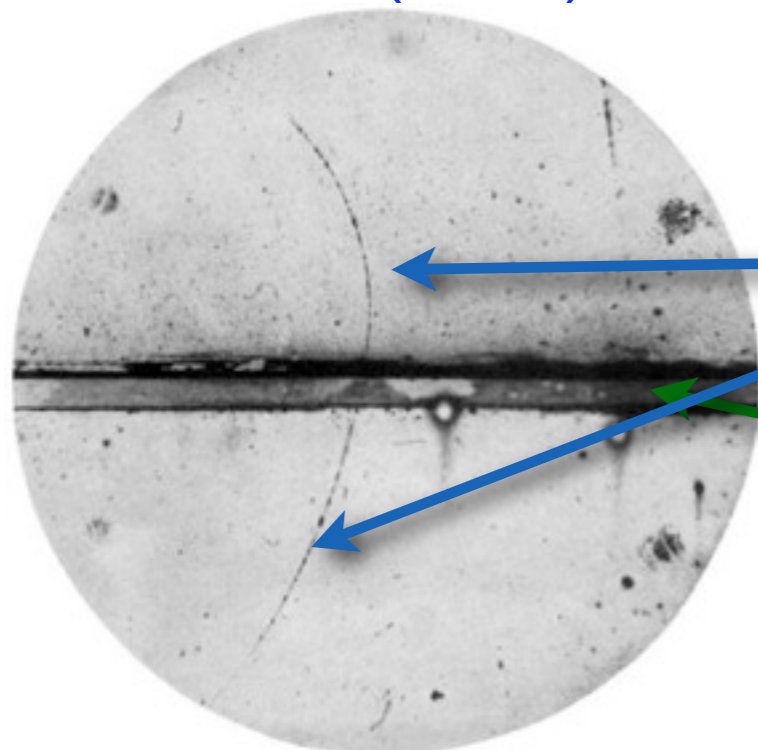
# Quantum-Electrodynamica

- Voortgekomen uit combineren **Speciale Relativiteitstheorie** en **Quantummechanica**  $\Rightarrow$  **quantum-veldentheorie**

- **Dirac (1928)**: **spin** wordt integraal onderdeel van de bewegingsvergelijking (Dirac-vgl)

$$(i\partial_\mu \gamma^\mu - m)\psi = 0$$

- **bonus: antideeltjes**
- **Anderson (1932)**: ontdekking  $e^+$  mbv kosmische straling



kromming in homogeen B-veld: impulsmeting

energieverlies in lood-plaat



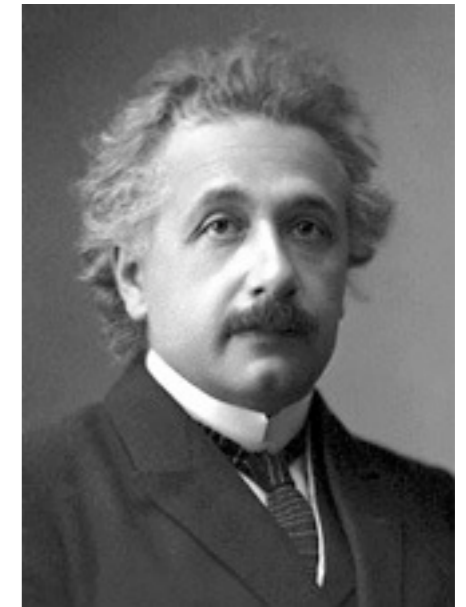
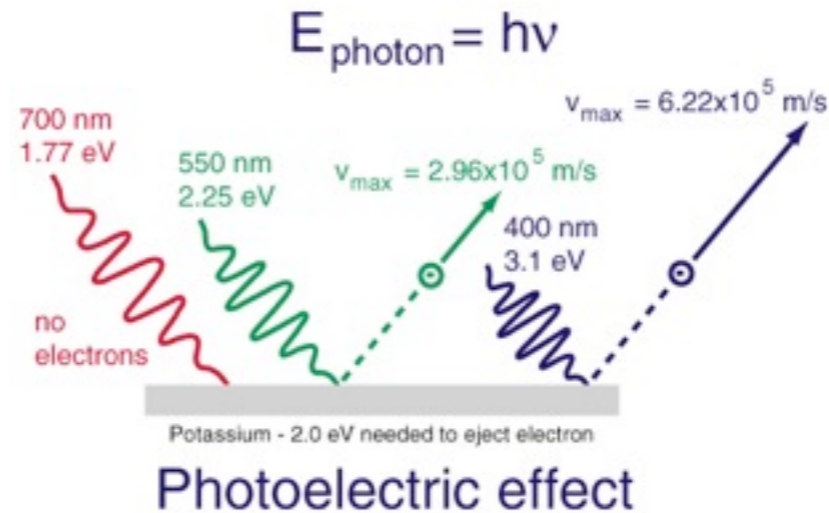
FIG. 1. A 63 million volt positron ( $H_p=2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p=7.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



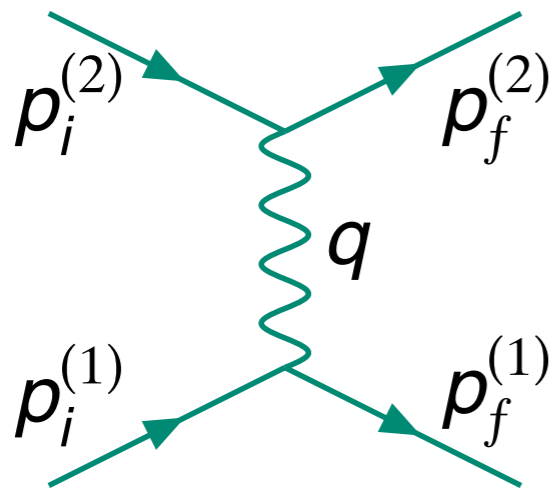
# Quantum-Electrodynamica

- Einstein (1905): foto-elektrisch effect  
    ➔ deeltjeskarakter fotonen

relatie met kinematica  $e^-$



- EM interactie dmv uitwisselen van fotonen



Grafische representatie:  
Feynman-diagrammen  
(intuïtieve manier van het  
berekenen van QM  
overgangsamplitudes)



# Het magnetisch dipoolmoment

- Bekend QM systeem: interactie van magnetisch dipoolmoment met homogeen magneetveld

$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \vec{\mu} = \gamma \vec{S} \equiv g \left( \frac{q}{2m} \right) \vec{S}$$

- Zeemansplitsing van (atomaire) energieniveaus
- Spin-precessie round B-field, Larmor-frequentie  $\omega = \gamma B$
- QED geeft een voorspelling voor  $g$  (i.t.t. “gewone” QM)!

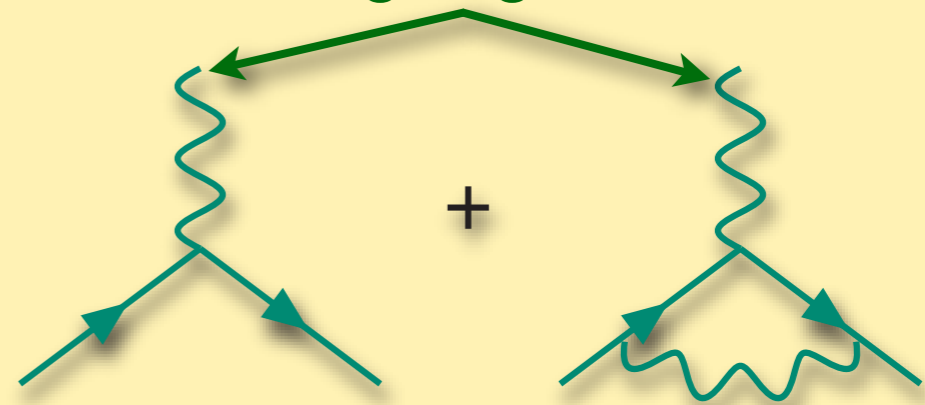
- In laagste orde, uit Dirac-vergelijking:  
 $g=2$

- Storingstheorie (quantum-correcties):  
ontwikkeling in machten (t/m  $5^e$ ) van  
de fijn-structuur constante

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi}$$

bijdragen in  $0^e$  en  $1^e$  orde

uitwendig magneetveld



# Het magnetisch dipoolmoment

- Bekend QM systeem: interactie van magnetisch dipoolmoment met homogeen magneetveld

$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \vec{\mu} = \gamma \vec{S} \equiv g \left( \frac{q}{2m} \right) \vec{S}$$

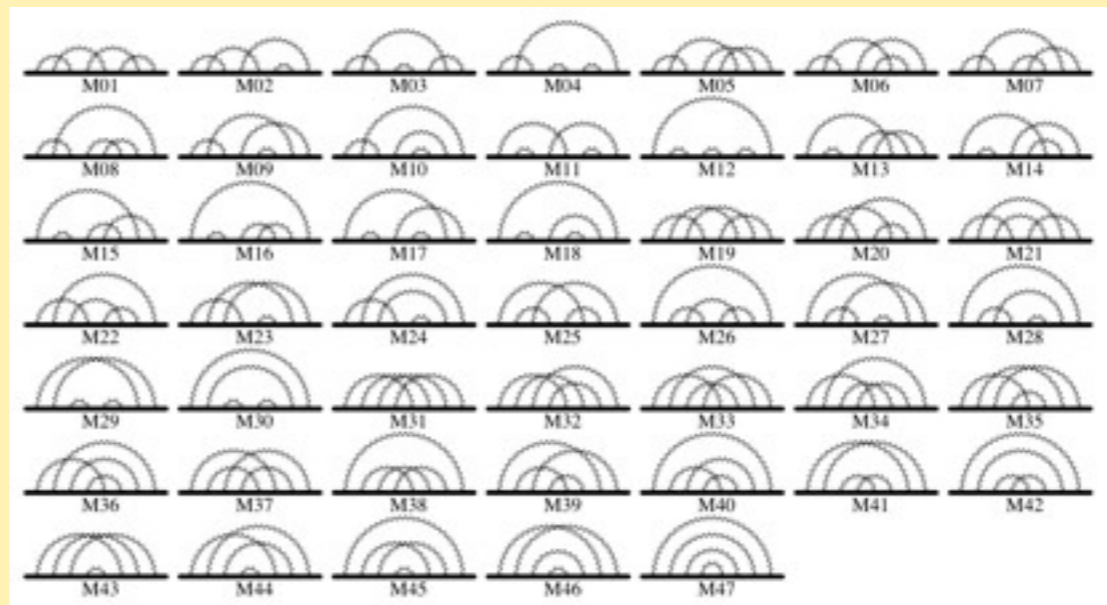
- Zeemansplitsing van (atomaire) energieniveaus
- Spin-precessie round B-field, Larmor-frequentie  $\omega = \gamma B$
- QED geeft een voorspelling voor  $g$  (i.t.t. “gewone” QM)!

- In laagste orde, uit Dirac-vergelijking:  
 $g=2$

- Storingstheorie (quantum-correcties):  
ontwikkeling in machten (t/m  $5^e$ ) van  
de fijn-structuur constante

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi}$$

gedeelte van  $5^e$ -orde bijdragen



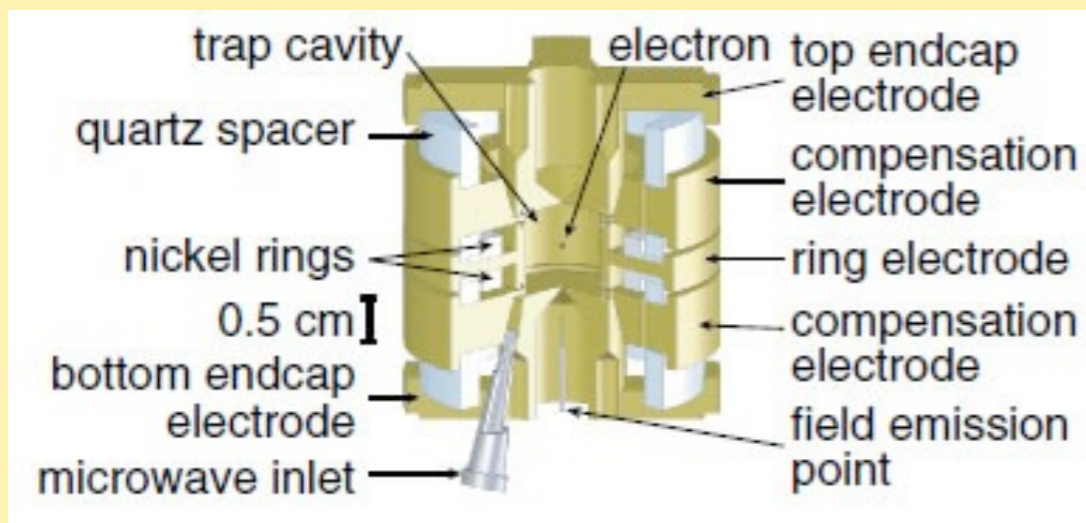
# Het magnetisch dipoolmoment

- Bekend QM systeem: interactie van magnetisch dipoolmoment met homogeen magneetveld

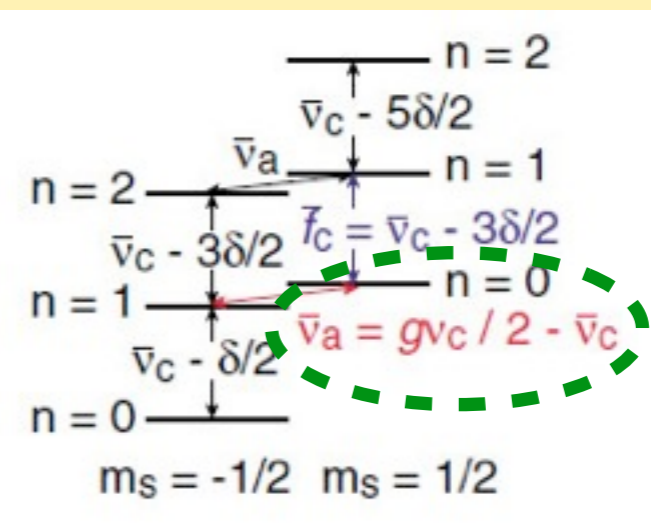
$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \vec{\mu} = \gamma \vec{S} \equiv g \left( \frac{q}{2m} \right) \vec{S}$$

- Zeemansplitsing van (atomaire) energieniveaus
- Spin-precessie round B-field, Larmor-frequentie  $\omega = \gamma B$
- QED geeft een voorspelling voor  $g$  (i.t.t. “gewone” QM)!

G. Gabrielse et al., 2008  
cylindrische “Penning-val”



Observeer een enkel electron gedurende meerdere maanden!



# Het magnetisch dipoolmoment

- **Bekend QM systeem:** interactie van magnetisch dipoolmoment met homogeen magneetveld

$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \vec{\mu} = \gamma \vec{S} \equiv g \left( \frac{q}{2m} \right) \vec{S}$$

- **Zeemansplitsing** van (atomaire) energieniveaus
- Spin-precessie round B-field, **Larmor-frequentie**  $\omega = \gamma B$
- QED geeft een **voorspelling** voor  $g$  (i.t.t. “gewone” QM)!

Vergelijking theorie en experiment:

# Het magnetisch dipoolmoment

- **Bekend QM systeem:** interactie van magnetisch dipoolmoment met homogeen magneetveld

$$H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \vec{\mu} = \gamma \vec{S} \equiv g \left( \frac{q}{2m} \right) \vec{S}$$

- **Zeemansplitsing** van (atomaire) energieniveaus
- Spin-precessie round B-field, **Larmor-frequentie**  $\omega = \gamma B$
- QED geeft een **voorspelling** voor  $g$  (i.t.t. “gewone” QM)!

Vergelijking theorie en experiment:

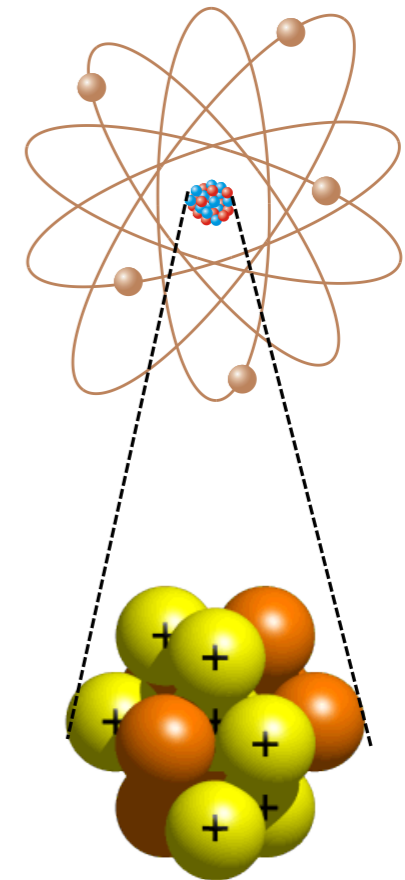
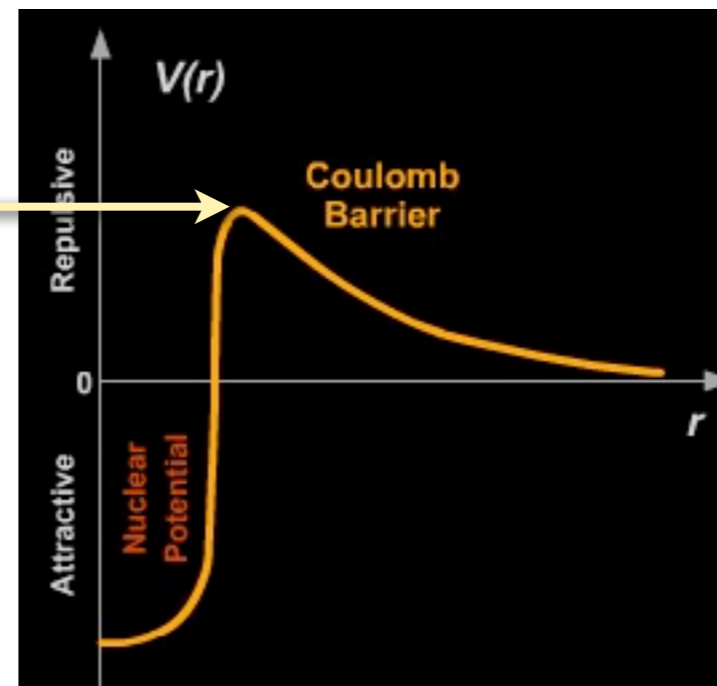
$$g/2 = \begin{cases} 1.00115965218073(28) & \text{(experiment)} \\ 1.00115965218085(76) & \text{(theorie)} \end{cases}$$

**QED werkt!**

# Wat houdt atoomkernen bijeen?

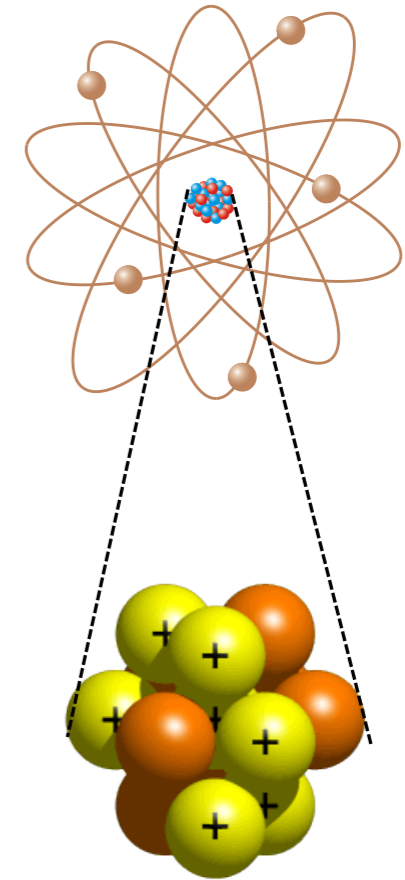
- Sterke wisselwerking:
- sterk genoeg om **Coulomb-afstoting** te overwinnen
- maar alleen merkbaar op kleine afstand?

tot ~ 10 MeV

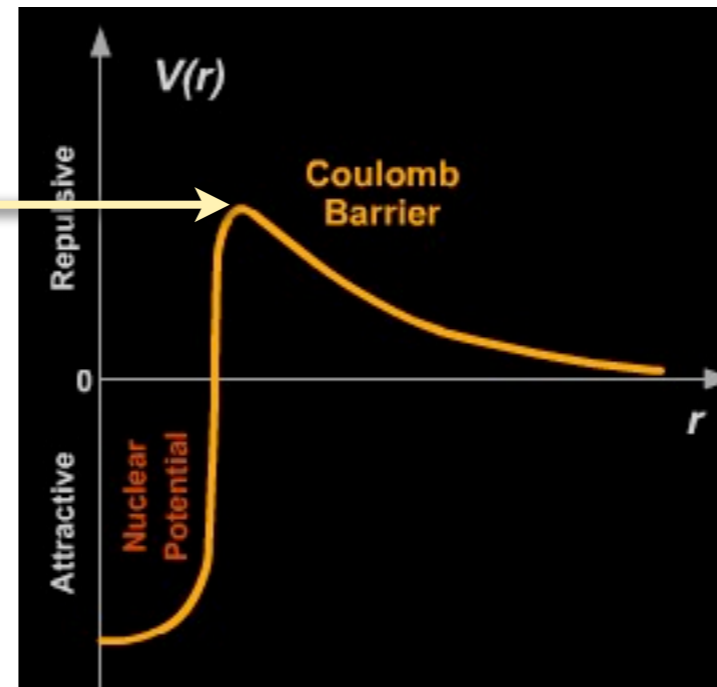


# Wat houdt atoomkernen bijeen?

- Sterke wisselwerking:
  - sterk genoeg om **Coulomb-afstoting** te overwinnen
  - maar alleen merkbaar op kleine afstand?

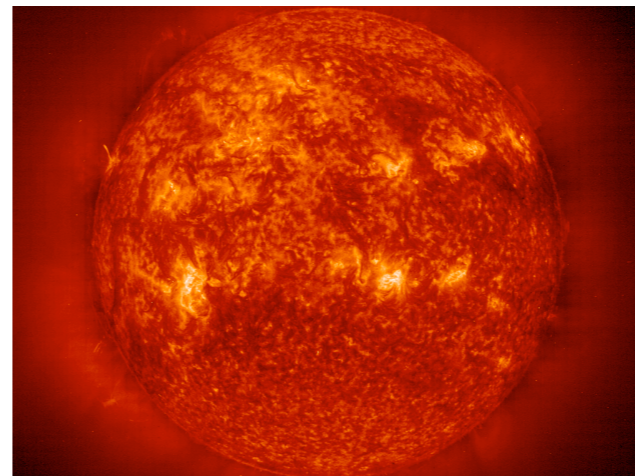


tot ~ 10 MeV



Essentieel voor...

1	H									2	He																								
3	Li	4	Be					5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																
11	Na	12	Mg					13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	103	Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt																		
57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb								
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No								

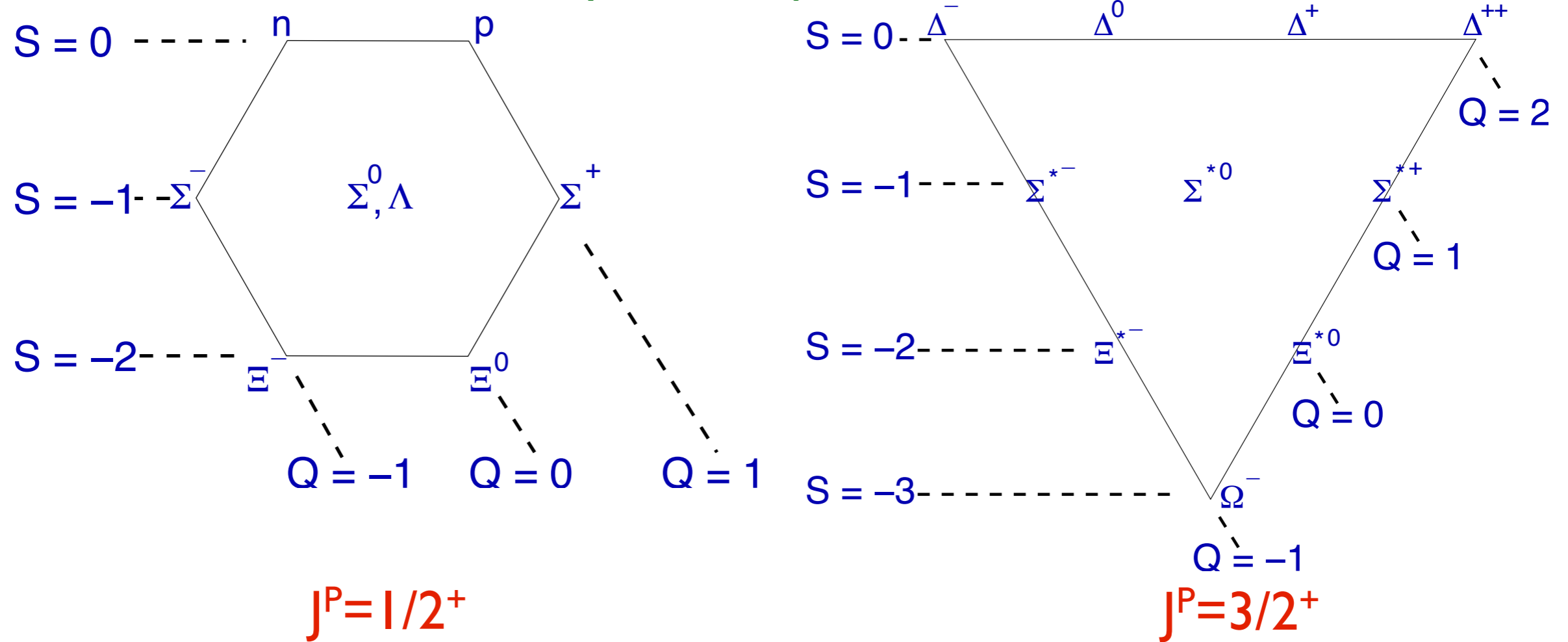




# Hadronen

- Meer dan alleen protonen en neutronen!

Baryonen: 3 quarks



**groepentheorie:** SU(3) symmetrie (goede benadering bij lage energie)  
**mesonen:** meest geproduceerd in botsingen bij hoge energie  
**levensduur:** bijna alle deeltjes leven kort ( $10^{-7}$ s) tot zeer kort ( $10^{-22}$ s)

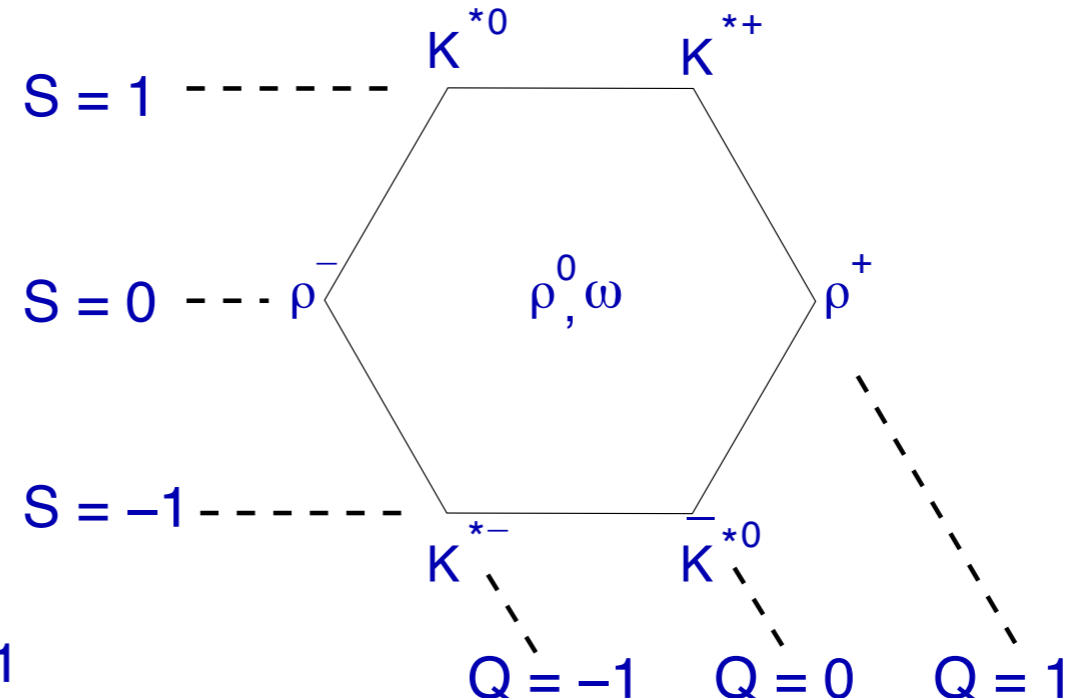
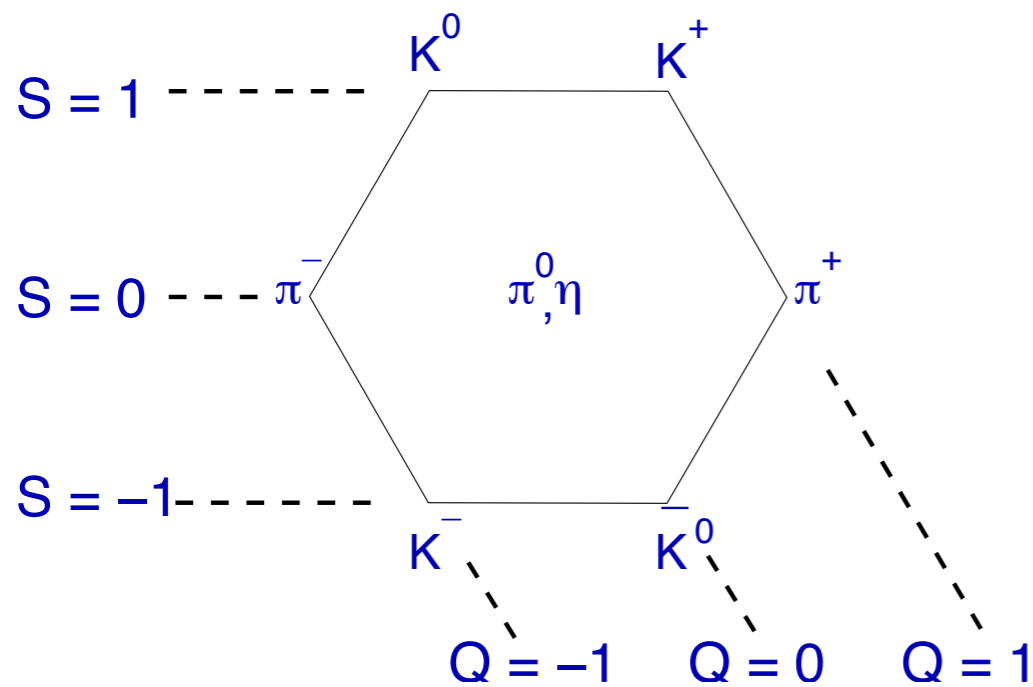
# Hadronen

- Meer dan alleen protonen en neutronen!

Mesonen: 1 quark + 1 antiquark

$J^P=0^-$

$J^P=1^-$



groepentheorie: SU(3) symmetrie (goede benadering bij lage energie)  
 mesonen: meest geproduceerd in botsingen bij hoge energie  
 levensduur: bijna alle deeltjes leven kort ( $10^{-7}s$ ) tot zeer kort ( $10^{-22}s$ )

# Hadronen

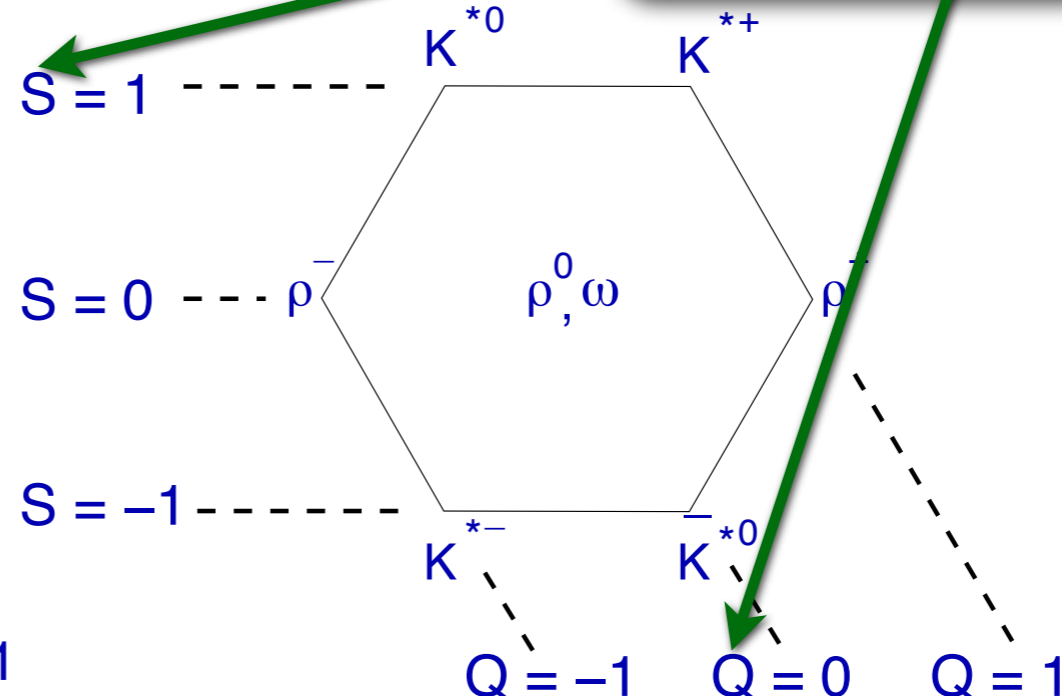
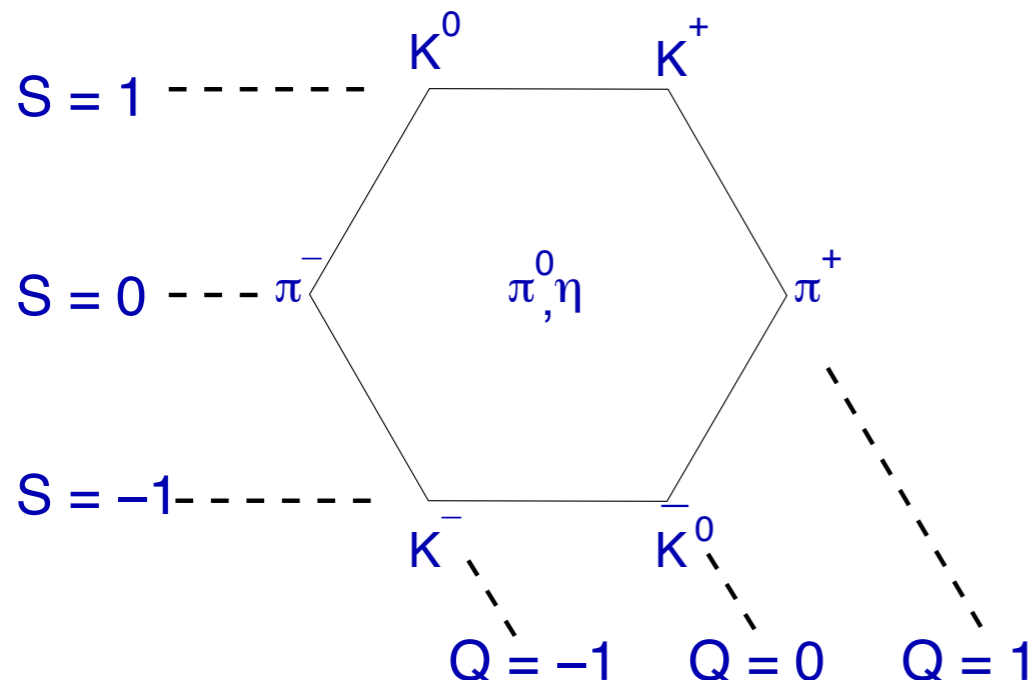
- Meer dan alleen protonen en neutronen!

Mesonen: 1 quark + 1 antiquark

$J^P=0^-$

$J^P=1^-$

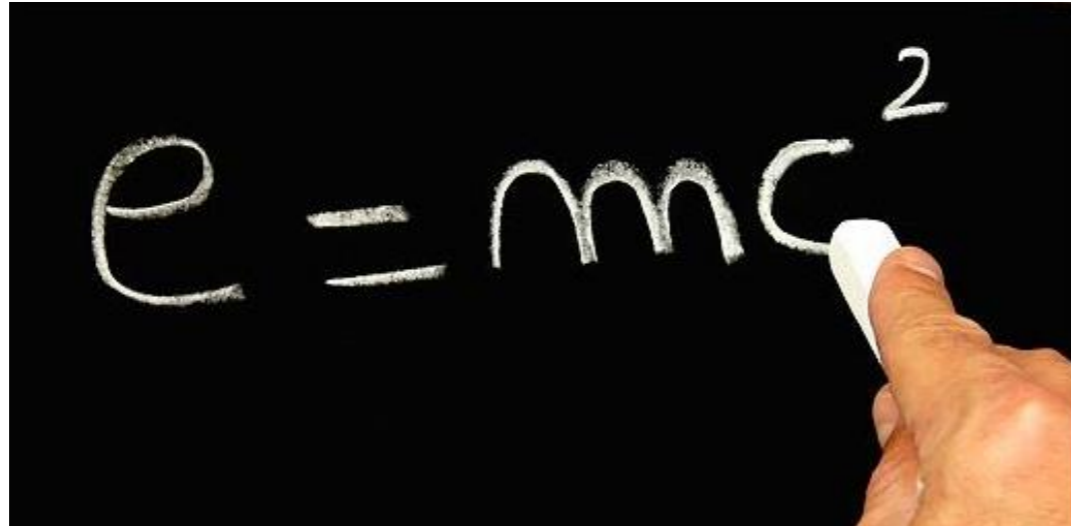
Klassificatie met behulp van Quantumgetallen (behouden in sterke wisselwerking):  
spin  $J$ , lading  $Q$ , "strangeness"  $S$  (# s/anti-s quarks), ...

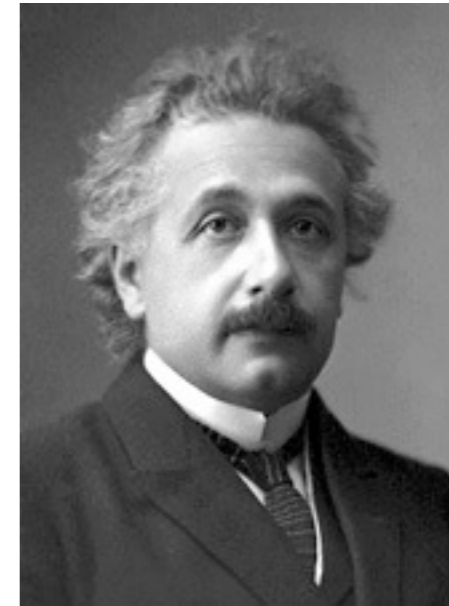


groepentheorie: SU(3) symmetrie (goede benadering bij lage energie)  
mesonen: meest geproduceerd in botsingen bij hoge energie  
levensduur: bijna alle deeltjes leven kort ( $10^{-7}s$ ) tot zeer kort ( $10^{-22}s$ )

# Intermezzo: technieken

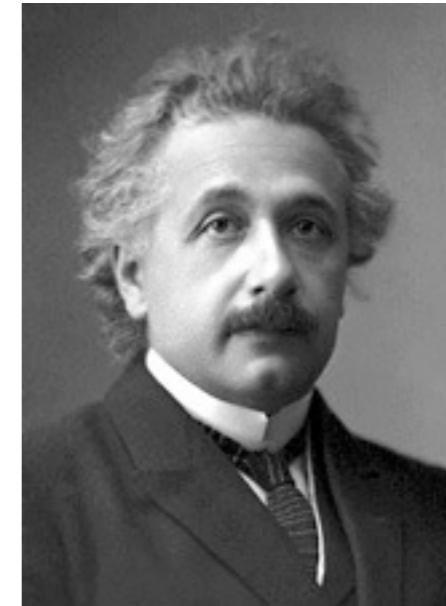
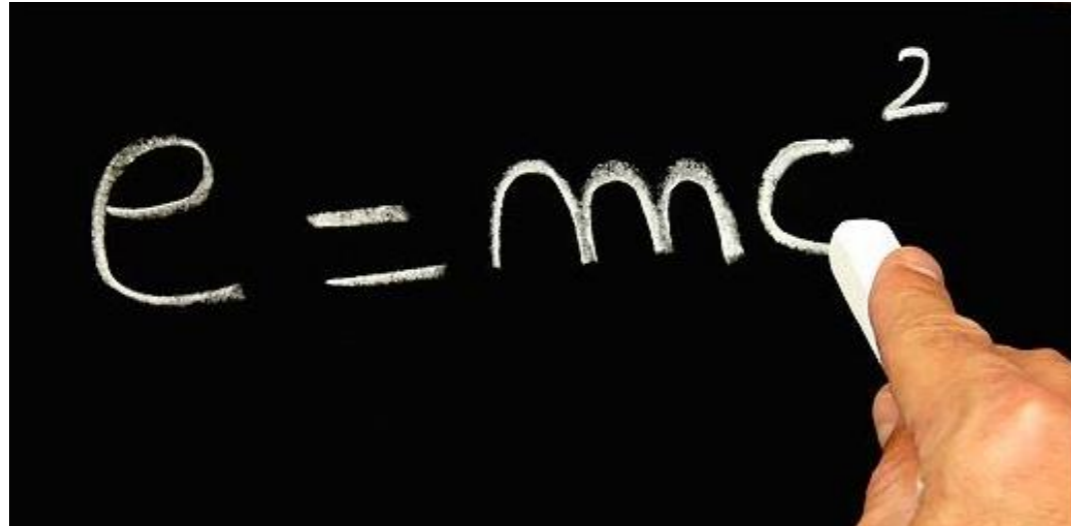
- Hoe deze kortlevende deeltjes te produceren / waar te nemen?

A close-up photograph of a hand holding a white marker, writing the equation  $E = mc^2$  on a blackboard. The hand is positioned at the bottom right, with the marker tip touching the 'c' in the equation. The equation is written in white chalk on a black background.

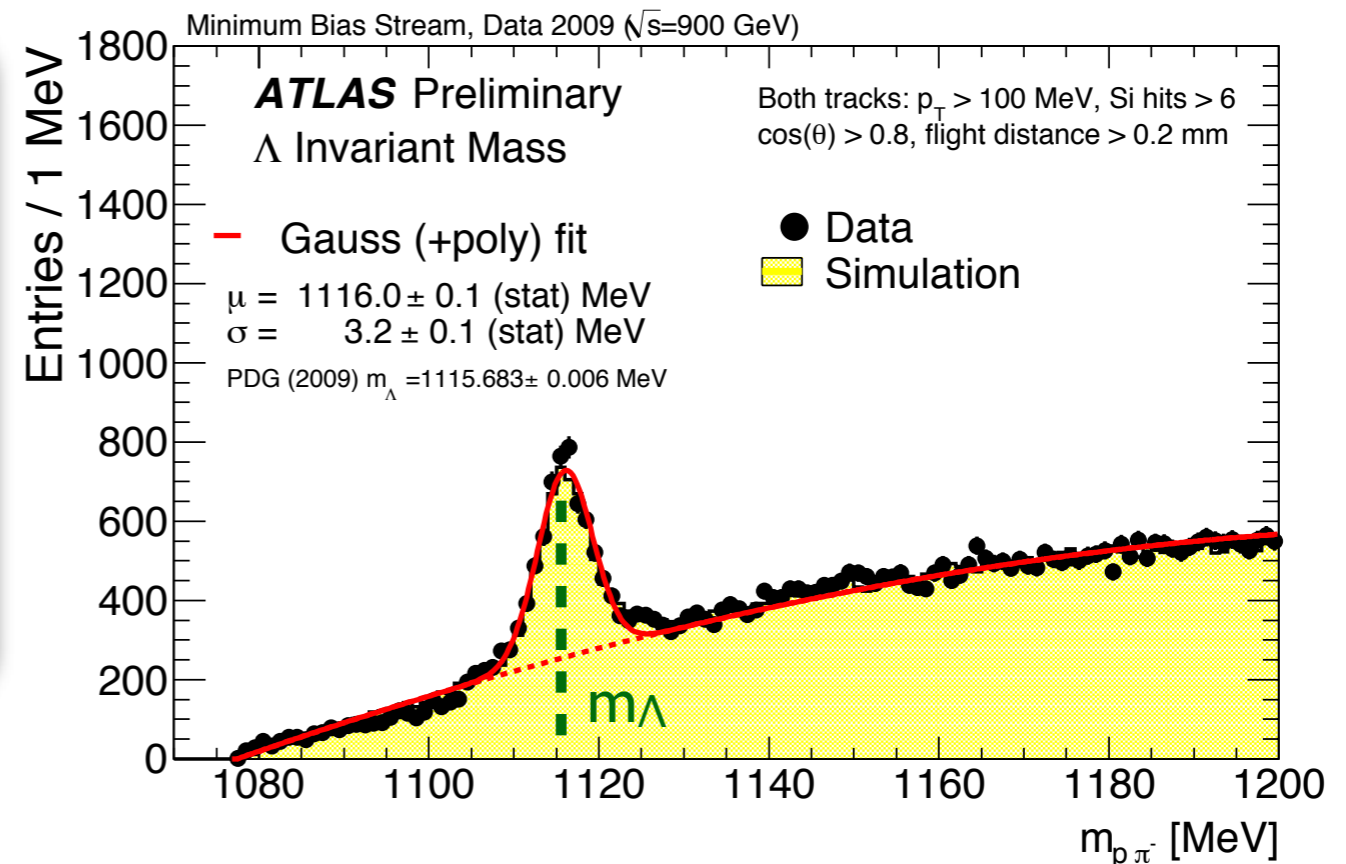


# Intermezzo: technieken

- Hoe deze kortlevende deeltjes te produceren / waar te nemen?



- in botsingen: converteer kinetische energie in massa
- in vervalprocessen: reconstrueer massa van het vervallen deeltje

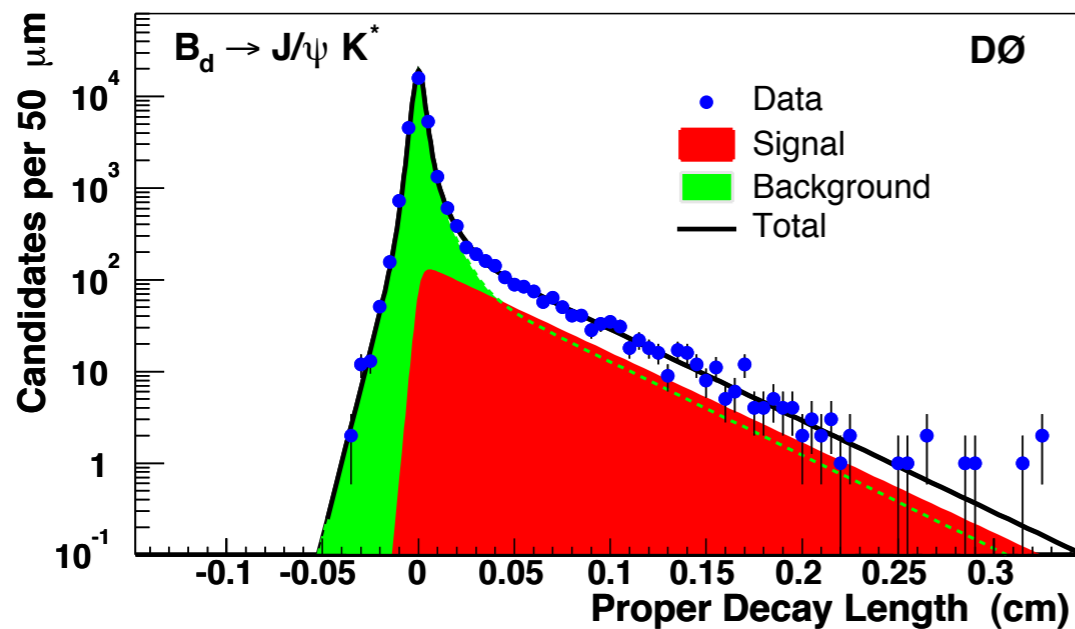


# Intermezzo: technieken (2)

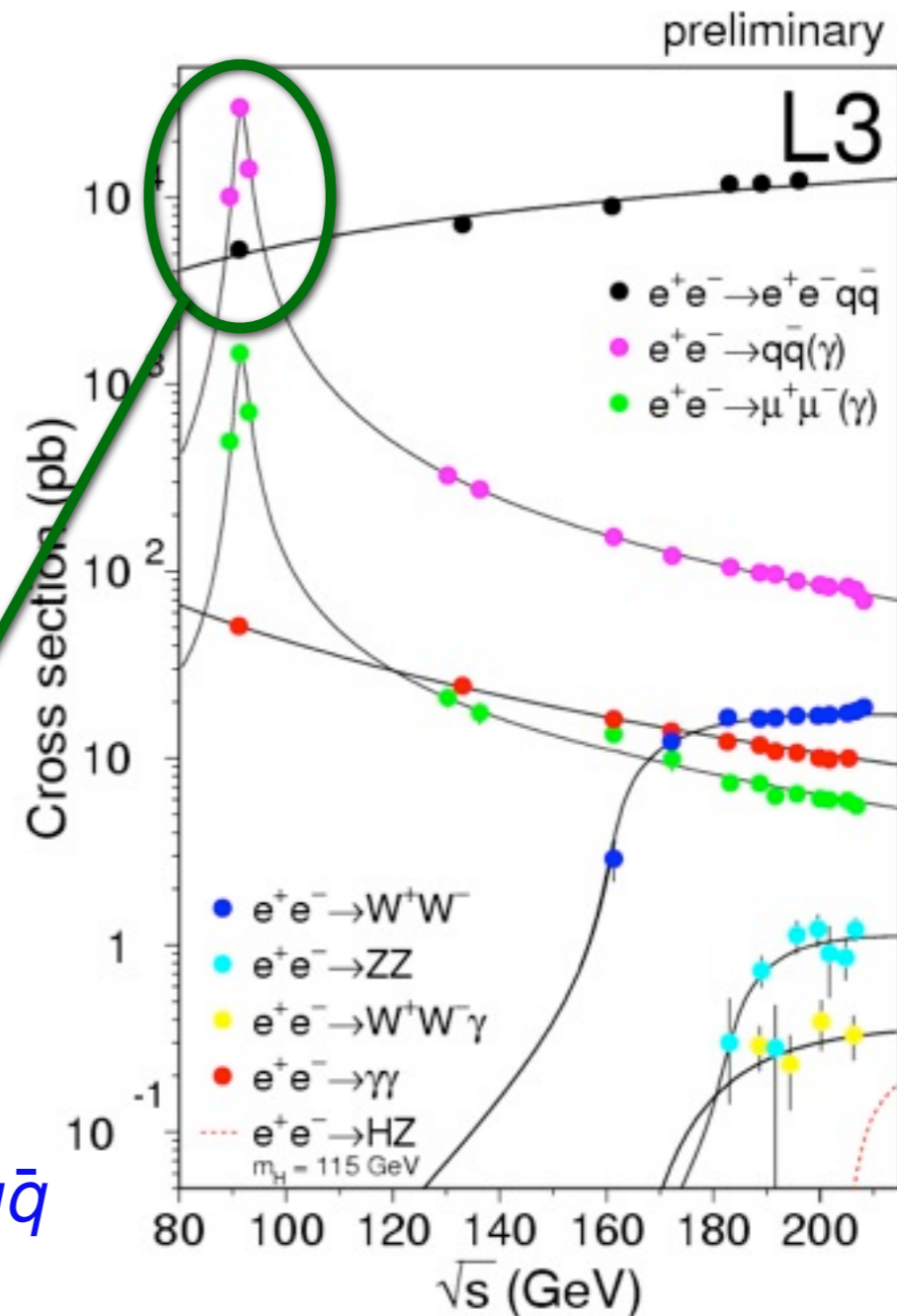
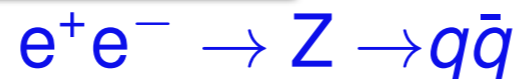
- En hoe hun levensduren te meten?

$$\tau \gtrsim 1 \text{ ps}$$

$$\tau \lesssim 10^{-20} \text{ s}$$



Gebruik de onzekerheidsrelatie van Heisenberg:  $\tau = 1/\Gamma$



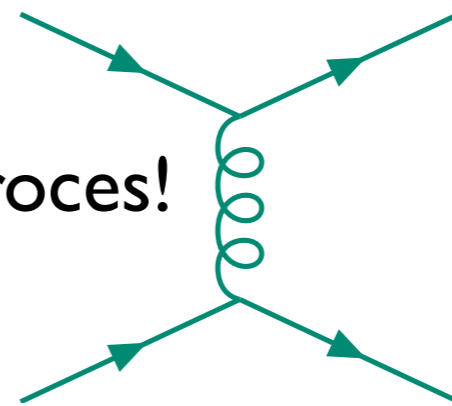
# Sterke wisselwerking (2)

- Opbouw van hadronen uit quarks (en/of antiquarks): te begrijpen uit **een nieuwe vrijheidsgraad** (en interactie), **kleur**

- interactie tussen quarks dmv uitwisselen gluonen

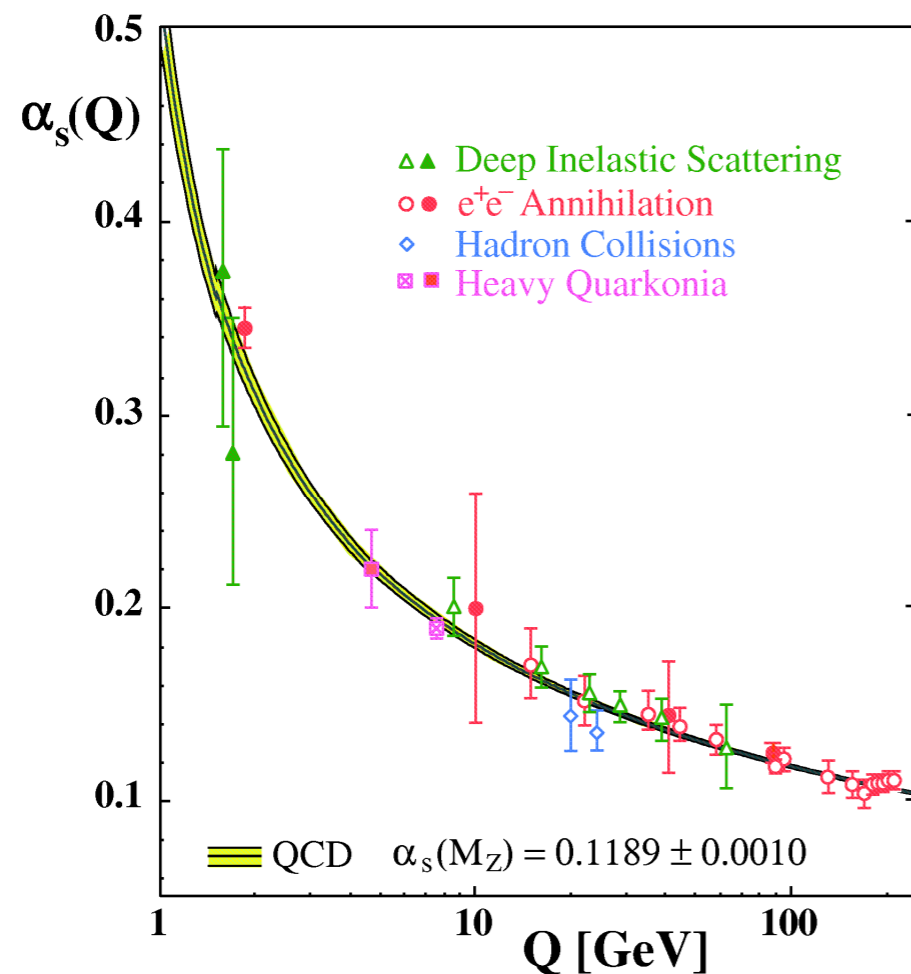
$$q \rightarrow \begin{pmatrix} q_r \\ q_g \\ q_b \end{pmatrix}$$

- quark **verandert van kleur** in dit proces!



$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$$

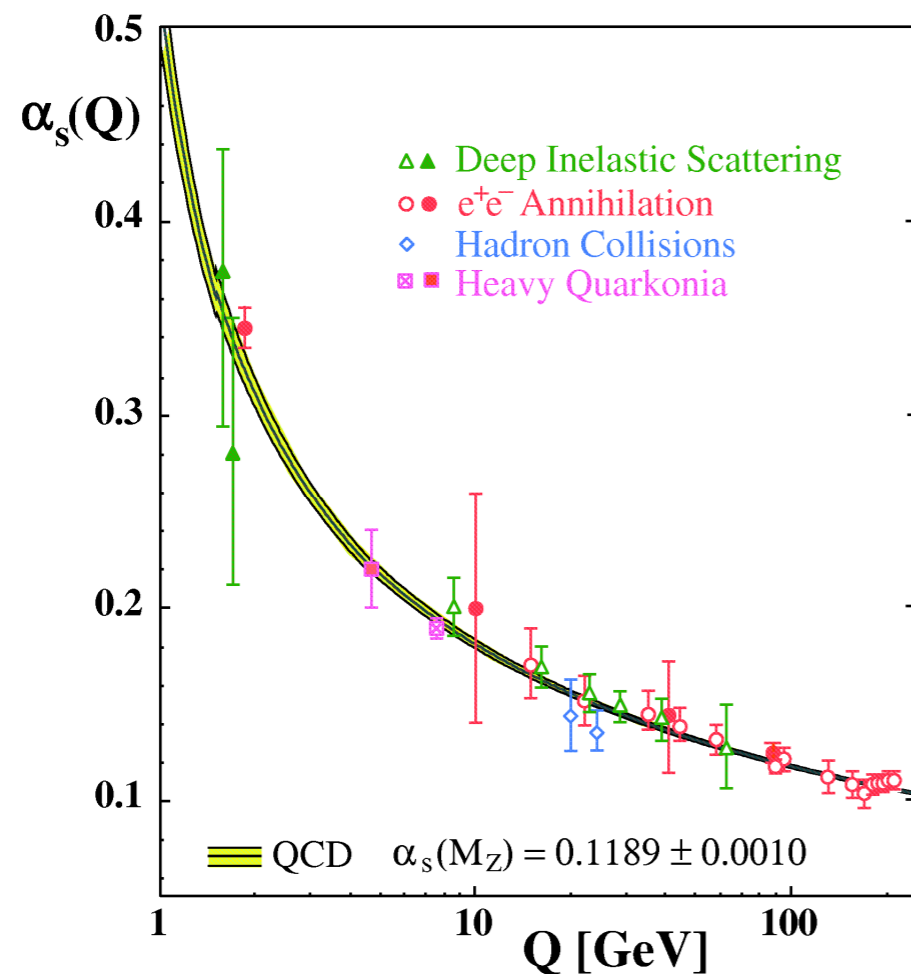
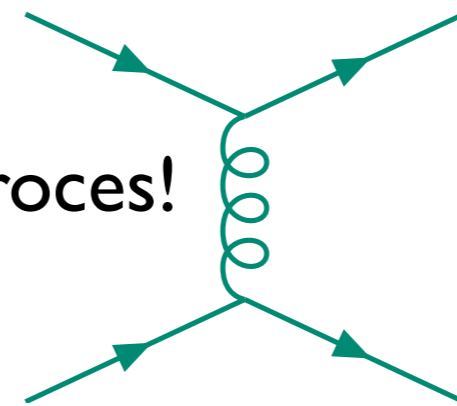
Effectieve koppelingsconstante:  
neemt **correcties** tgv  
**storingstheorie** mee



# Sterke wisselwerking (2)

- Opbouw van hadronen uit quarks (en/of antiquarks): te begrijpen uit een nieuwe vrijheidsgraad (en interactie), **kleur**
- interactie tussen quarks dmv uitwisselen gluonen  $q \rightarrow \begin{pmatrix} q_r \\ q_g \\ q_b \end{pmatrix}$

- quark **verandert van kleur** in dit proces!



$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$$



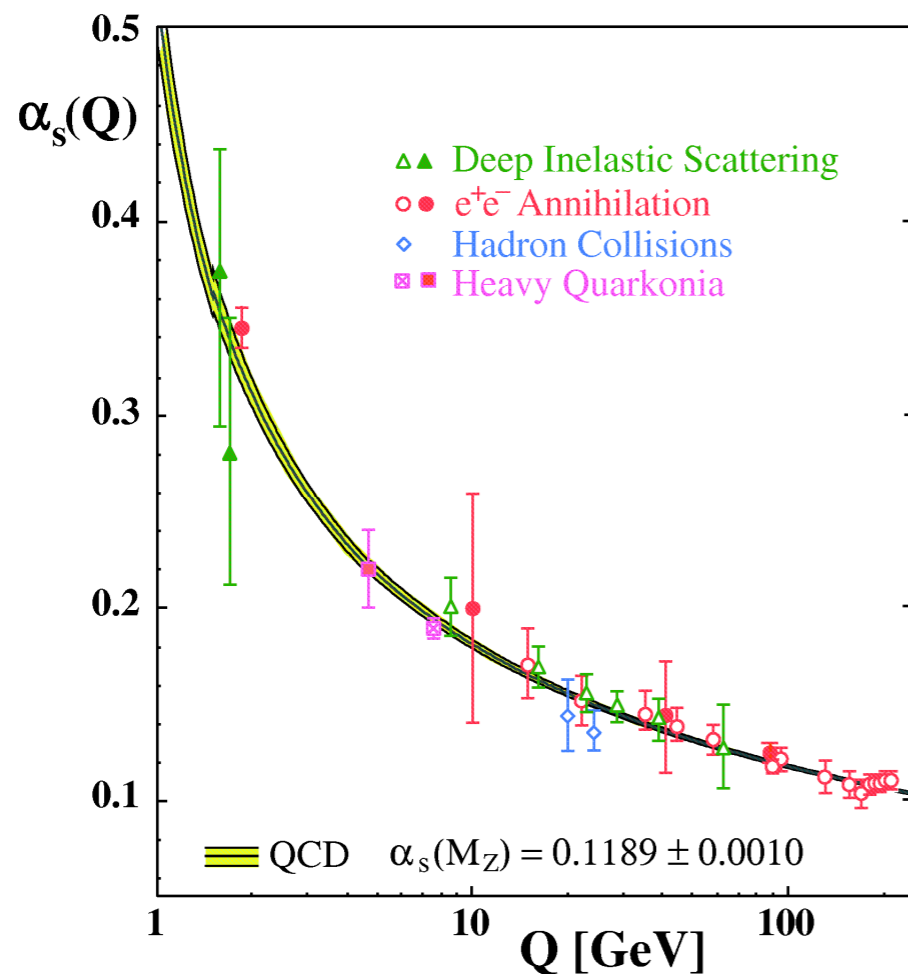
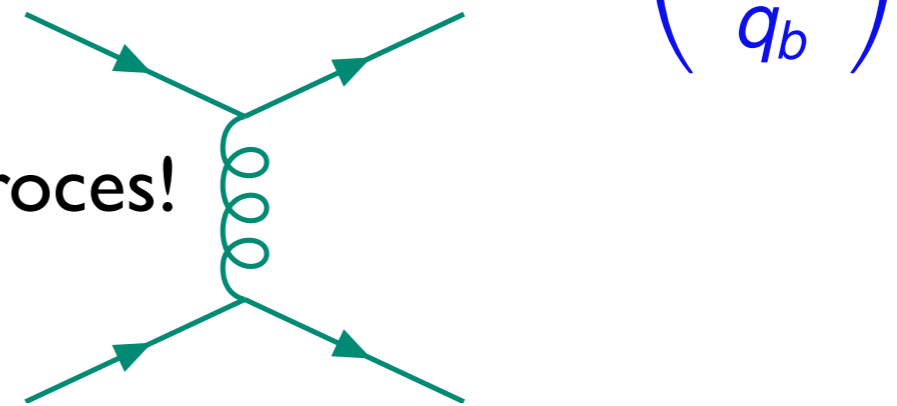
Quarks opgesloten bij lage energie



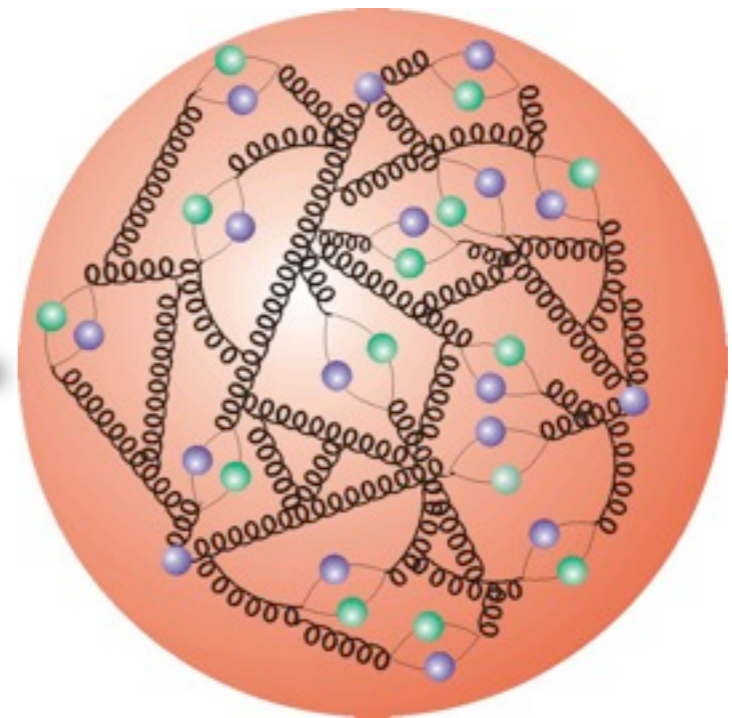
# Sterke wisselwerking (2)

- Opbouw van hadronen uit quarks (en/of antiquarks): te begrijpen uit een nieuwe vrijheidsgraad (en interactie), **kleur**
- interactie tussen quarks dmv uitwisselen gluonen  $q \rightarrow \begin{pmatrix} q_r \\ q_g \\ q_b \end{pmatrix}$

- quark **verandert van kleur** in dit proces!



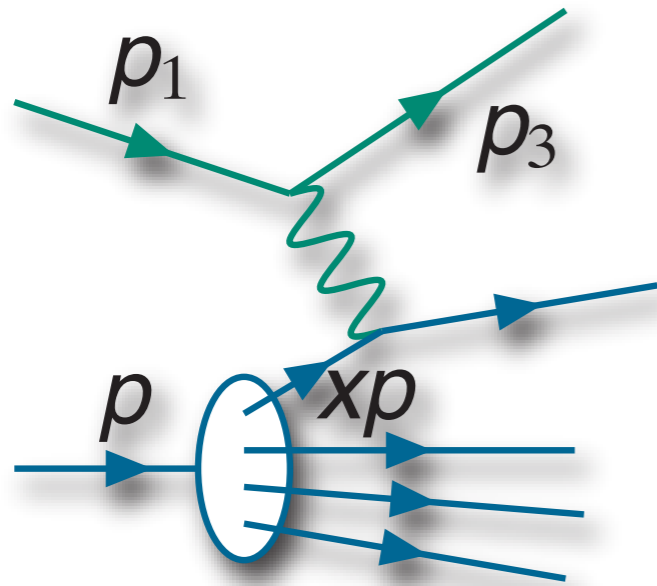
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$$



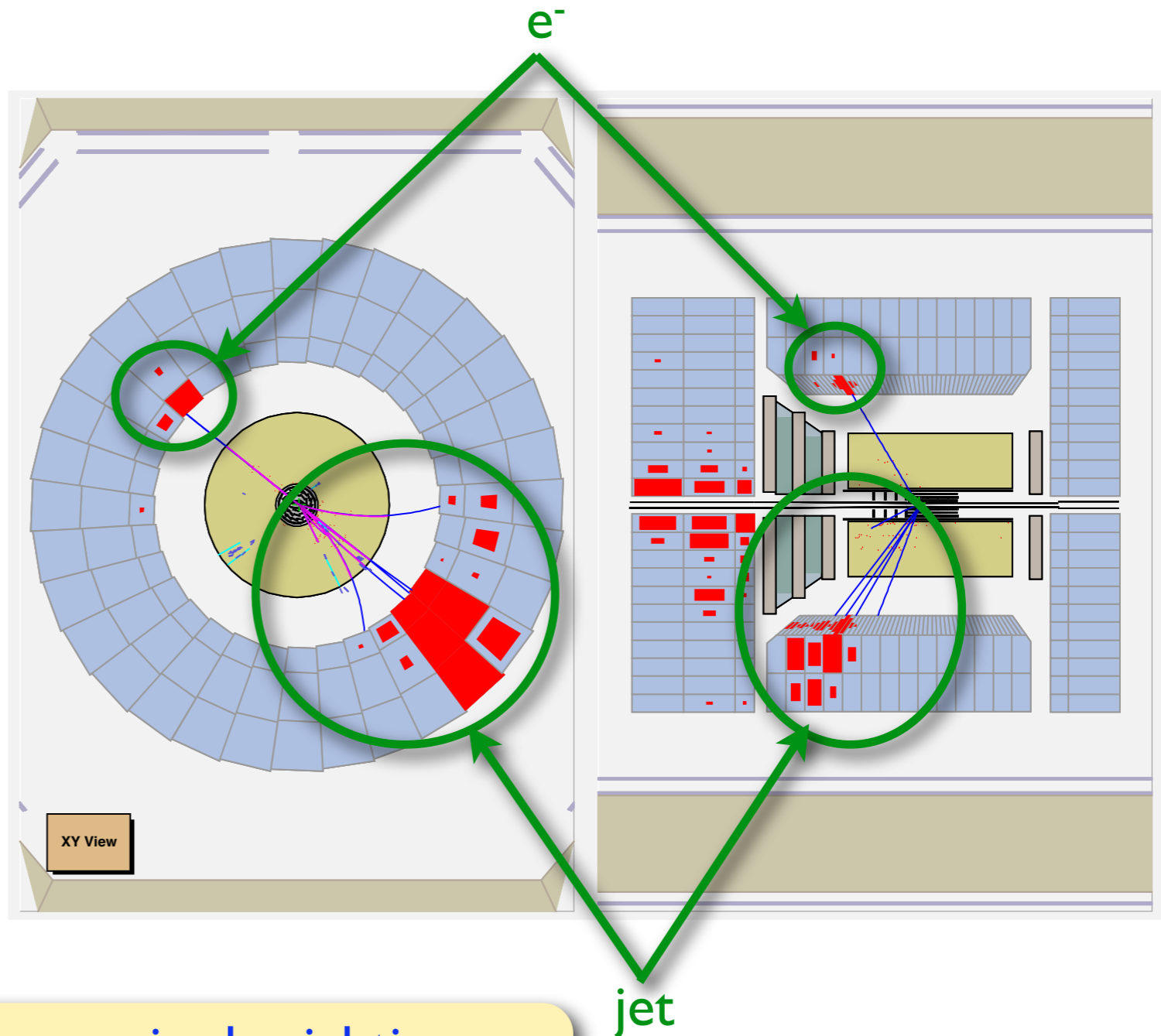
Quarks opgesloten bij lage energie

# QCD bij hoge energie

- Quarks en gluons manifesteren zichzelf als “vrije” deeltjes → jets



electron-proton verstrooiing:  
27.5 GeV + 920 GeV

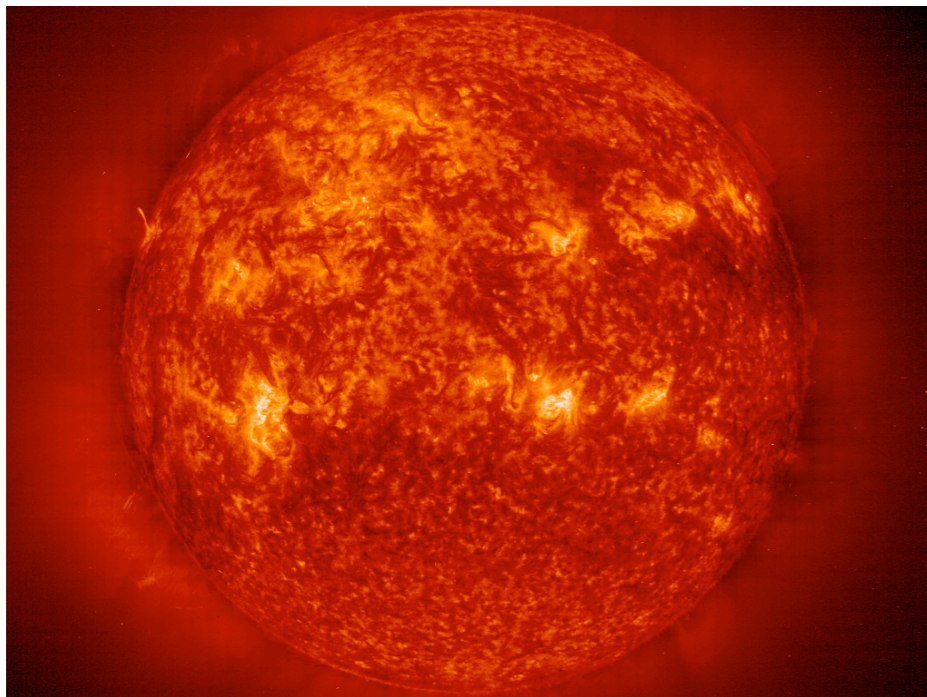


jet: vele hadronen in de richting van  
het oorspronkelijke quark/gluon)

# De zwakke wisselwerking

- Elke dag “zichtbaar”! Verantwoordelijk voor alle transmutaties
- Nieuwe deeltjes zichtbaar in kosmische straling

fusie



radioactiviteit ( $\beta$ -verval)



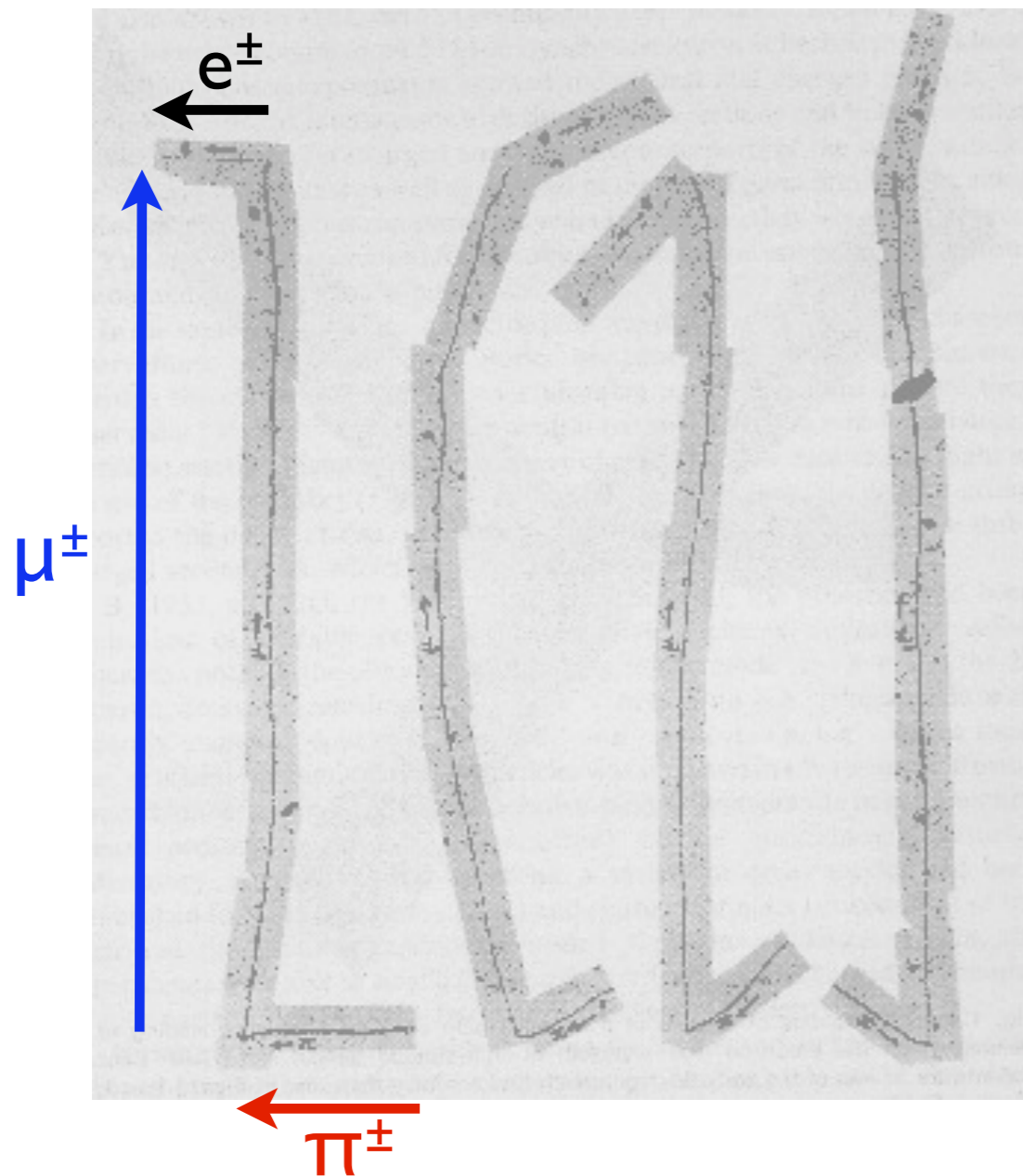
# De zwakke wisselwerking

- Elke dag “zichtbaar”! Verantwoordelijk voor alle transmutaties
- Nieuwe deeltjes zichtbaar in kosmische straling



# De zwakke wisselwerking

- Elke dag “zichtbaar”! Verantwoordelijk voor alle transmutaties
- Nieuwe deeltjes zichtbaar in kosmische straling

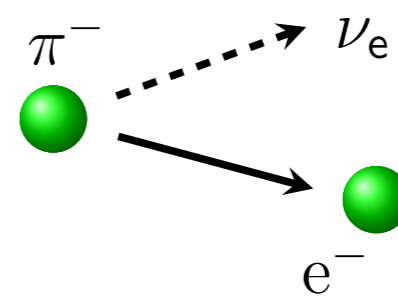
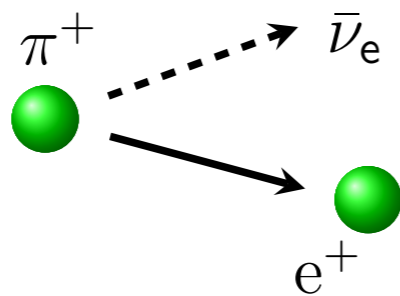
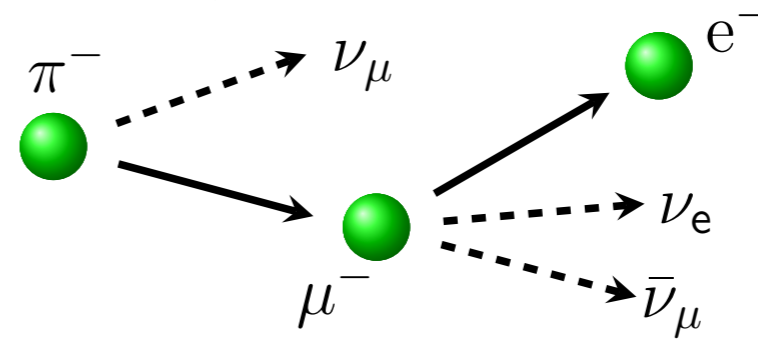
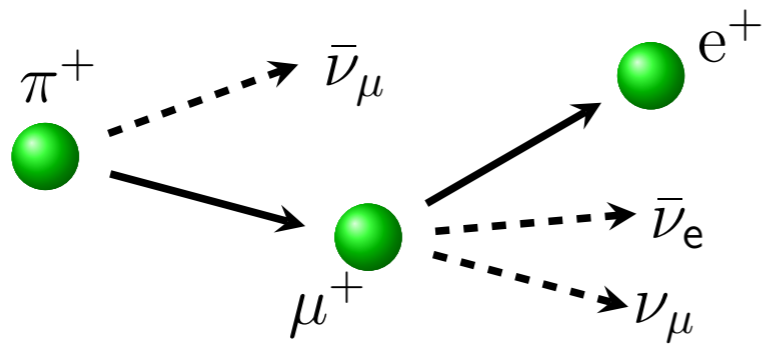


emulsie (fotografische plaat):  
energieverlies van geladen deeltjes  
▬▶ stop, verval



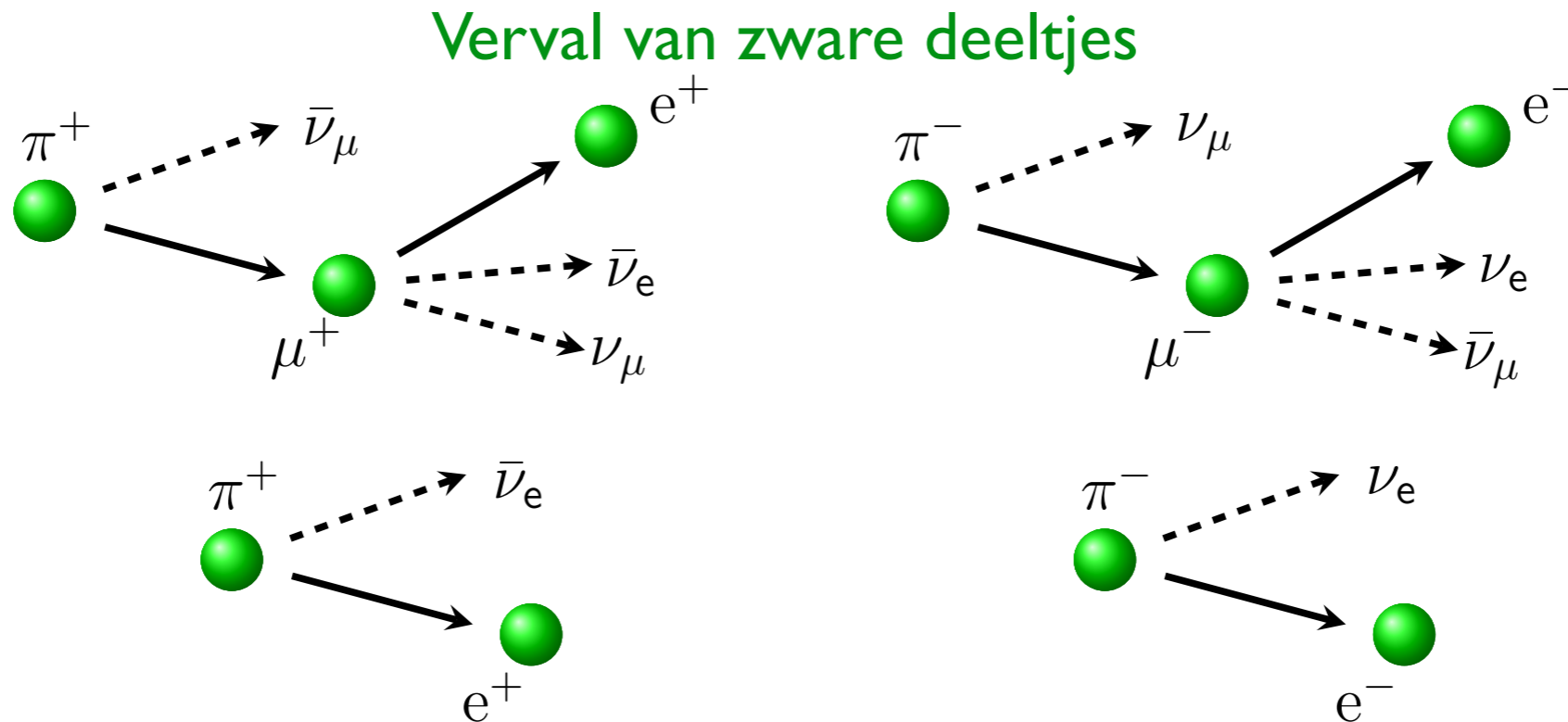
# De zwakke wisselwerking (2)

Verval van zware deeltjes





# De zwakke wisselwerking (2)



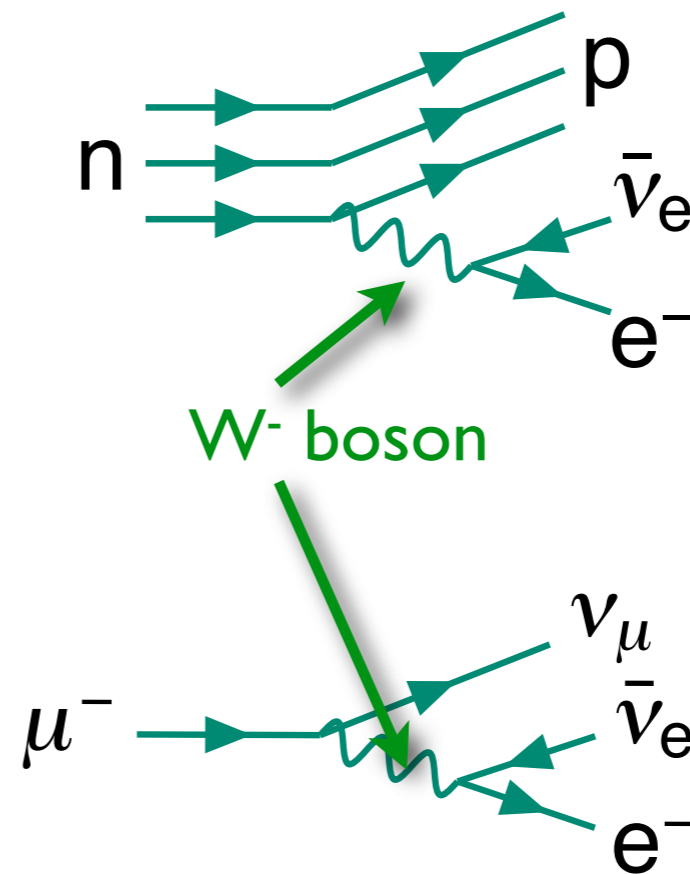
- De zwakke wisselwerking is écht zwak!
  - **v-flux** van de zon op aarde:  $\sim 6 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
  - in een mensenleven zullen **ten hoogste enkele v** met je lichaam interageren!

# Waarom zo zwak?

- Uitwisselen van **zware** deeltjes!

neutron-verval  
( $\tau_n \approx 15$  minuten)

muon-verval  
( $\tau_\mu \approx 2.2 \mu\text{s}$ )



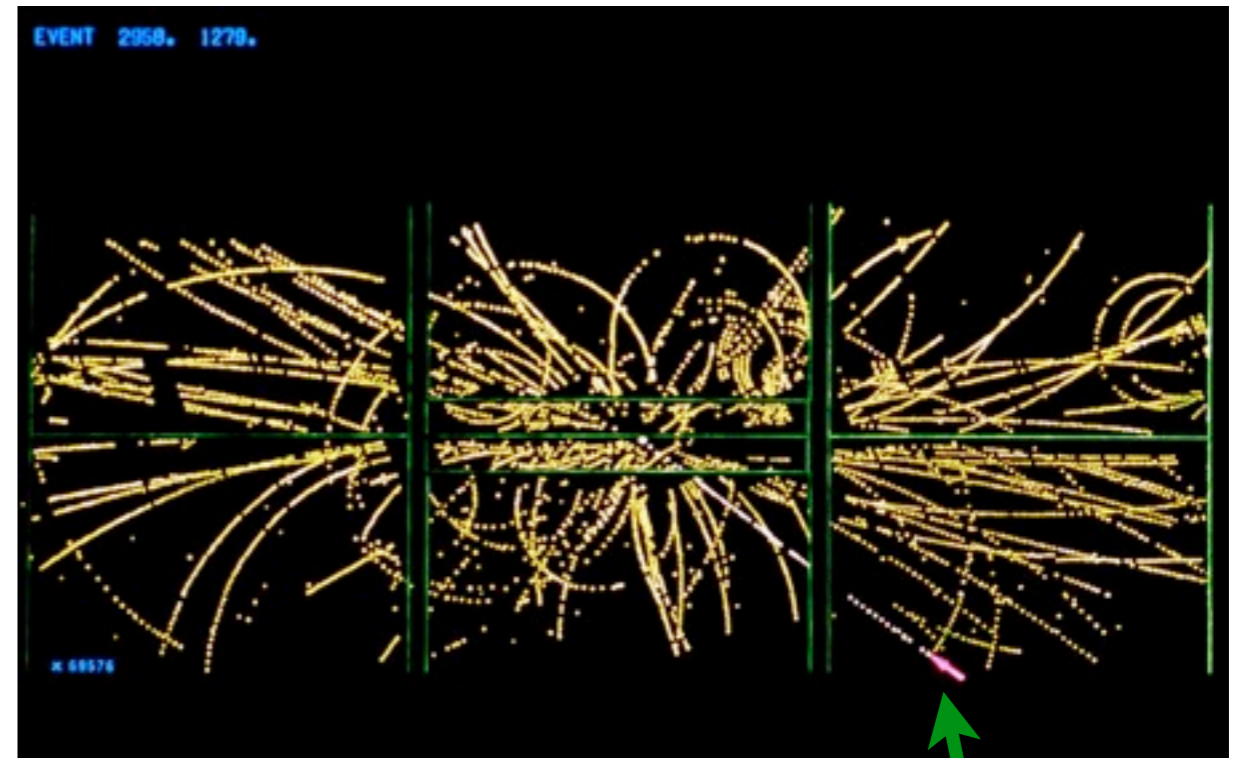
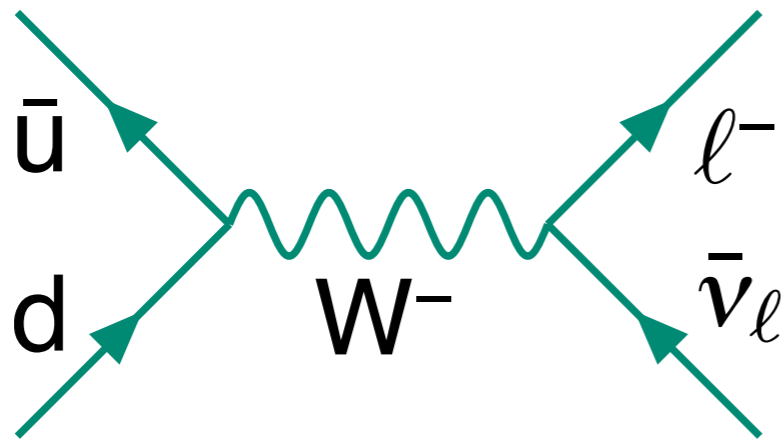
Botsingen tussen protonen worden gedomineerd door de sterke wisselwerking  $\Rightarrow$  zoek naar **leptonen** (alleen EM en zwakke wisselwerking)



# Waarom zo zwak?

- Uitwisselen van **zware** deeltjes!

W-boson productie  
(en verval)



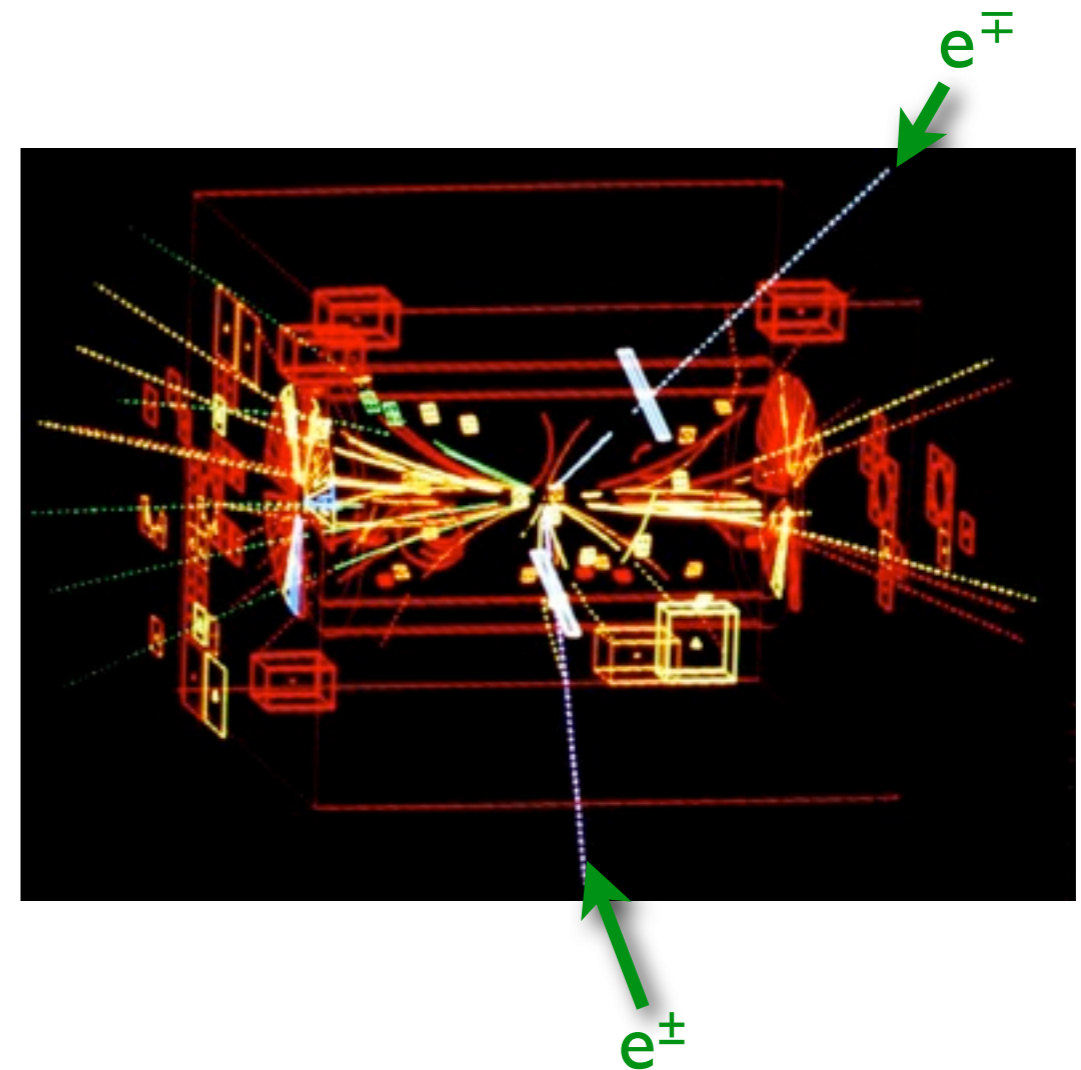
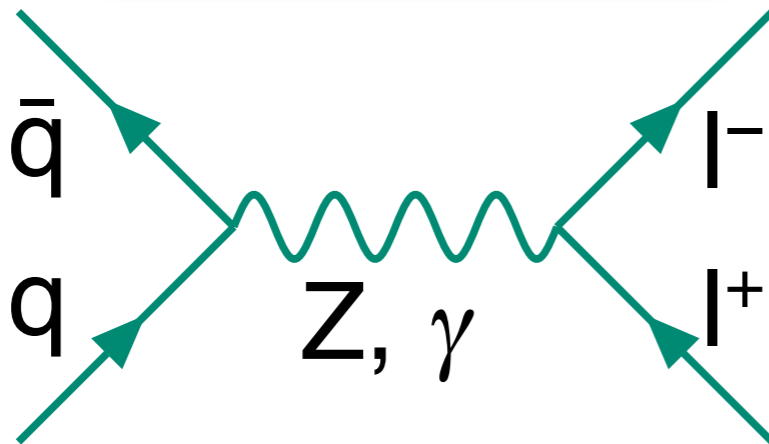
$e^\pm$

Botsingen tussen protonen worden gedomineerd door de sterke wisselwerking  $\Rightarrow$  zoek naar **leptonen** (alleen EM en zwakke wisselwerking)

# Waarom zo zwak?

- Uitwisselen van **zware** deeltjes!

Z-boson productie en verval



- W- en Z-bosonen zijn zwaar!
  - $M_W = 80.398(25) \text{ GeV}$  ( $\sim \text{Sr, Kr}$ )
  - $M_Z = 92.188(2) \text{ GeV}$  ( $\sim \text{Ru}$ )
- Ontdekt in  $p\text{-}\bar{p}$  botsingen,  $E_{\text{CM}} = 630 \text{ GeV}$

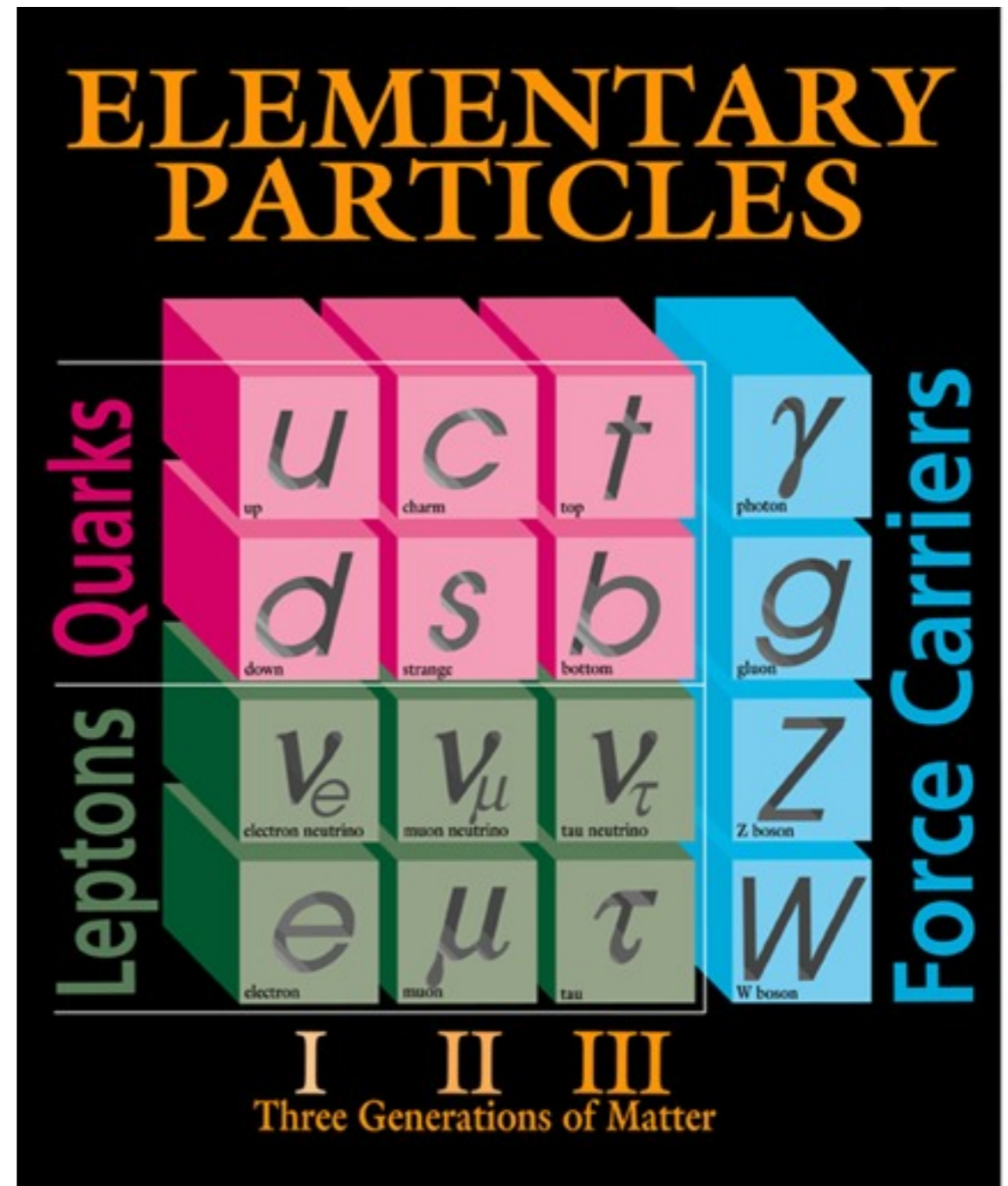
Botsingen tussen protonen worden gedomineerd door de sterke wisselwerking  $\Rightarrow$  zoek naar **leptonen** (alleen EM en zwakke wisselwerking)

# Deeltjes in het Standaardmodel

- Drie fermion-“generaties”
- doublet-structuur
 
$$\psi_e = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$
- oplopende massa's
  - alleen 1<sup>e</sup> generatie algemeen aanwezig in materie
  - 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> generatie: geproduceerd in botsingen
- W-boson koppelt **geladen leptonen** aan  **$\nu$**  (en **up-** aan **down-**type quarks)

Enorme verschillen in massa!

- $m_\nu < 1 \text{ eV}$
- $m_t \approx 170 \text{ GeV}$



Fermilab 95-759

# Deel III: Uitdagingen voor de deeltjesfysica

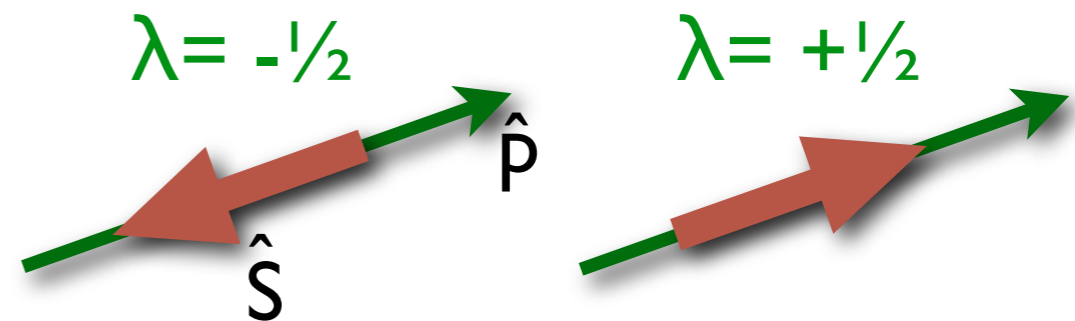
# Een gewichtig probleem

- QED, QCD: fotonen & gluonen zijn strikt massaloos
- Zwakke wisselwerking:
  - massieve W- en Z-bosonen
  - fermion-massa's:  $m_\ell \neq m_{\nu_\ell}$  (idem voor quarks)

# Een gewichtig probleem

- QED, QCD: fotonen & gluonen zijn strikt massaloos
- Zwakke wisselwerking:
  - massieve W- en Z-bosonen
  - fermion-massa's:  $m_\ell \neq m_{\nu_\ell}$  (idem voor quarks)
- En meer!

- het W-boson koppelt alleen aan **linkshandige fermionen** (rechtshandige anti-fermionen)

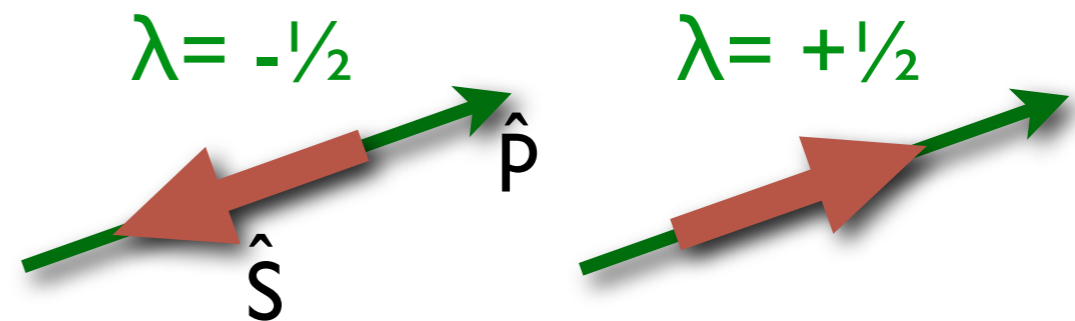


- links- en rechtshandige fermionen zijn eigenlijk **verschillende deeltjes**
- dit kan alleen als ze **strikt massaloos** zijn

# Een gewichtig probleem

- QED, QCD: fotonen & gluonen zijn strikt massaloos
- Zwakke wisselwerking:
  - massieve W- en Z-bosonen
  - fermion-massa's:  $m_\ell \neq m_{\nu_\ell}$  (idem voor quarks)
- En meer!

- het W-boson koppelt alleen aan **linkshandige fermionen** (rechtshandige anti-fermionen)



- links- en rechtshandige fermionen zijn eigenlijk **verschillende deeltjes**
- dit kan alleen als ze **strikt massaloos** zijn

**Oplossing:** spontane symmetriebreking + Higgsmechanisme

⇒ massa's voor alle fermionen + W- en Z-bosonen

# Het Higgsmechanisme

- Deeltjes krijgen “effectief” massa door interactie met het Higgsveld



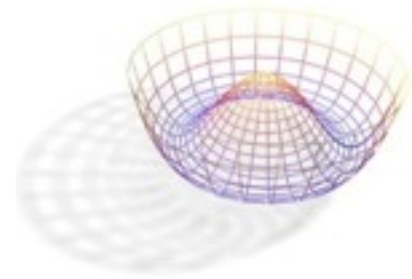


# Het Higgsmechanisme

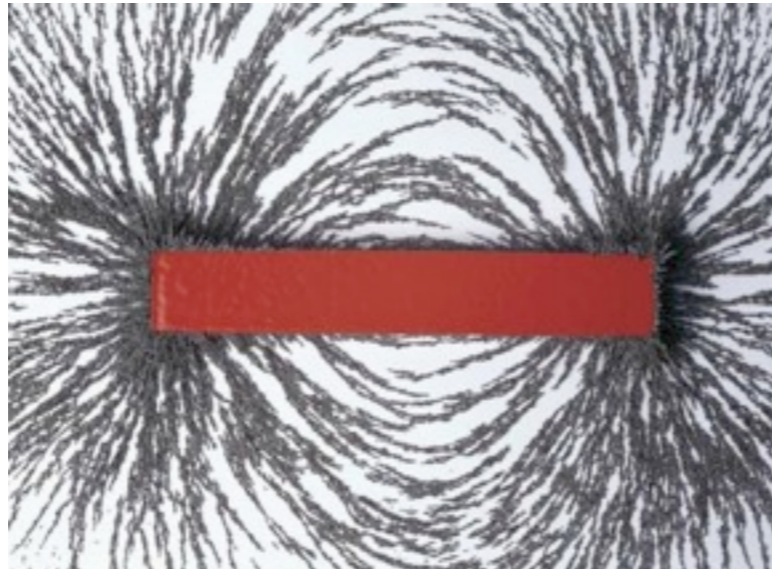
- Deeltjes krijgen “effectief” massa door interactie met het Higgsveld



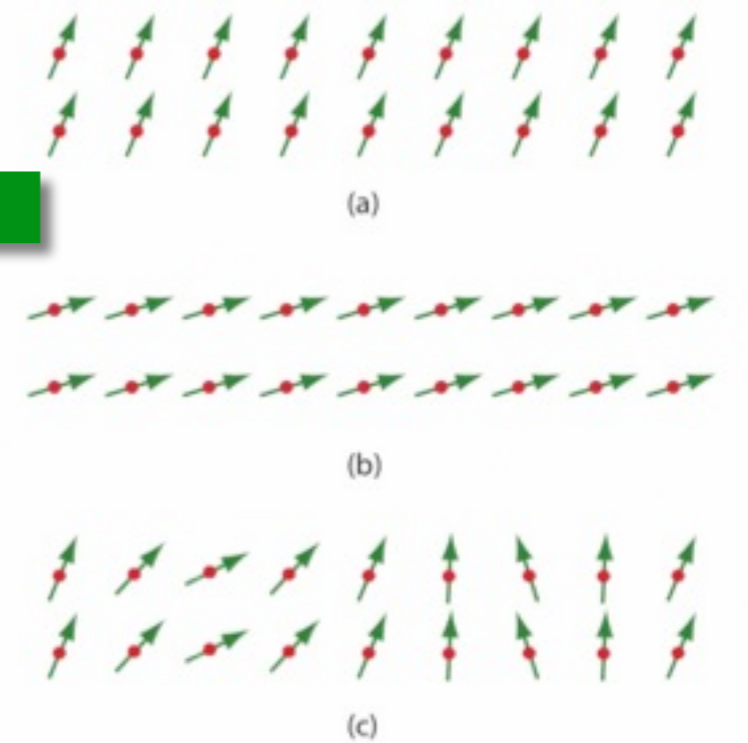
# Magnetische Analogieën



- Spontane symmetriebreking

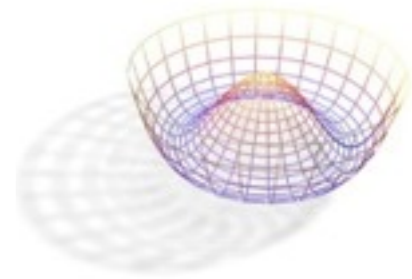


equivalente  
grondtoestanden

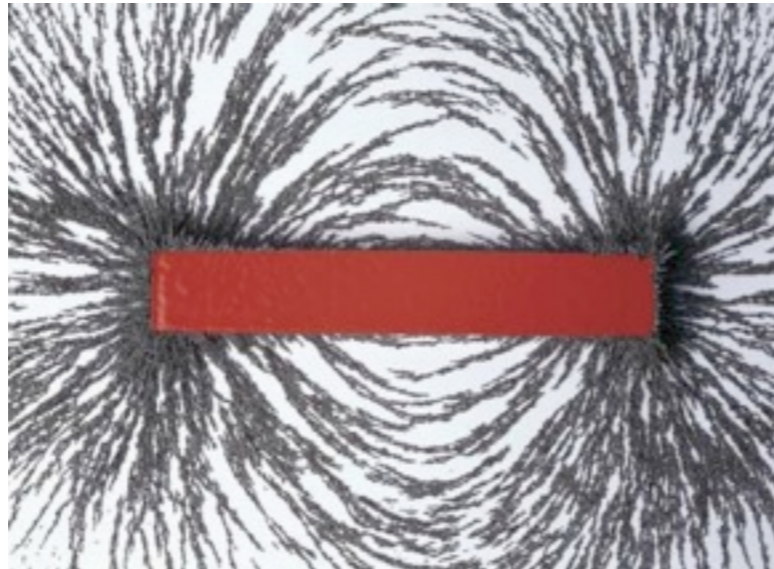


excitatie

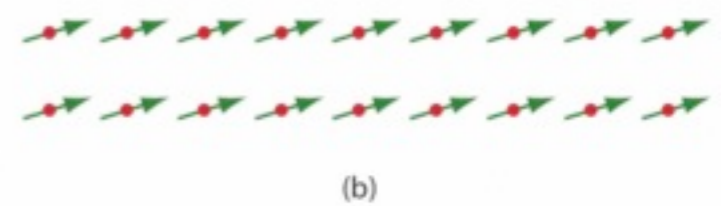
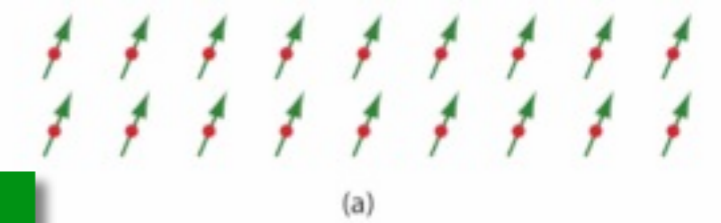
# Magnetische Analogieën



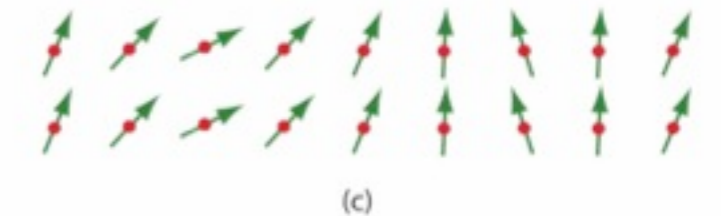
- Spontane symmetriebreking



equivalente  
grondtoestanden



excitatie



- Massieve fotonen



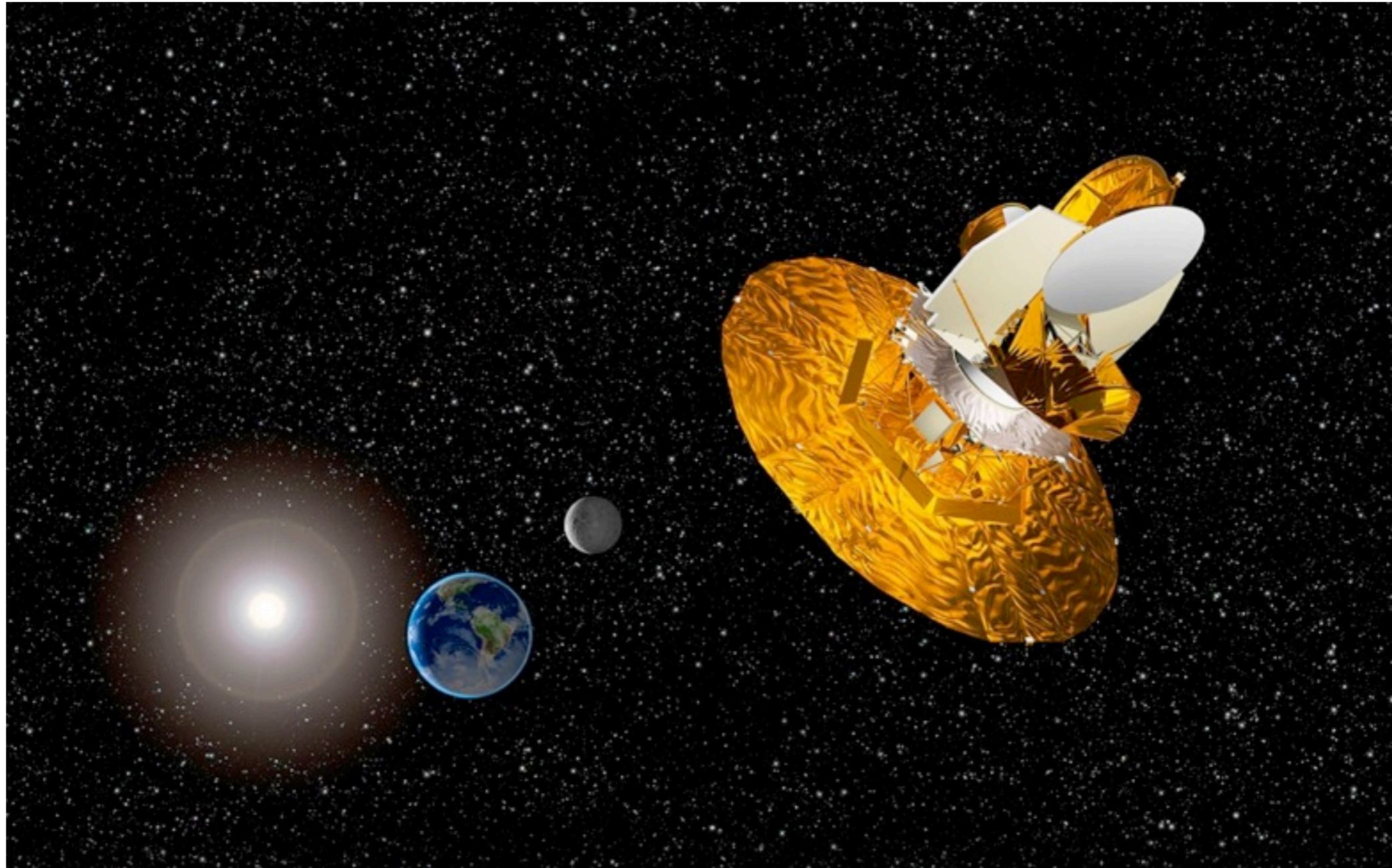
**Meißner-effect: supergeleider  
stoot magnetische veldlijnen af**

- massieve fotonen
- maar dit heeft een medium nodig (e<sup>-</sup>-paar condensaat)!

**In de deeltjesfysica is het  
“medium” het vacuum!**

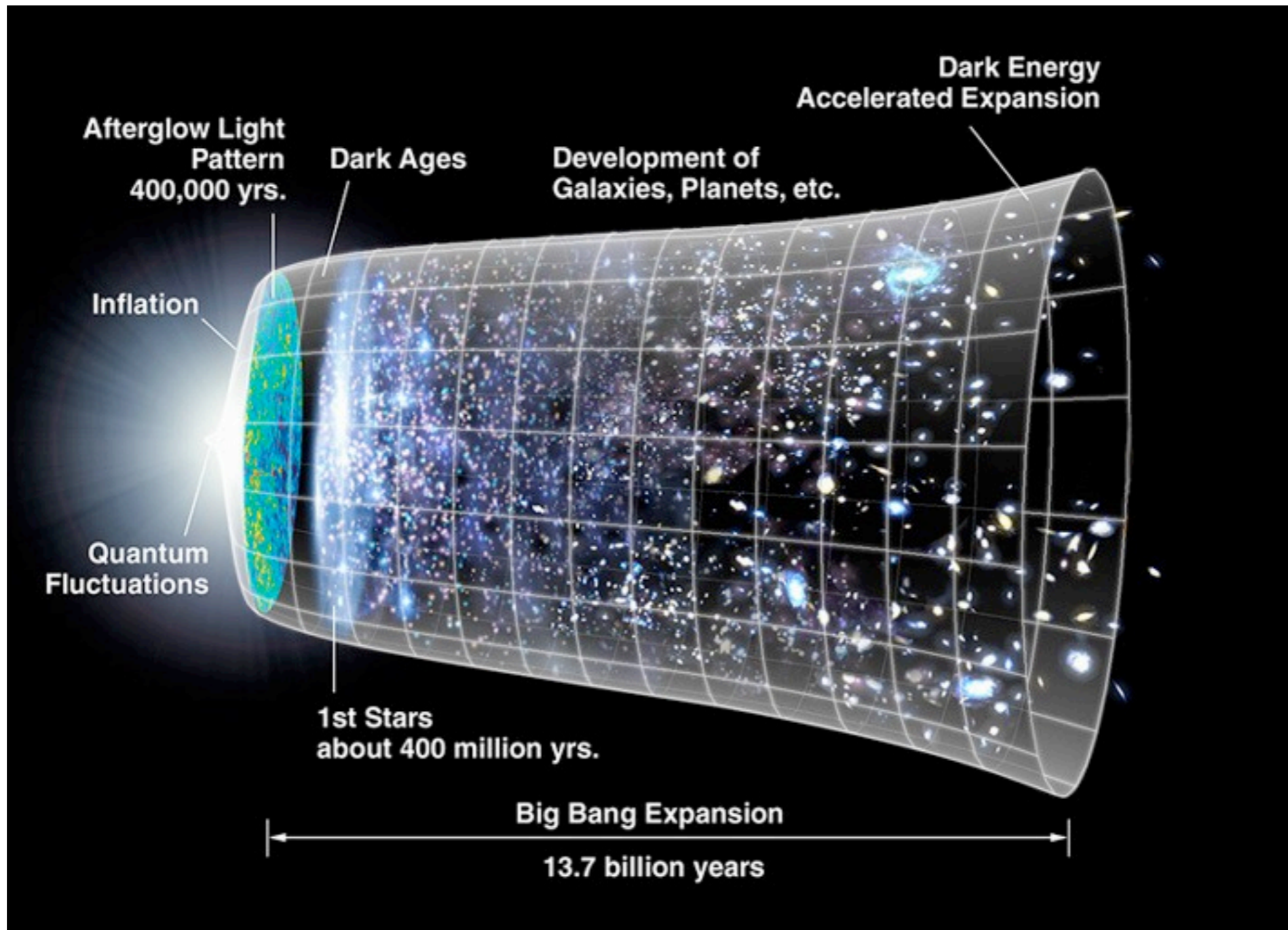
# Kosmologie: het heelal

- Op grote schaal is het heelal **isotroop** en **homogeen**!



# Kosmologie: het heelal

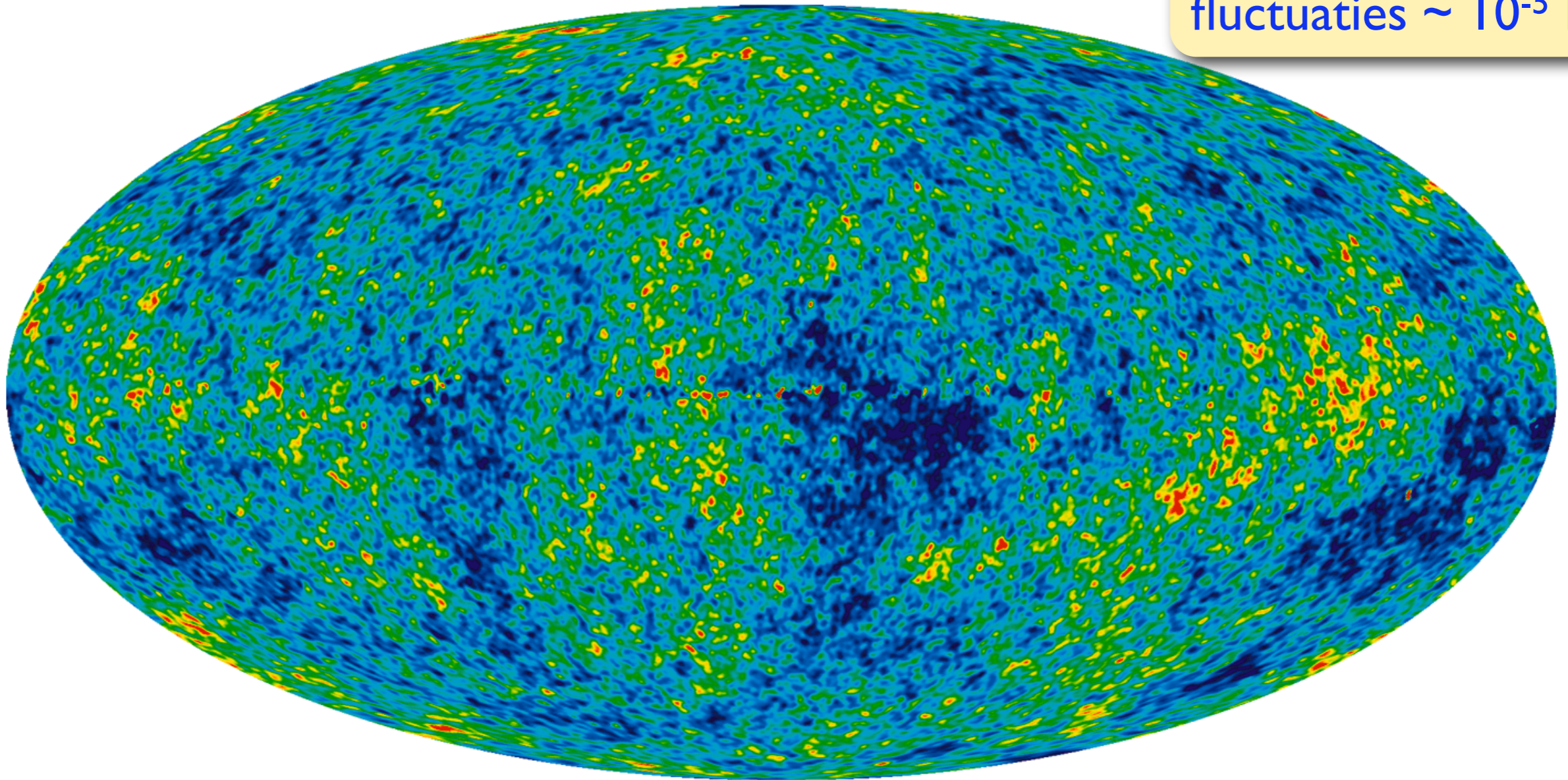
- Op grote schaal is het heelal **isotroop** en **homogeen**!



# Kosmologie: het heelal

- Op grote schaal is het heelal **isotroop** en **homogeen**!

CMWB: temperatuur-  
fluctuaties  $\sim 10^{-5}$  K



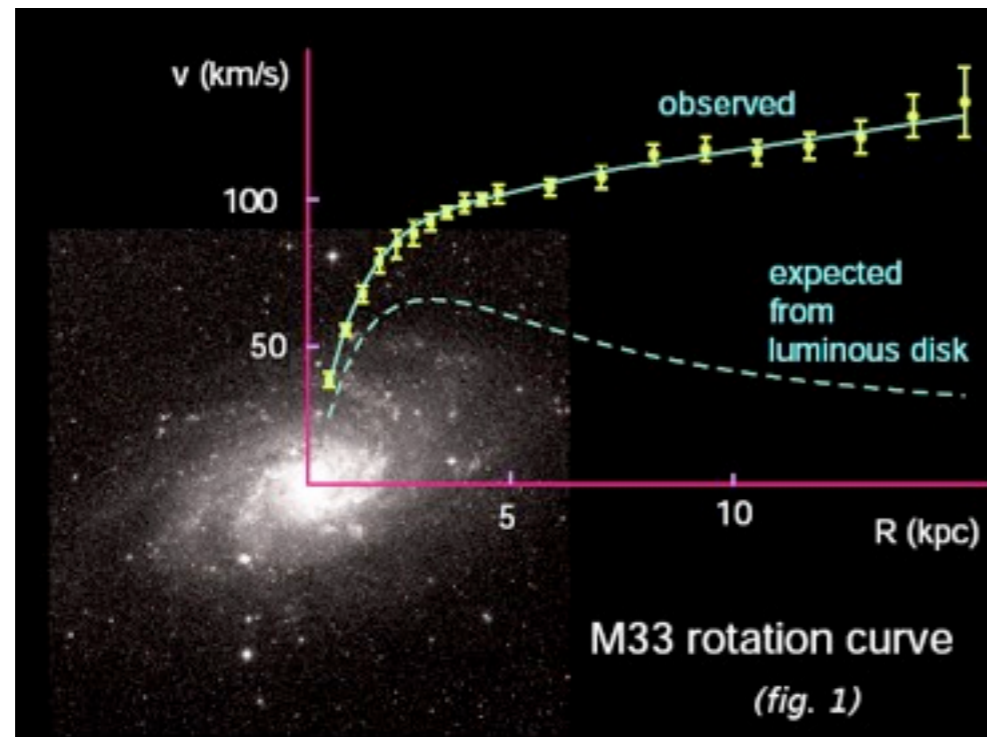
WMAP resultaten (7 jaar observaties)

# Donkere materie en energie

- We begrijpen **ten hoogste 4%** van het heelal!
- **donkere materie**: zware deeltjes, niet voorspeld door het Standaardmodel
- zonder **EM, zwakke of sterke wisselwerking**

# Donkere materie en energie

- We begrijpen **ten hoogste 4%** van het heelal!

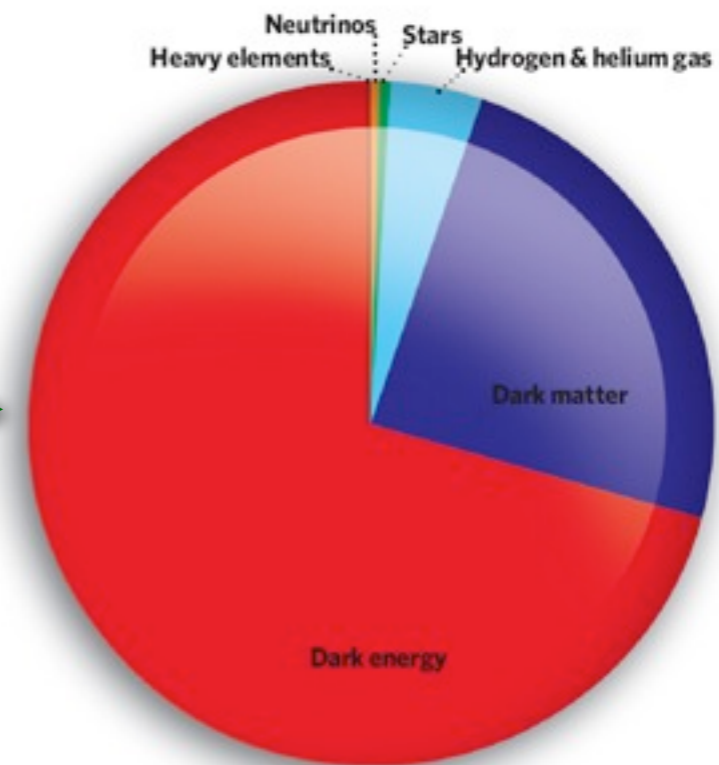
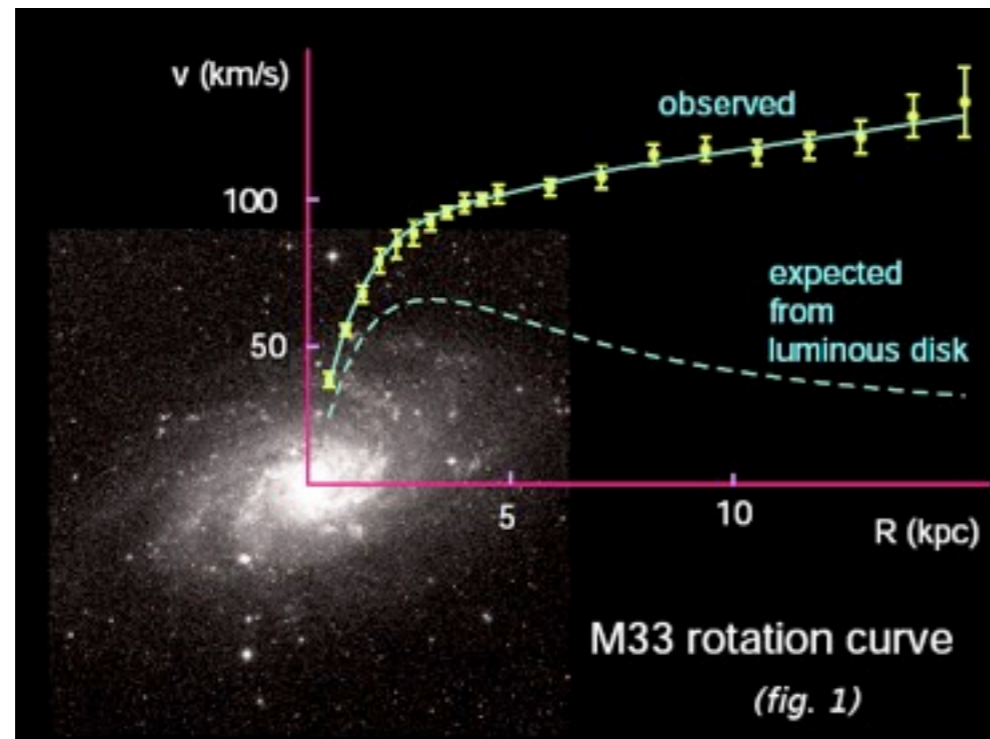


- **donkere materie:** zware deeltjes, niet voorspeld door het Standaardmodel
- zonder **EM**, **zwakke** of **sterke wisselwerking**



# Donkere materie en energie

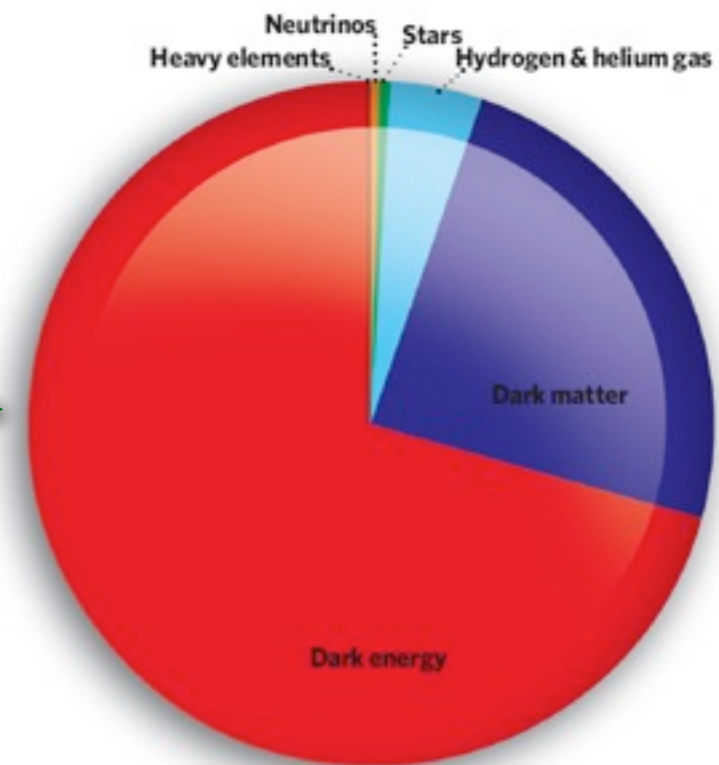
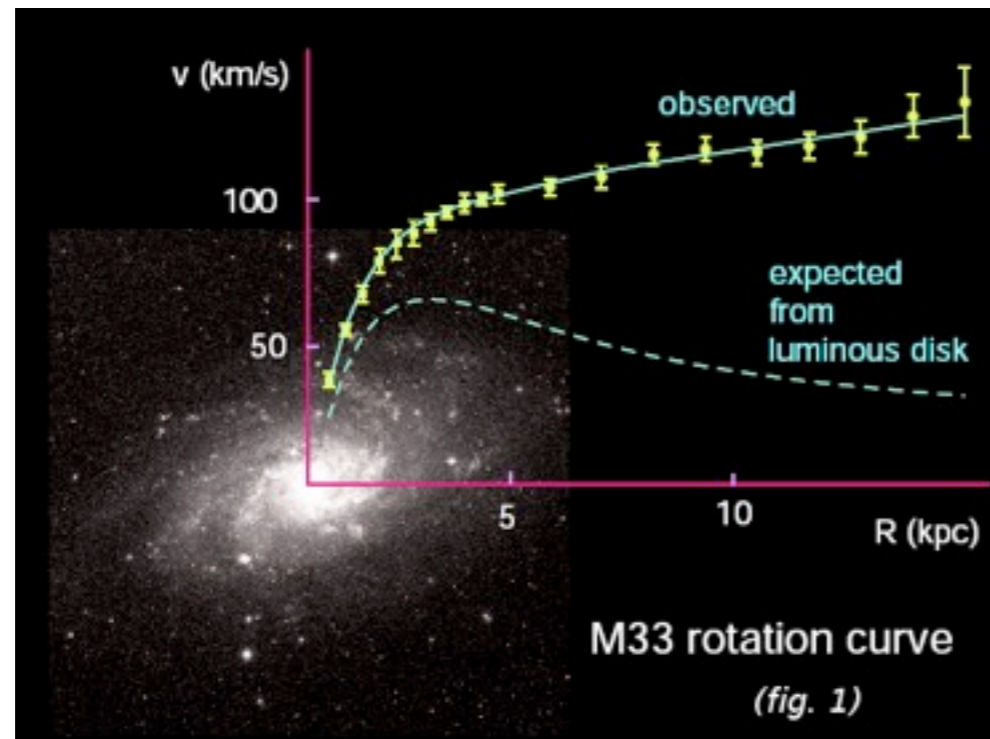
- We begrijpen **ten hoogste 4%** van het heelal!



- **donkere materie:** zware deeltjes, niet voorspeld door het Standaardmodel
- zonder **EM**, **zwakke** of **sterke wisselwerking**

# Donkere materie en energie

- We begrijpen **ten hoogste 4%** van het heelal!



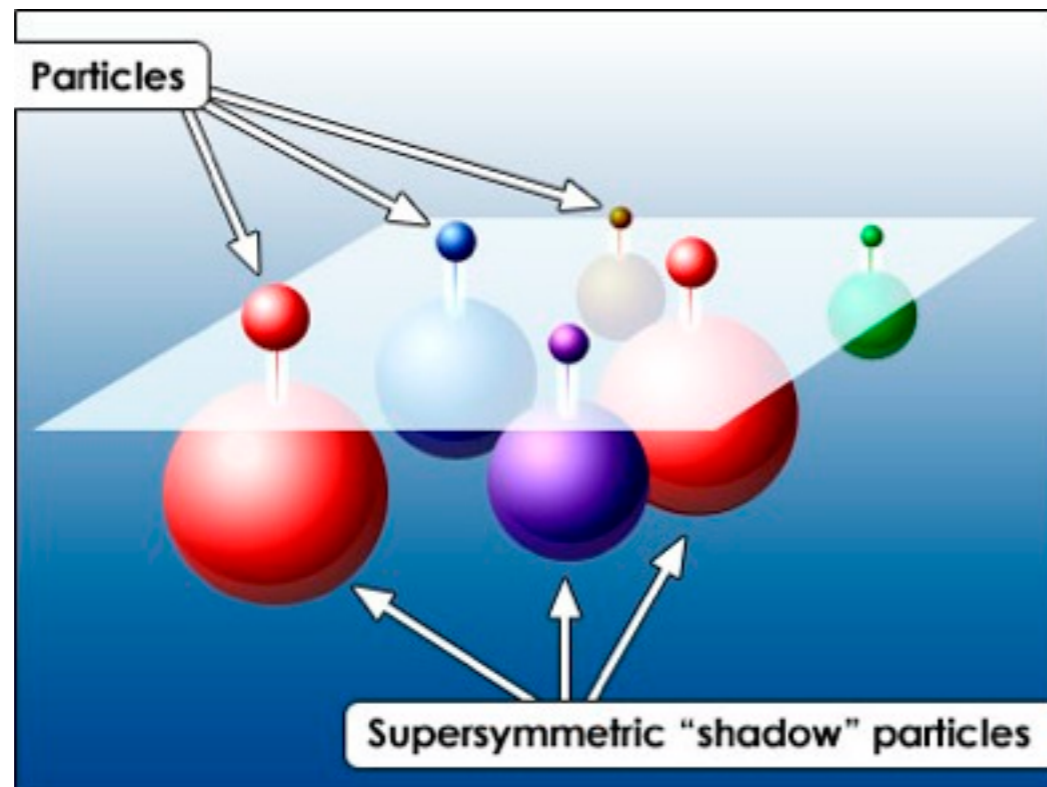
- **donkere materie:** zware deeltjes, niet voorspeld door het Standaardmodel
- zonder **EM**, **zwakke** of **sterke wisselwerking**

# Supersymmetrie?

- Een verdubbeling van het aantal elementaire deeltjes!
- voor ieder boson (fermion) in het Standaardmodel bestaat een fermion (boson) met dezelfde massa
- donkere materie: stabiel neutraal  
lichtste supersymmetrische deeltje

# Supersymmetrie?

- Een verdubbeling van het aantal elementaire deeltjes!
- voor ieder boson (fermion) in het Standaardmodel bestaat een fermion (boson) met ~~dezelfde massa~~

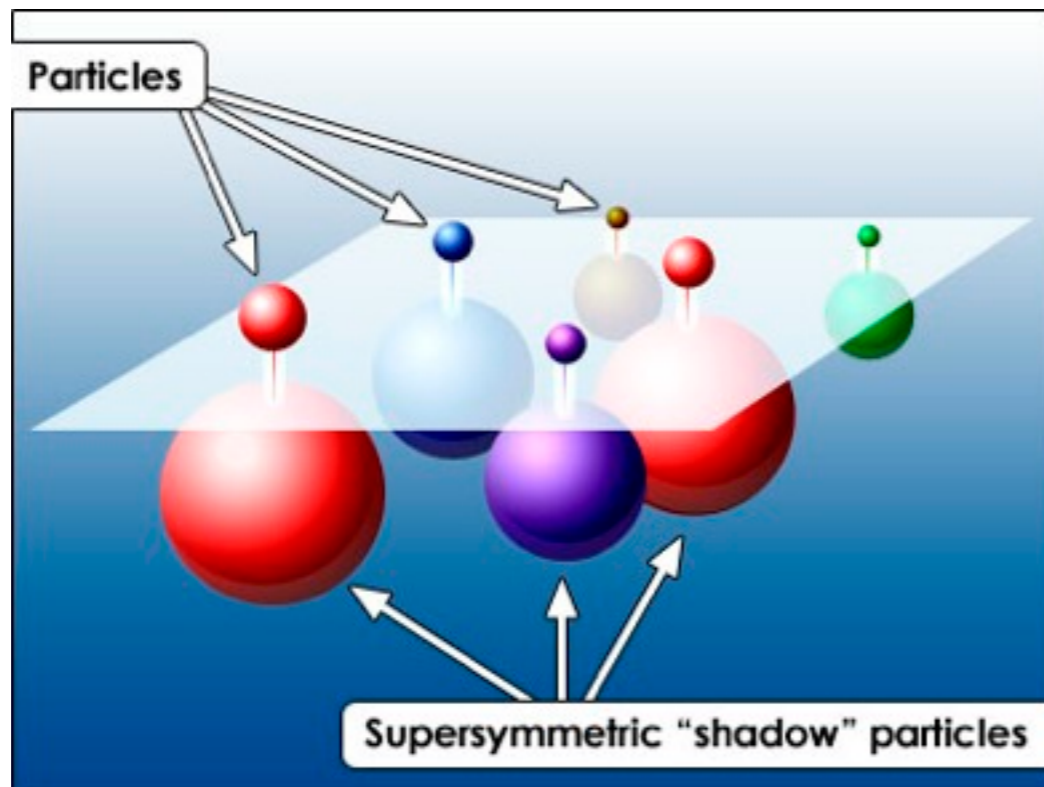


Gebroken symmetrie:  
vele realisaties

- donkere materie: stabiel neutraal  
lichtste supersymmetrische deeltje

# Supersymmetrie?

- Een verdubbeling van het aantal elementaire deeltjes!
- voor ieder boson (fermion) in het Standaardmodel bestaat een fermion (boson) met ~~dezelfde massa~~



Gebroken symmetrie:  
vele realisaties

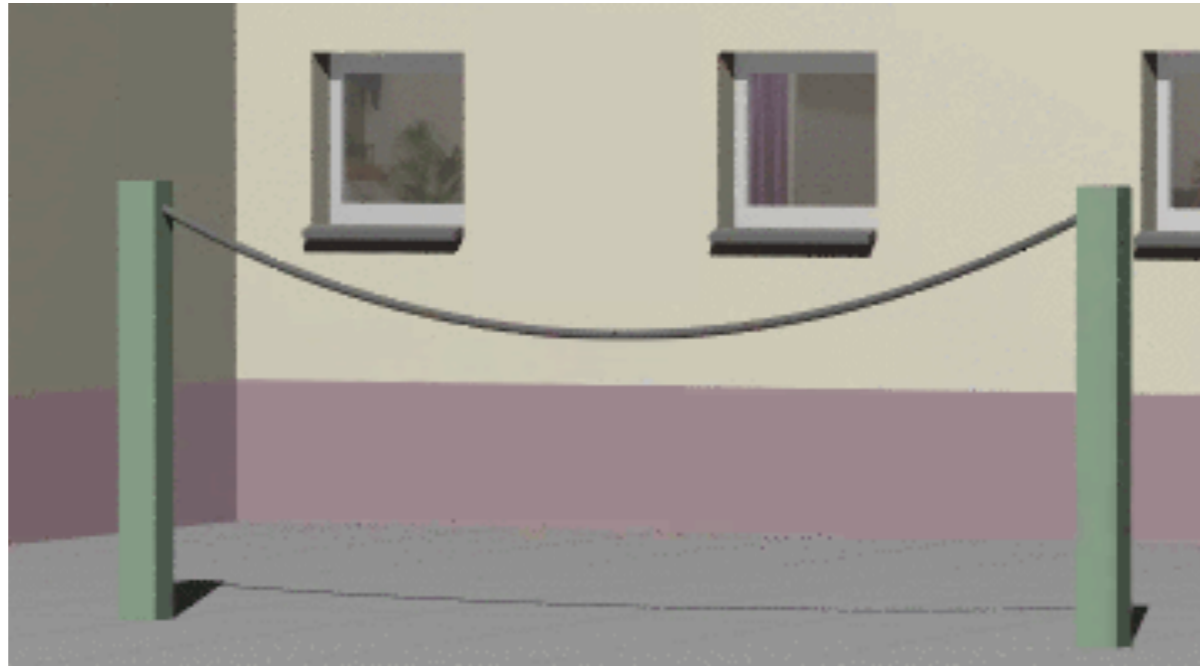
- donkere materie: stabiel neutraal  
lichtste supersymmetrische deeltje



# Extra dimensies?



# Extra dimensies?



- Supersnaren, D-branes, M-theorie... typisch: 11 dimensies!
- $10^{500}$  manieren om 7 extra dimensies op te rollen
- met verschillende fysica tot gevolg



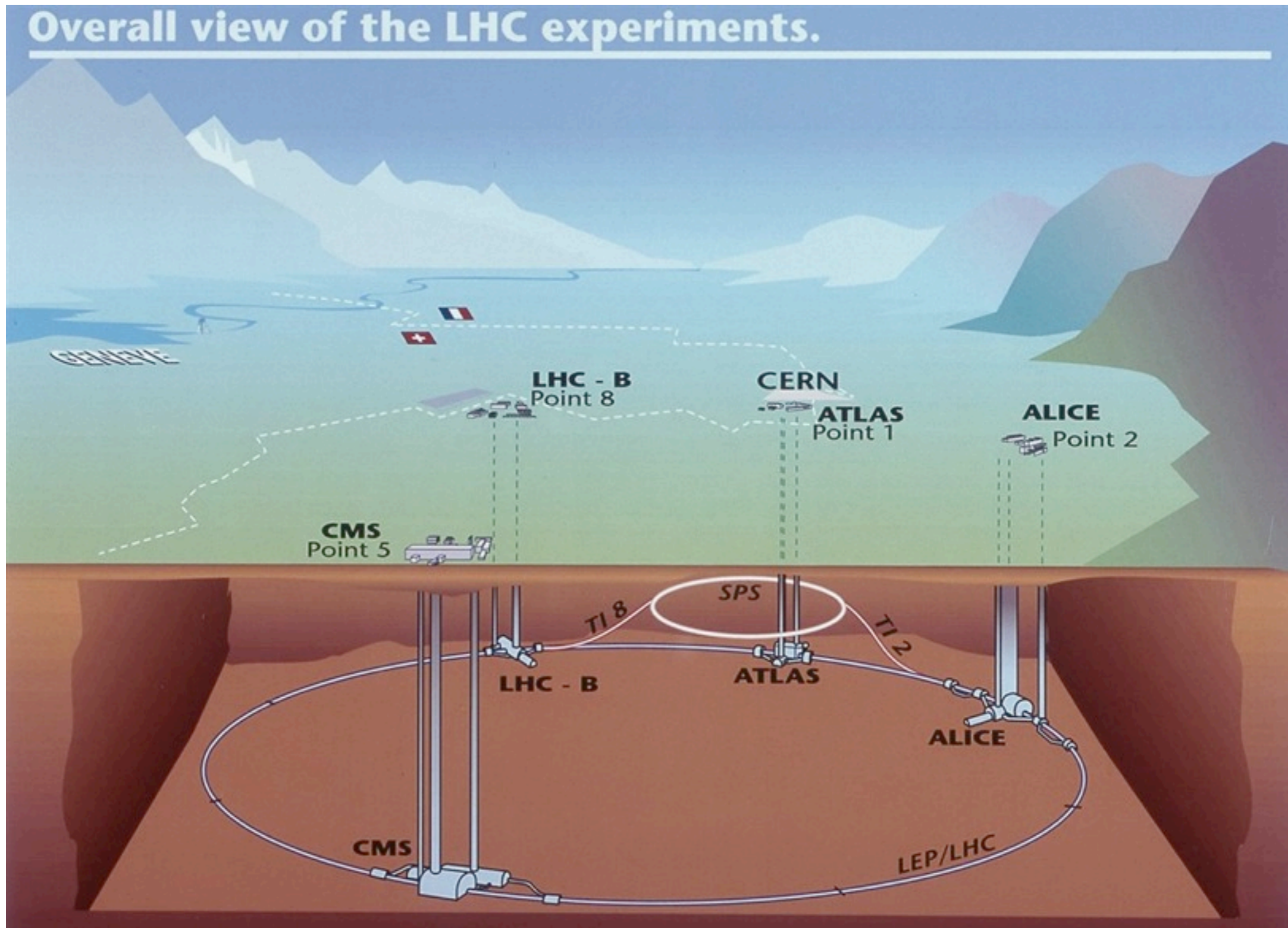
# Andere vragen

- Vindt er unificatie van wisselwerkingen plaats?
  - cf. electriciteit/magnetisme, EM/zwakke wisselwerking
- Waar is de anti-materie in het heelal gebleven?
  - bekende mechanismes niet adequaat
- Zijn neutrino's hun eigen antideeltjes?
- Waar komen hoog-energetische kosmische deeltjes vandaan?



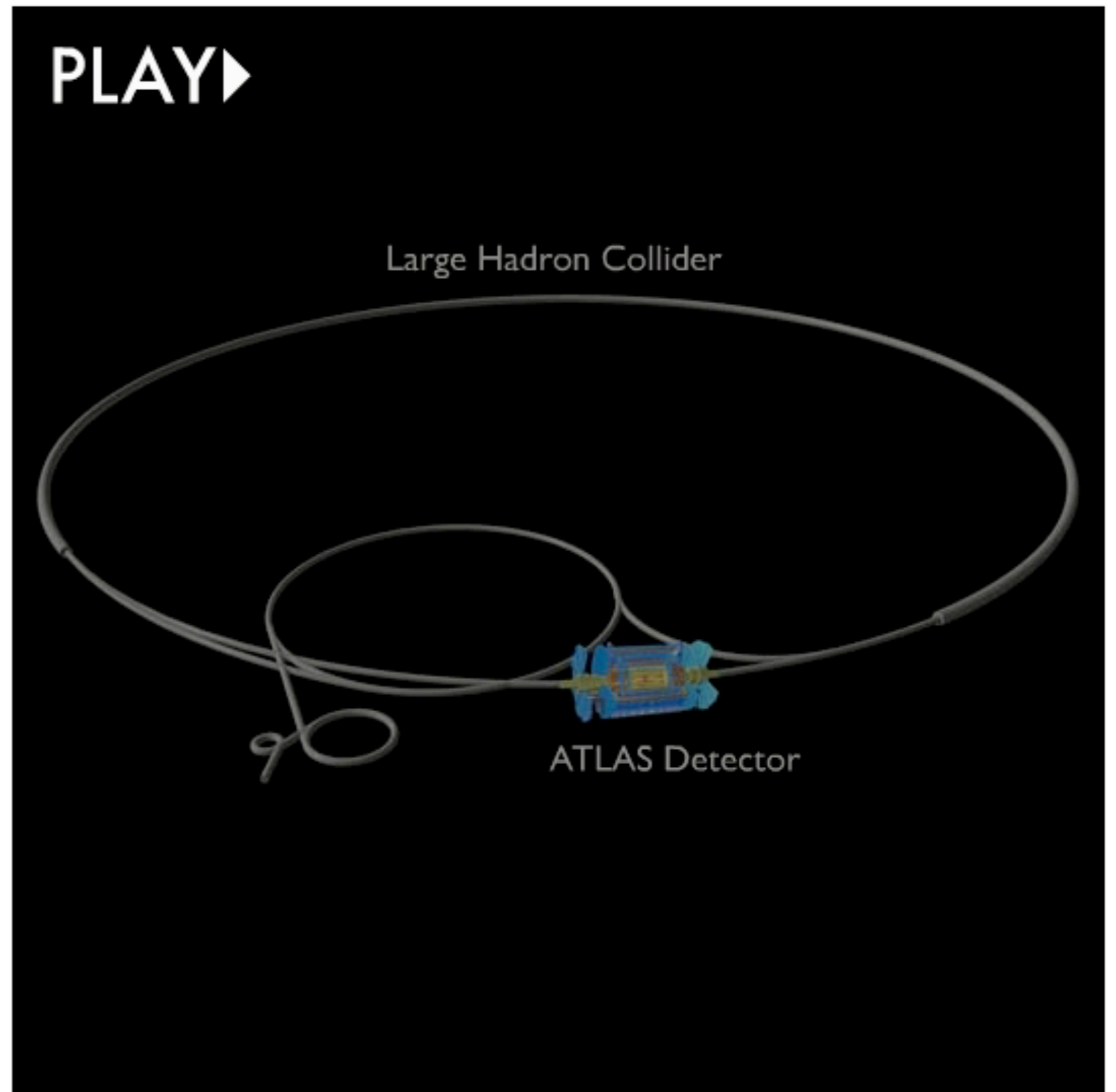
# Deel IV: De Large Hadron Collider

# De LHC: principe



# De LHC: principe

- De hoogste energie: protonen versneld tot  $E_{\text{bundel}} = 7 \text{ TeV}$  (nu:  $3.5 \text{ TeV}$ ...)
- $v = 0.999999991 c$
- De hoogste luminositeit ( $\sim$  intensiteit)
- hoeveelheid data



# De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten



- Uitdaging 2: bundelintensiteit

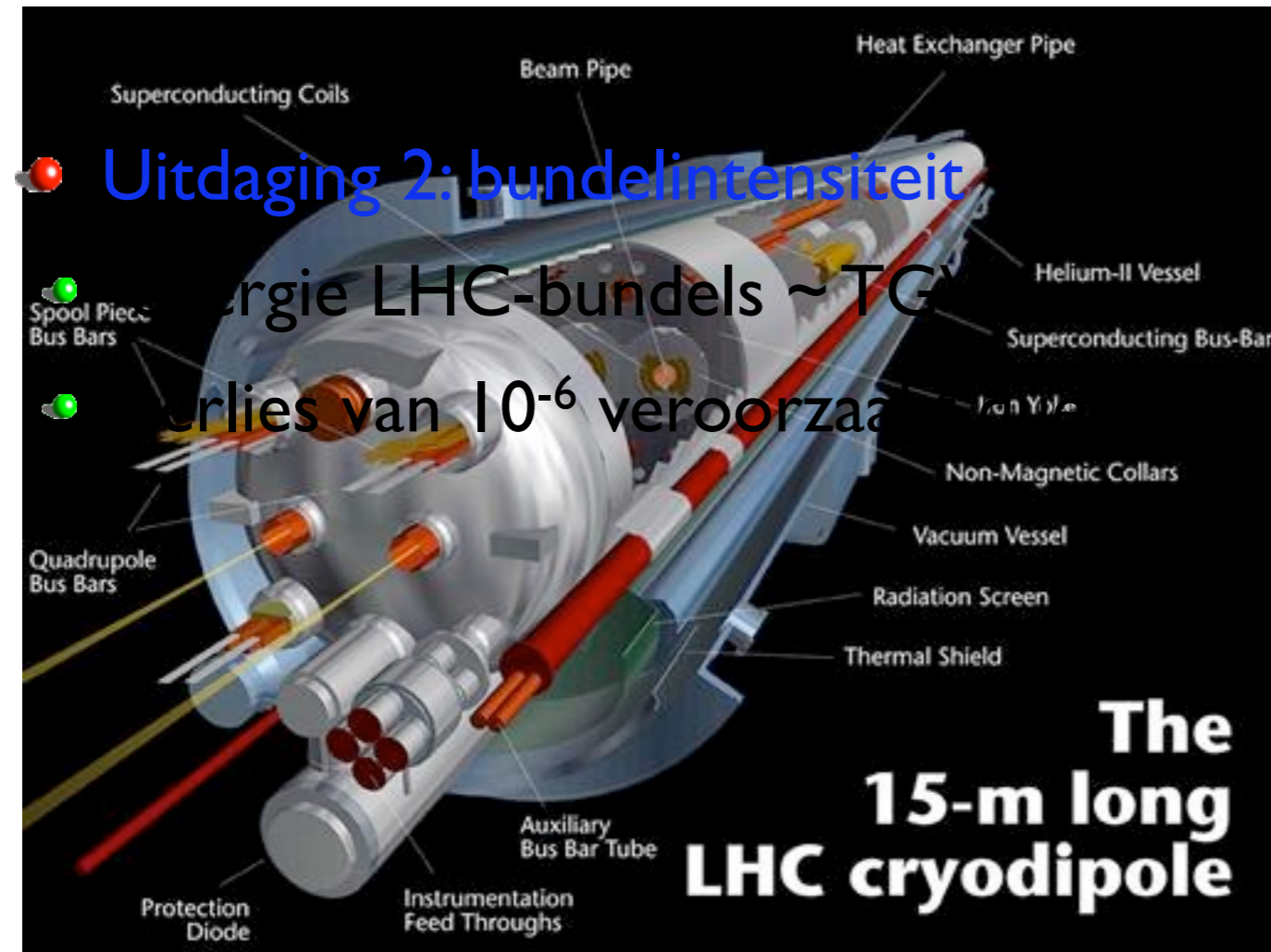
- energie LHC-bundels  $\sim$  TGV

- verlies van  $10^{-6}$  veroorzaakt quench,  $10^{-3}$  vernielt magneten (+ spares)

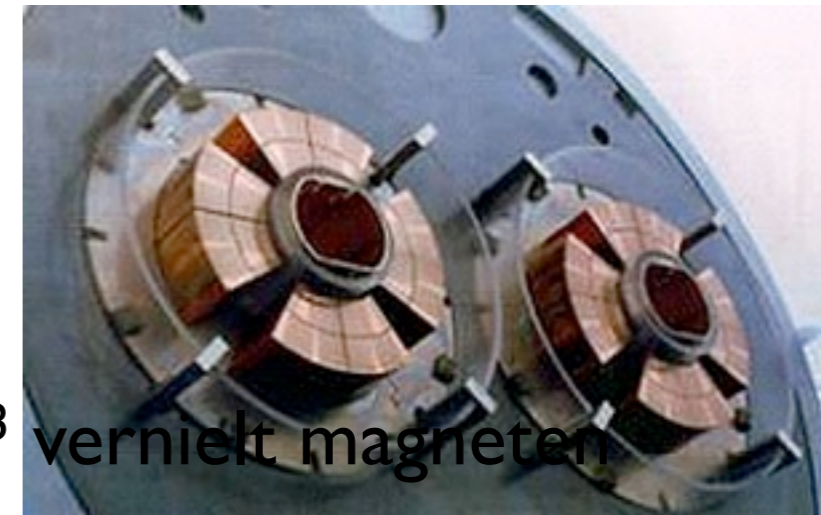
# De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten

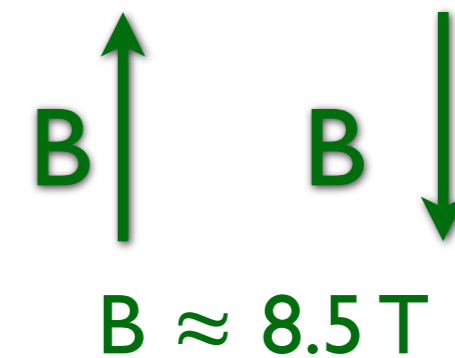
- Uitdaging 2: bundelintensiteit



Energie LHC-bundels  $\sim 7$  TeV  
Stralingsverlies van  $10^{-6}$  veroorzaakt

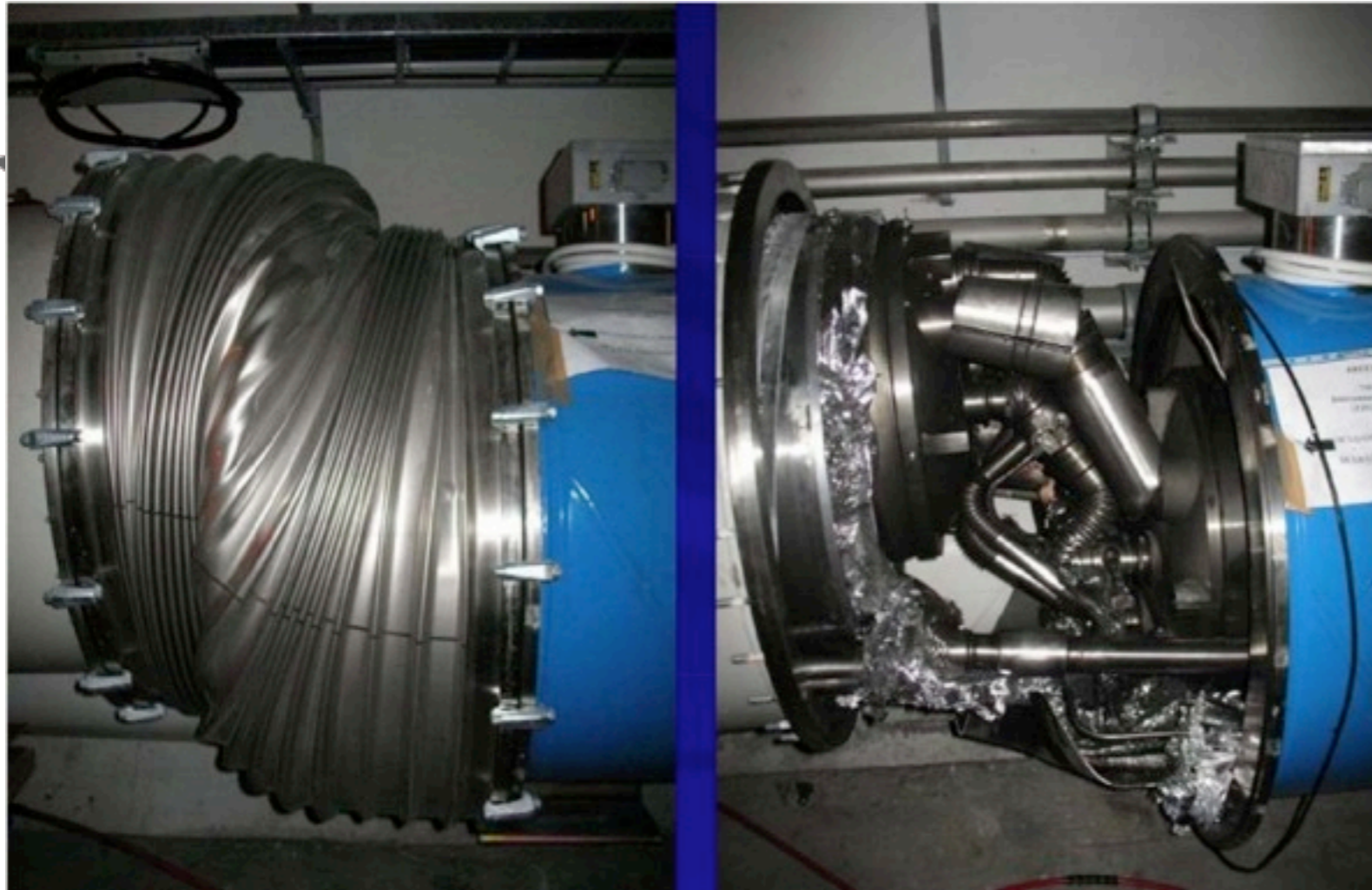


verniet magneten



# De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten



Nieuwe technologie!  
Er gaat wel eens iets  
fout...

# De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten
- Uitdaging 2: bundelintensiteit
  - energie LHC-bundels  $\sim$  TGV
  - verlies van  $10^{-6}$  veroorzaakt quench,  $10^{-3}$  vernielt magneten

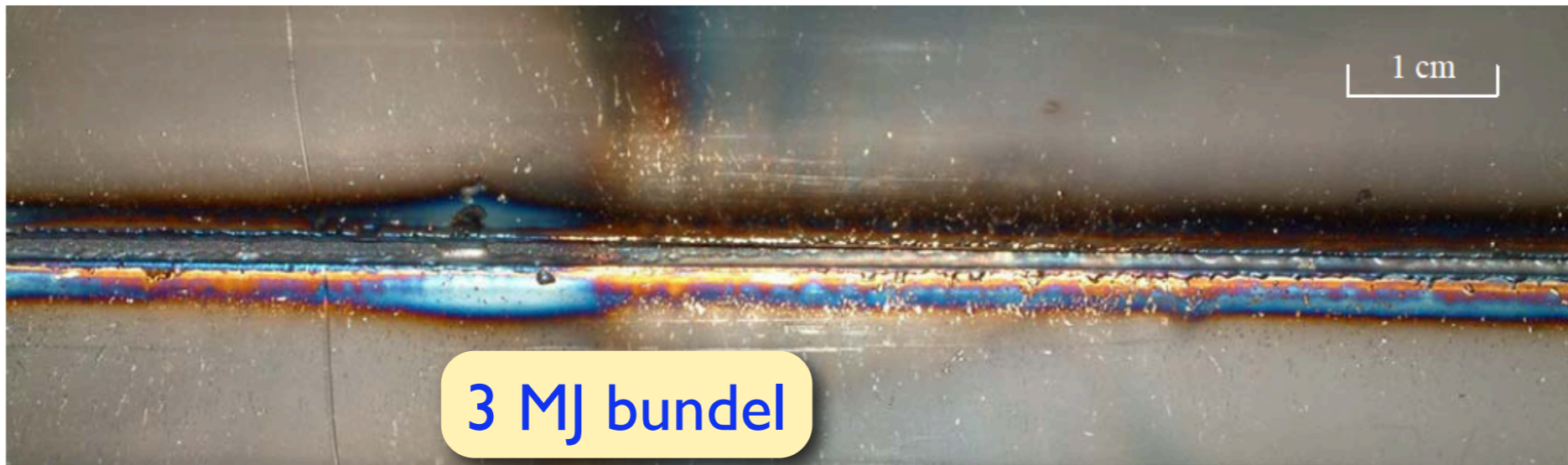


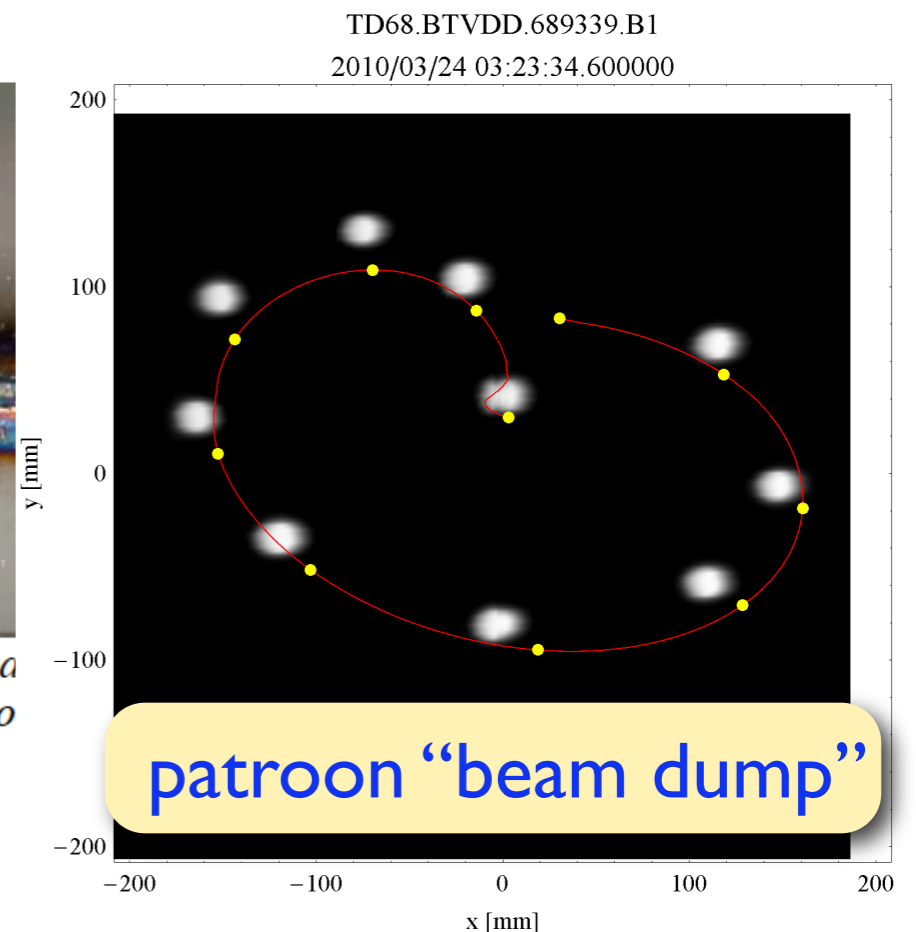
Figure 4. Damage observed on the inside of the vacuum chamber, on the beam impact side. A groove approximately 110 cm long due to removed material was clearly visible, starting at about 30 cm from the entrance.

# De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten
- Uitdaging 2: bundelintensiteit
  - energie LHC-bundels  $\sim$  TGV
  - verlies van  $10^{-6}$  veroorzaakt quench,  $10^{-3}$  vernielt magneten



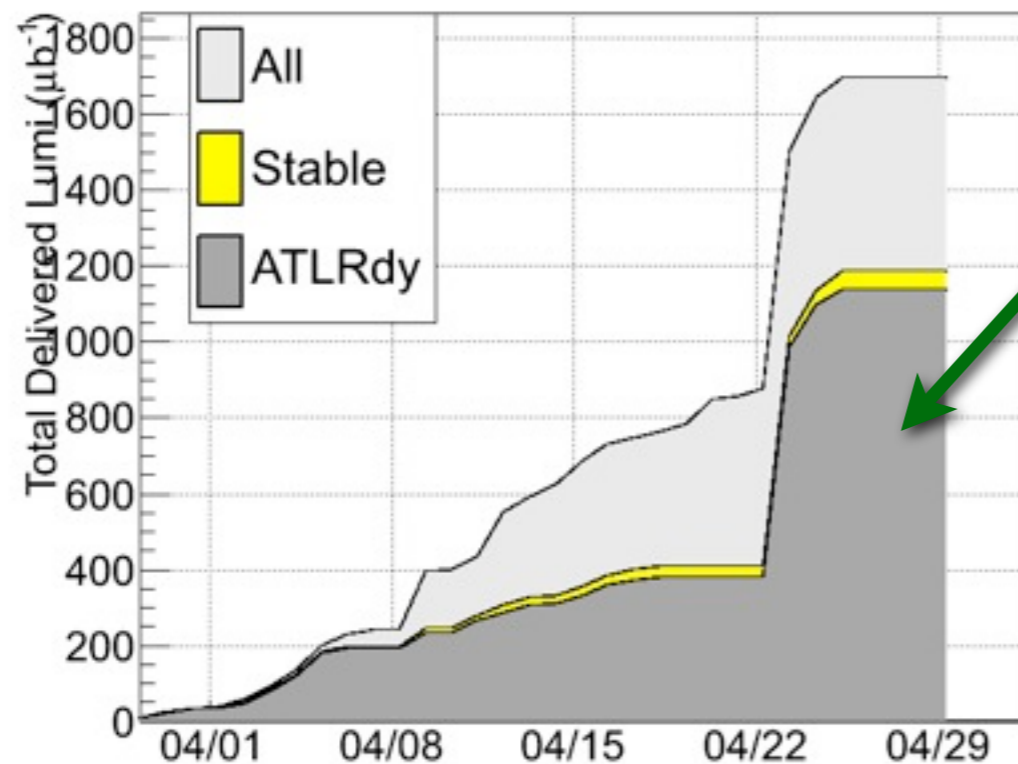
Figure 4. Damage observed on the inside of the vacuum chamber, on the beam impact approximately 110 cm long due to removed material was clearly visible, starting at the entrance.



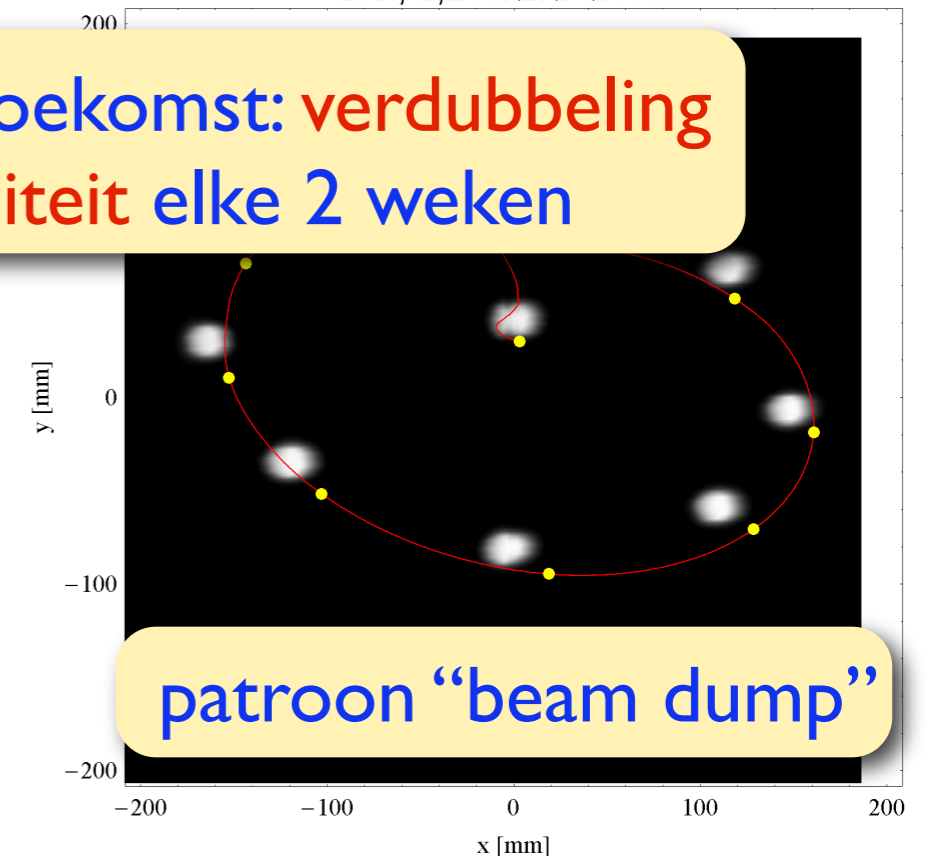


# De LHC: praktijk

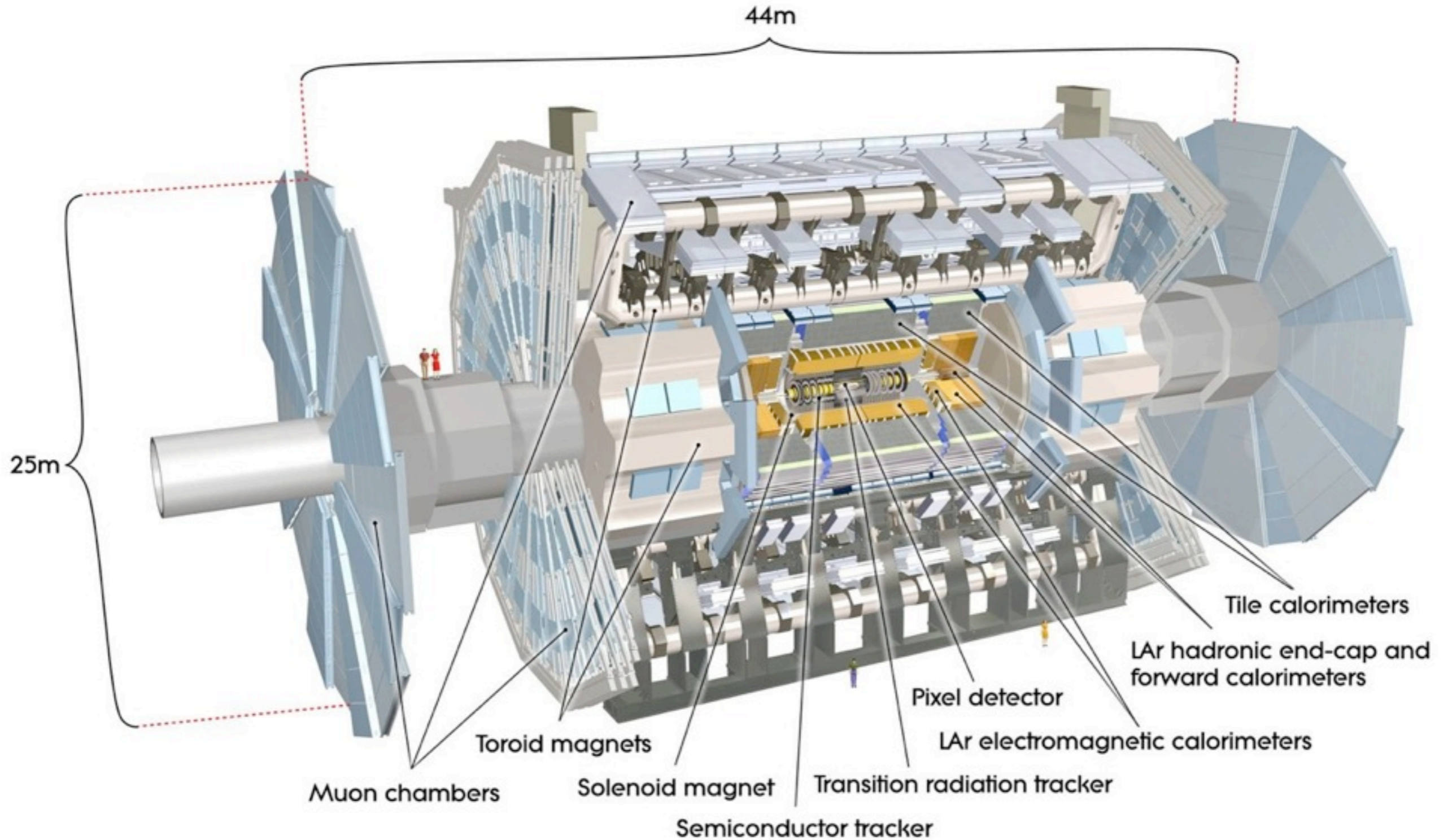
- Uitdaging 1: dipoolmagneten
- Uitdaging 2: bundelintensiteit
  - energie LHC-bundels  $\sim$  TGV
  - verlies van  $10^{-6}$  veroorzaakt quench,  $10^{-3}$  vernielt magneten



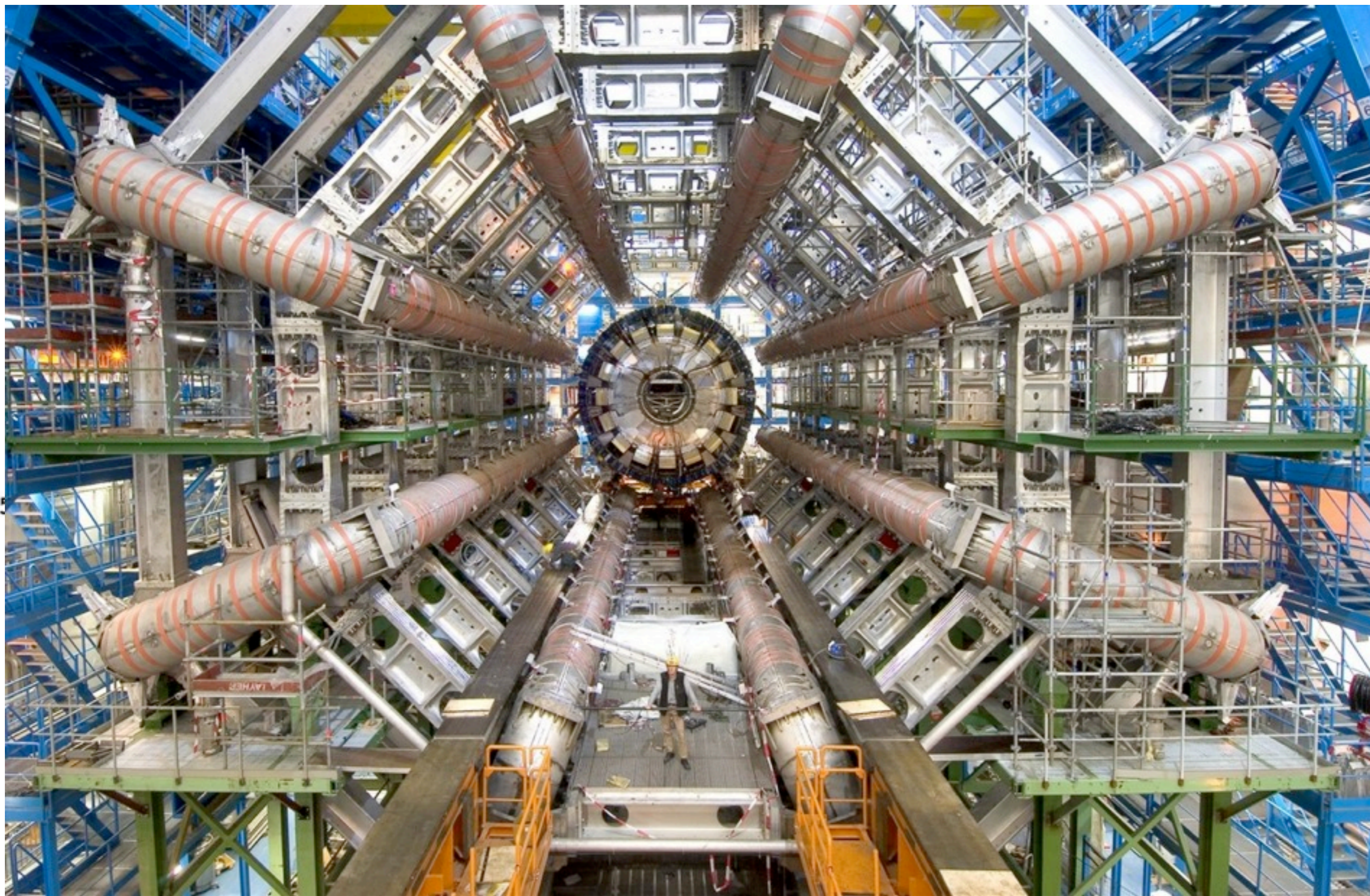
nabije toekomst: verdubbeling  
luminositeit elke 2 weken



# Het Atlas-experiment

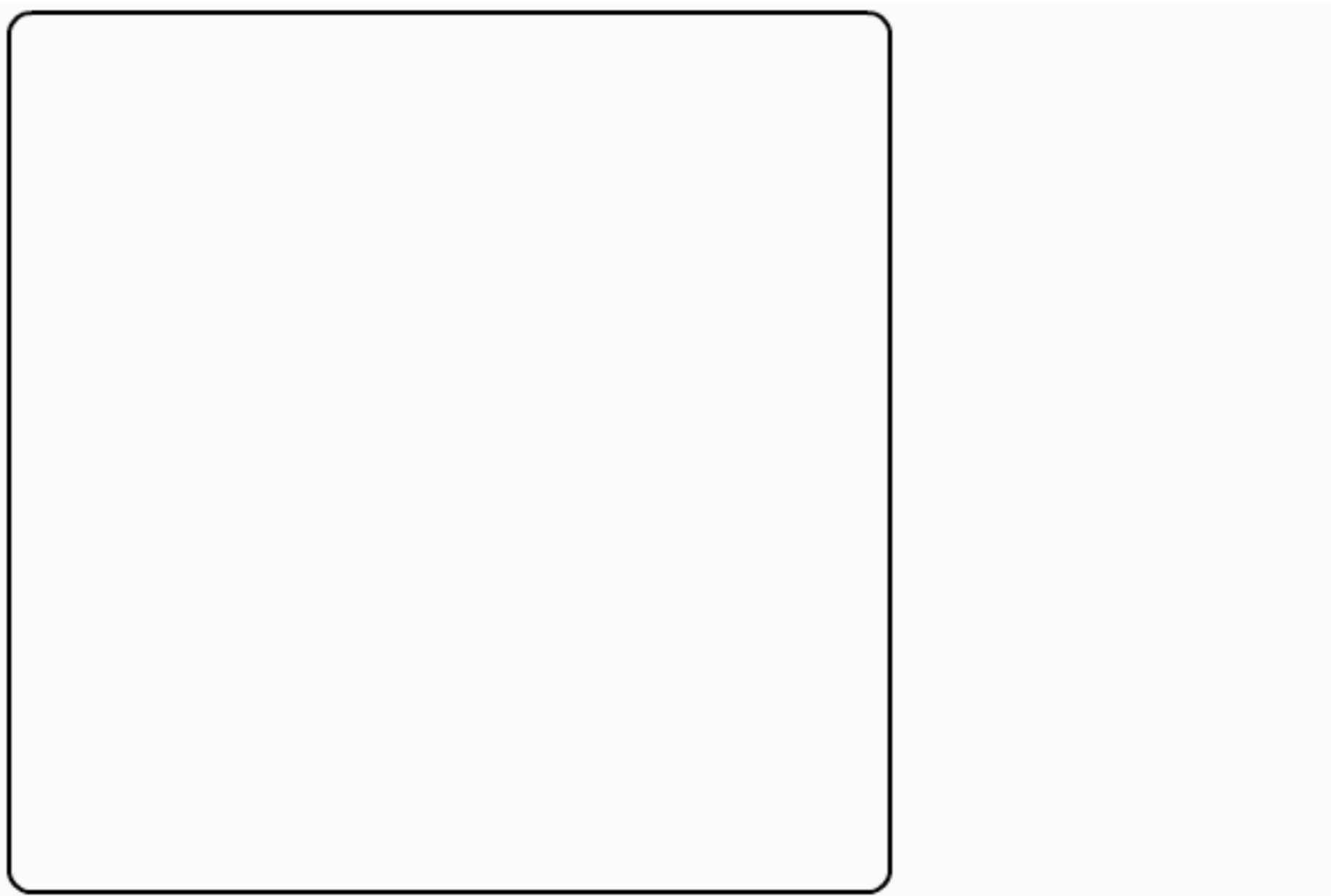


# Het Atlas-experiment



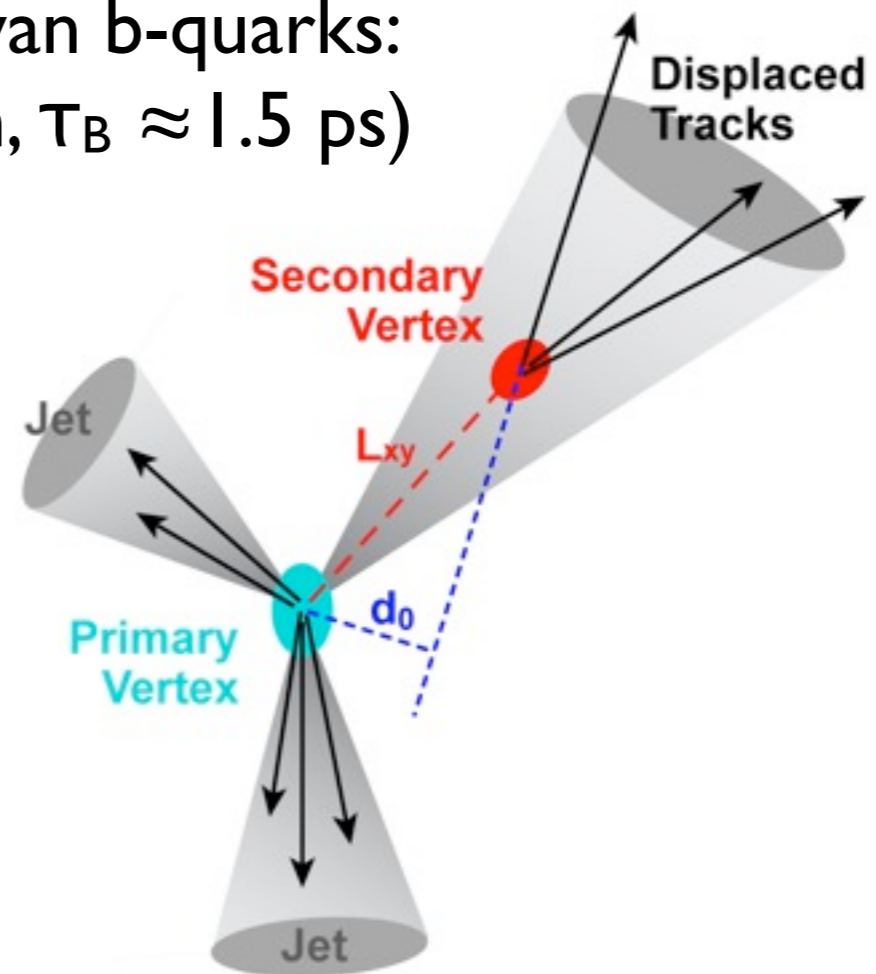
25

# Deeltjesdetectie

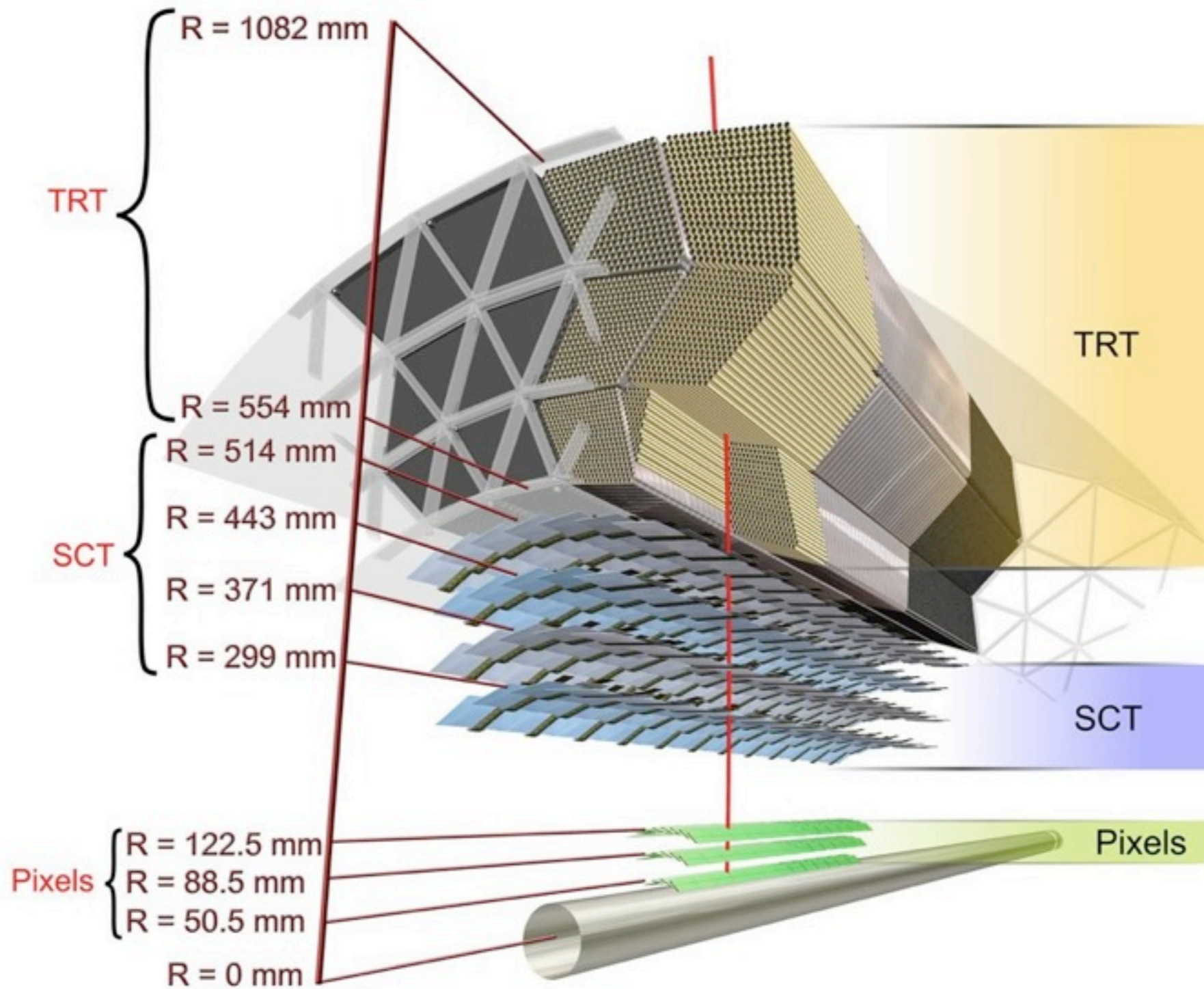


# Deeltjesdetectie

- Behalve (in principe) afzonderlijk detecteerbare deeltjes:
  - neutrino's (schijnbare schending van impulsbehoud)
  - hadron-jets (energieën gemeten in calorimeter /geladen deeltjes)
  - $\tau$ -leptonen (gecollimeerde "jets")
  - b-jets (afkomstig van hadronisatie van b-quarks: "lange" levensduur van B-hadronen,  $\tau_B \approx 1.5$  ps)



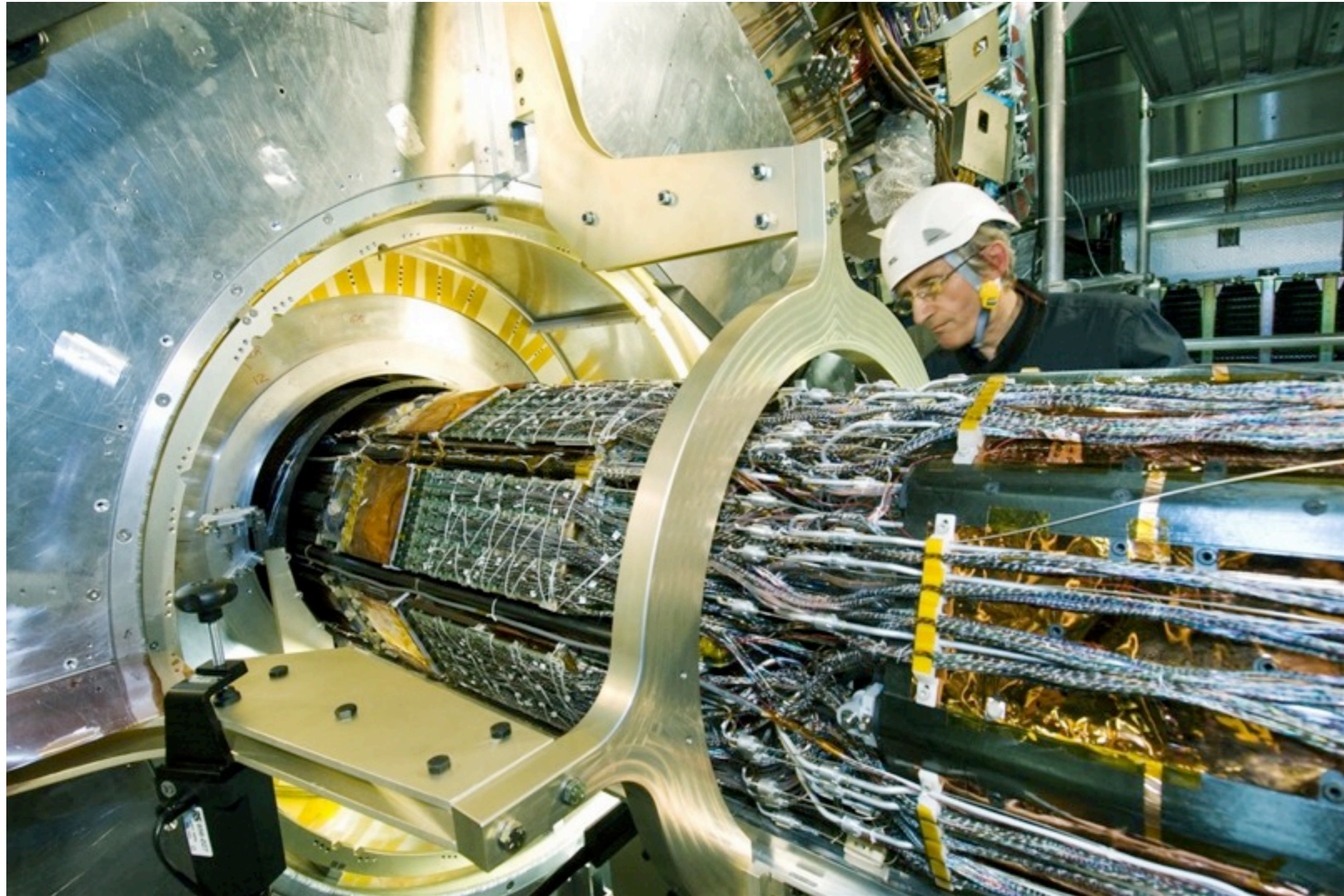
# Inner Detector



# Inner Detector

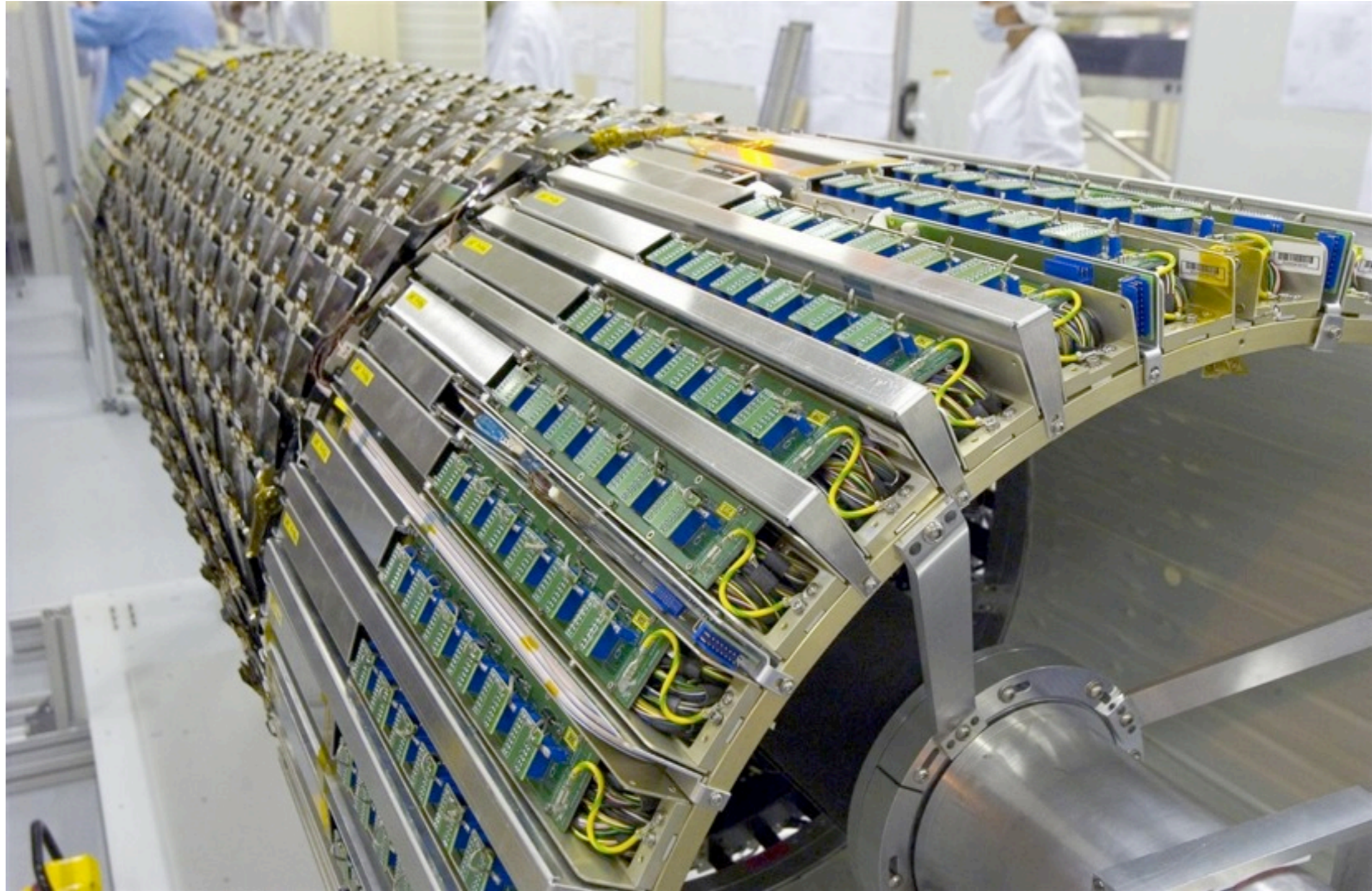


# Inner Detector

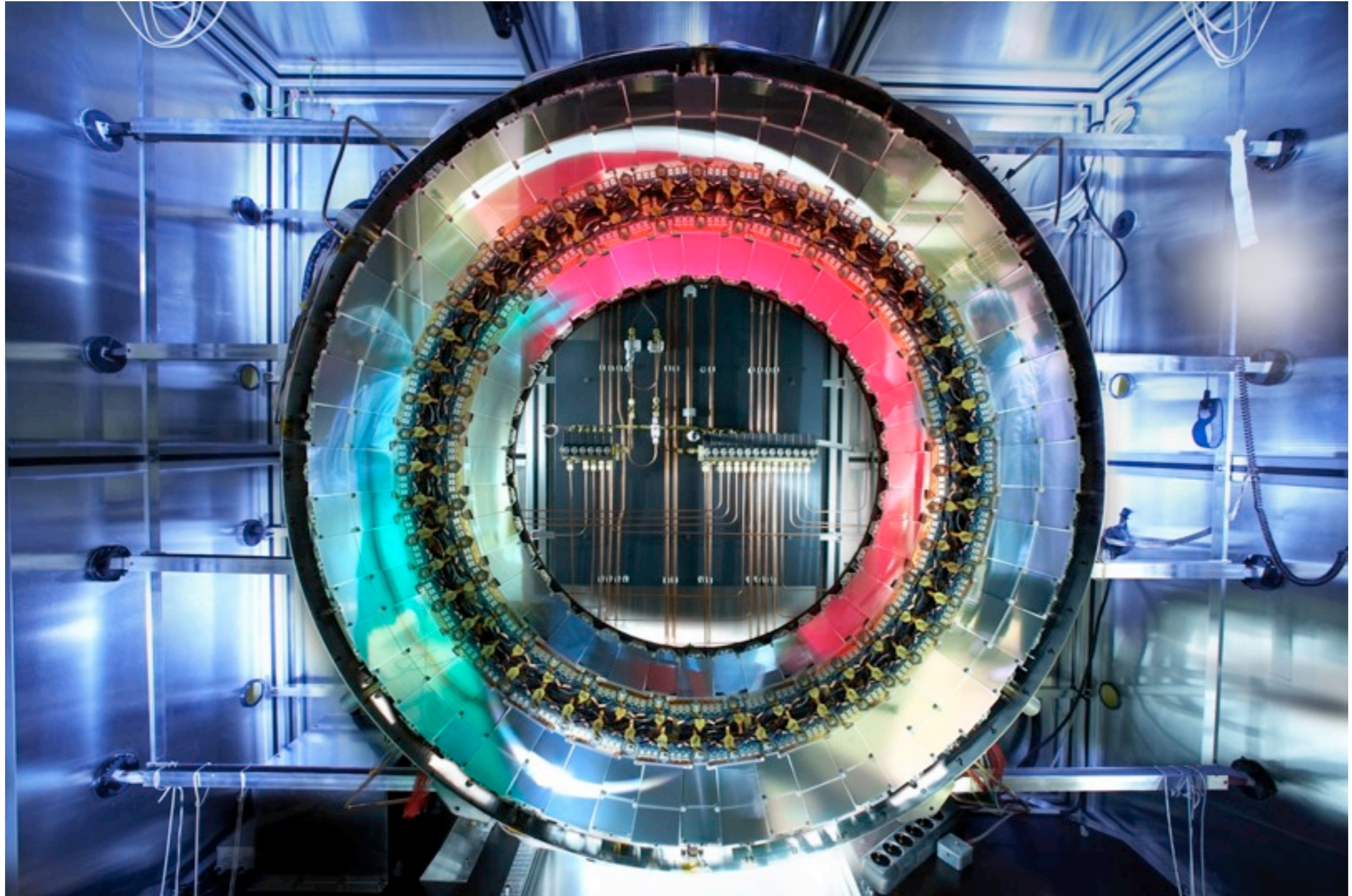




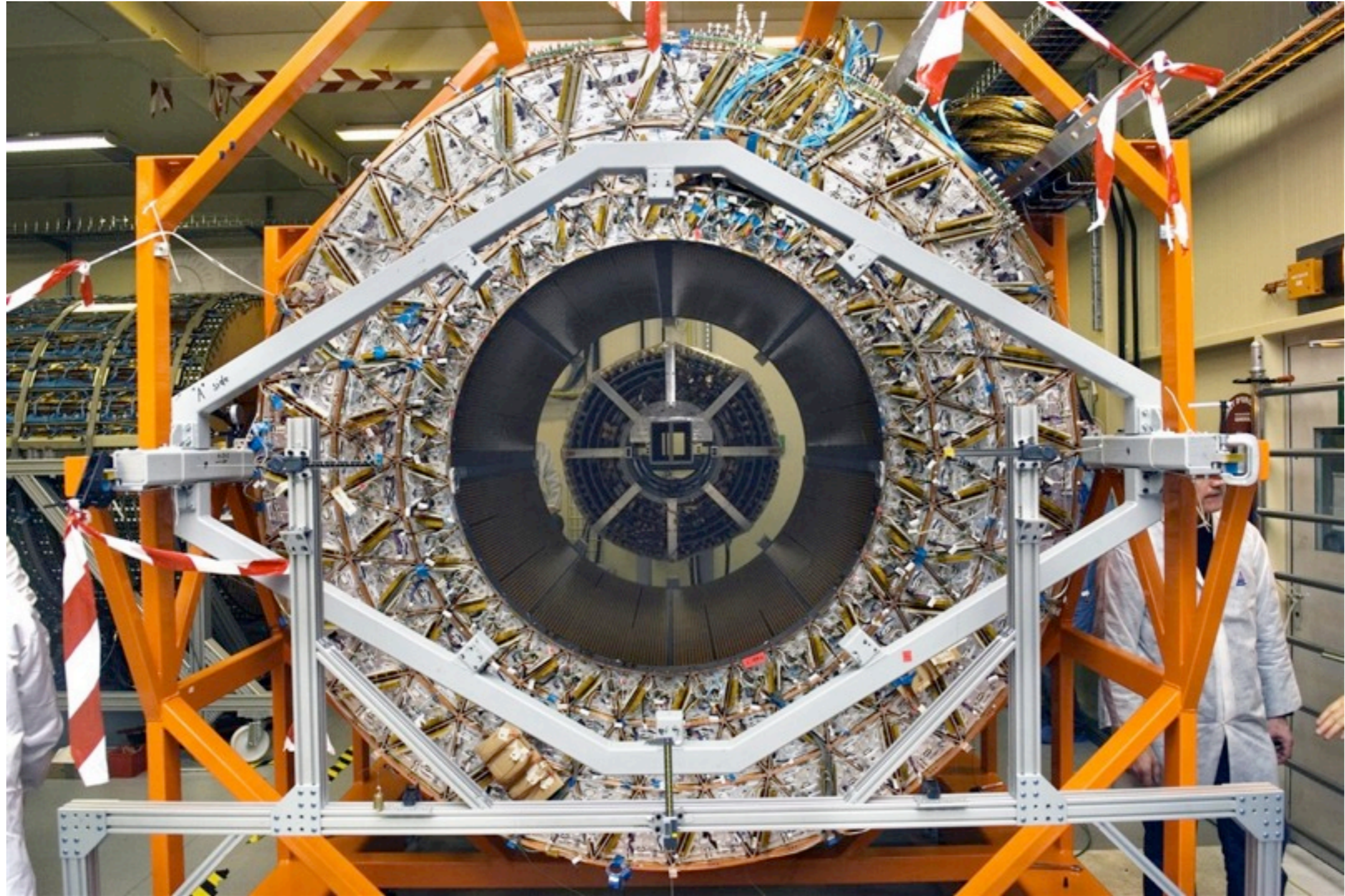
# Inner Detector



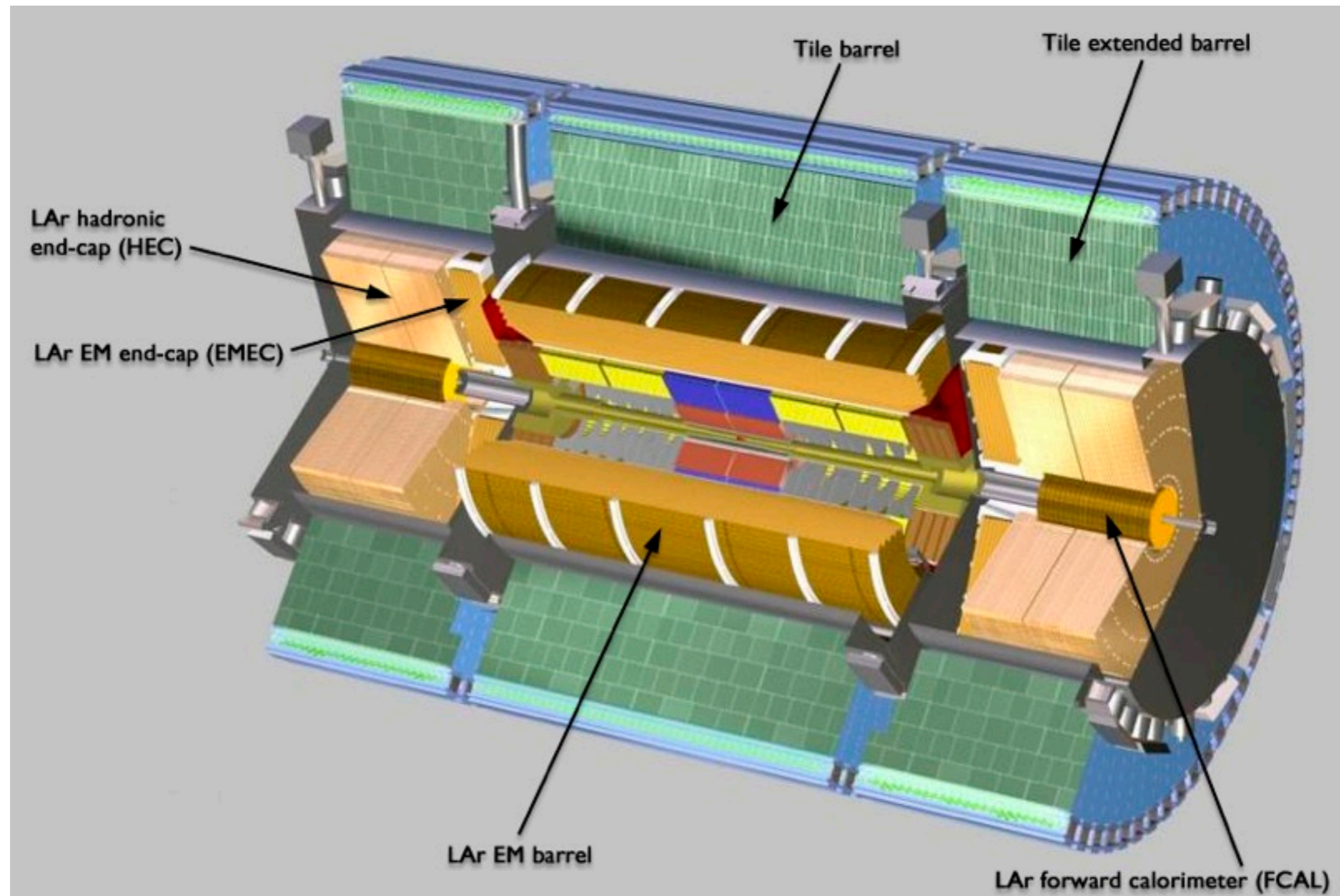
# Inner Detector



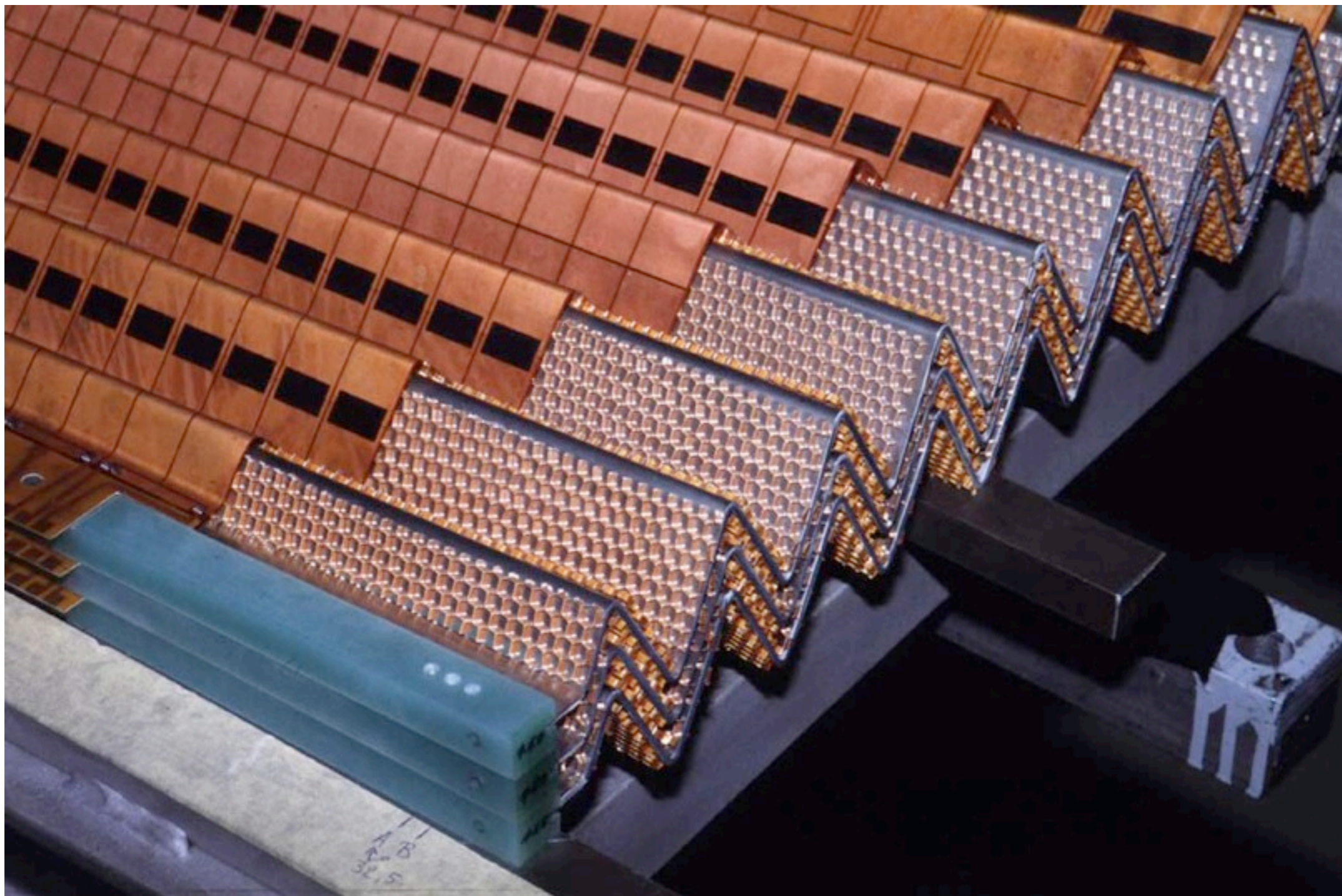
# Inner Detector



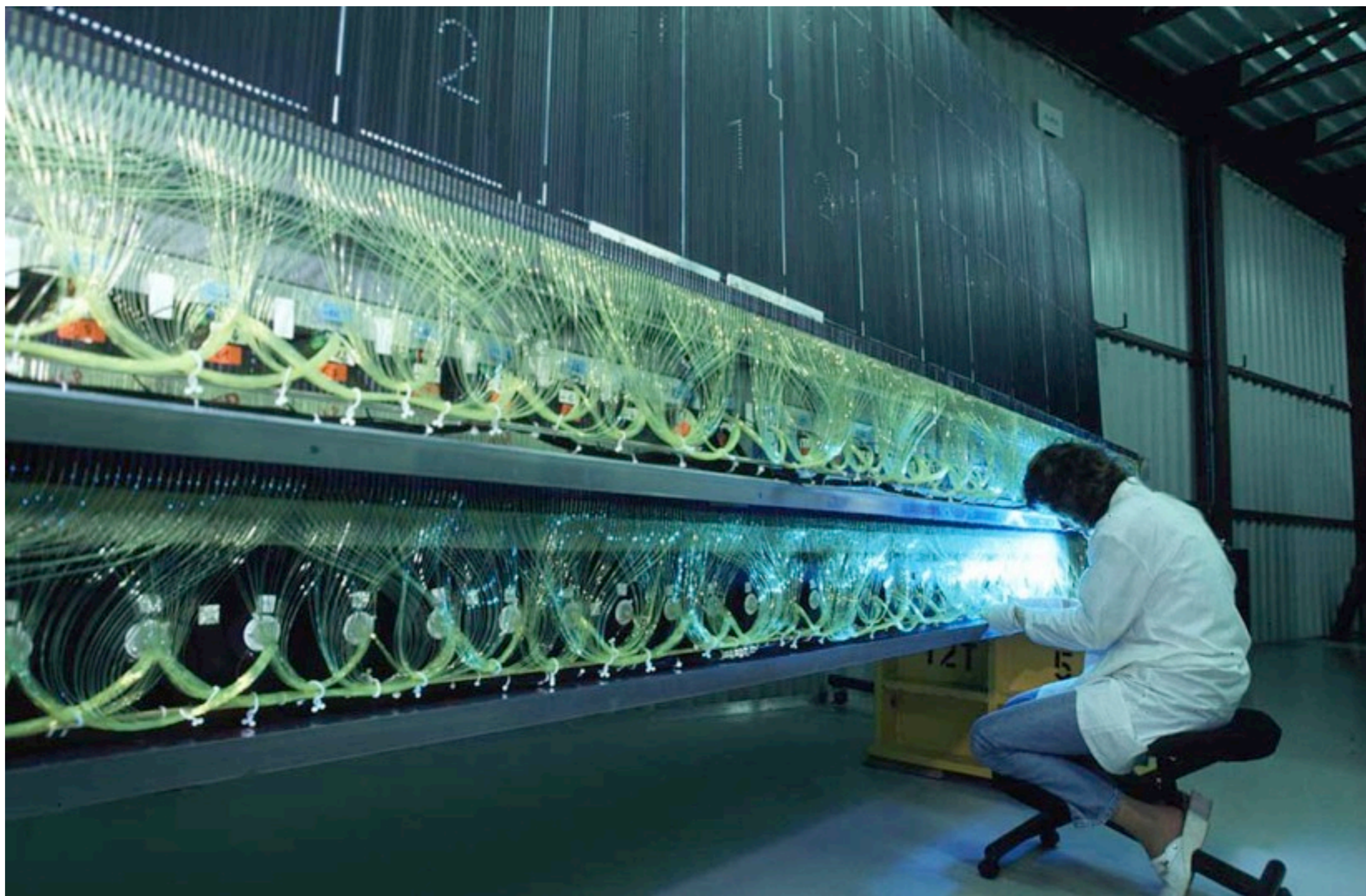
# Calorimeters



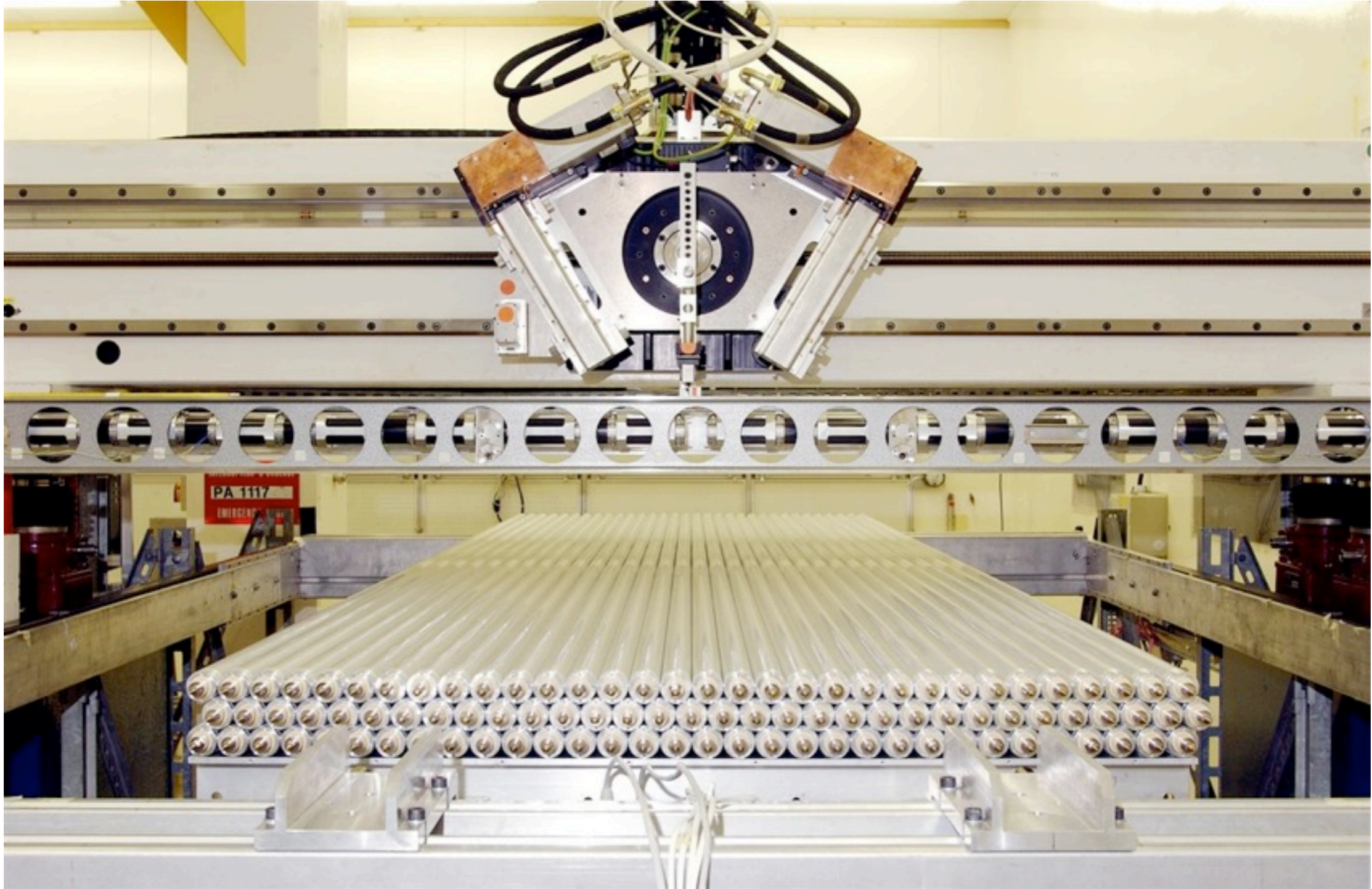
# Calorimeters



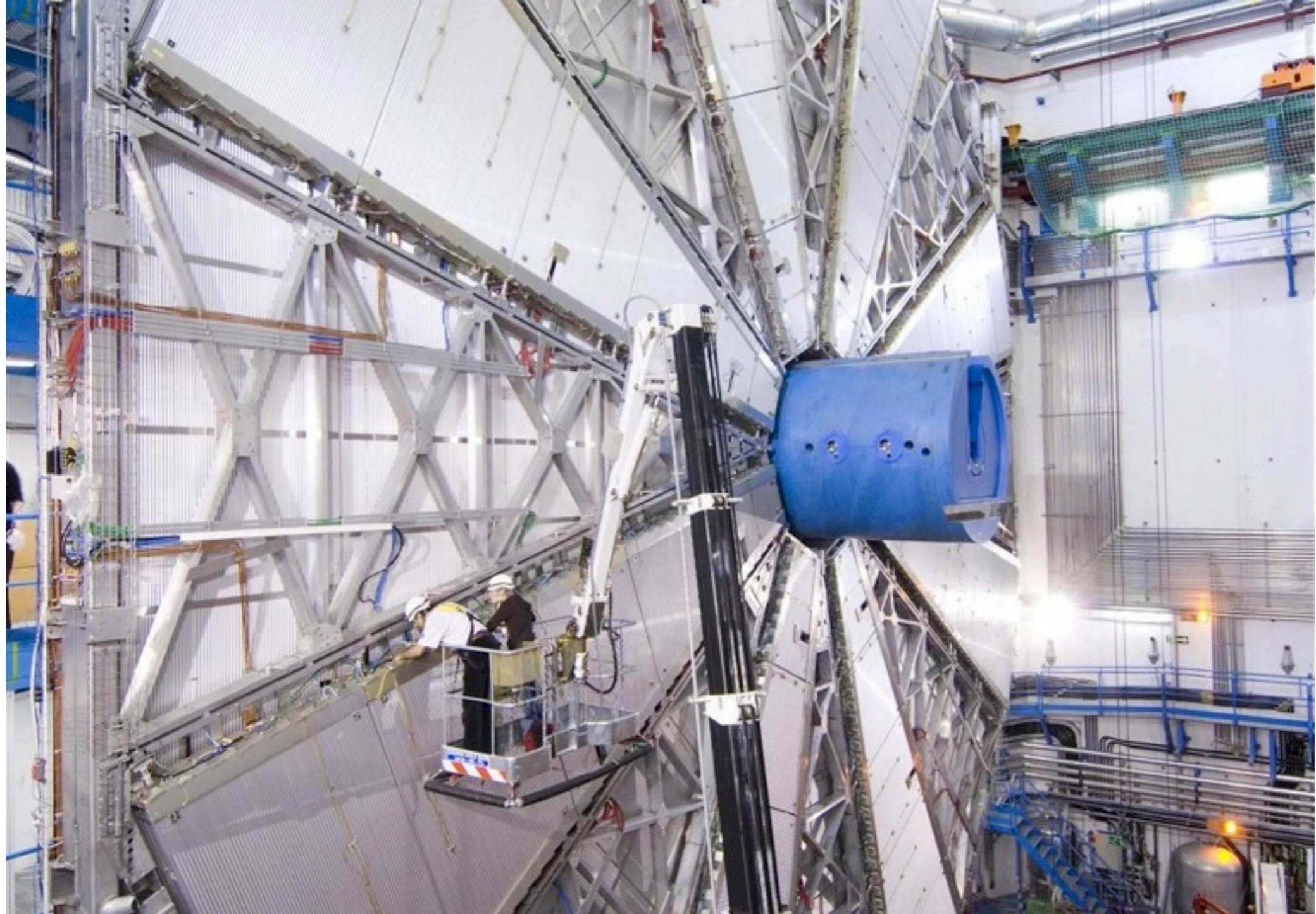
# Calorimeters



# Muon-systemem

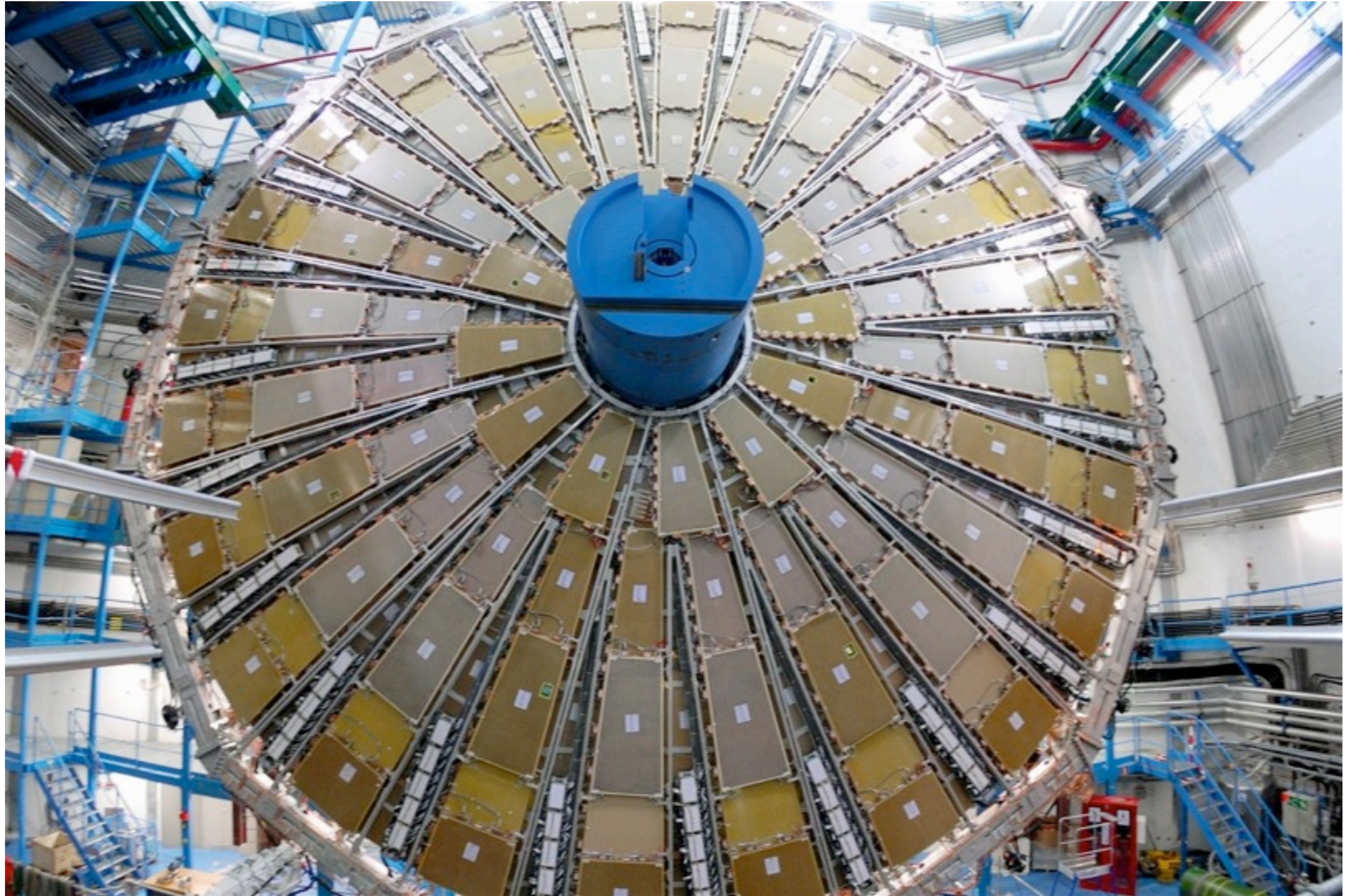


# Muon-systemem



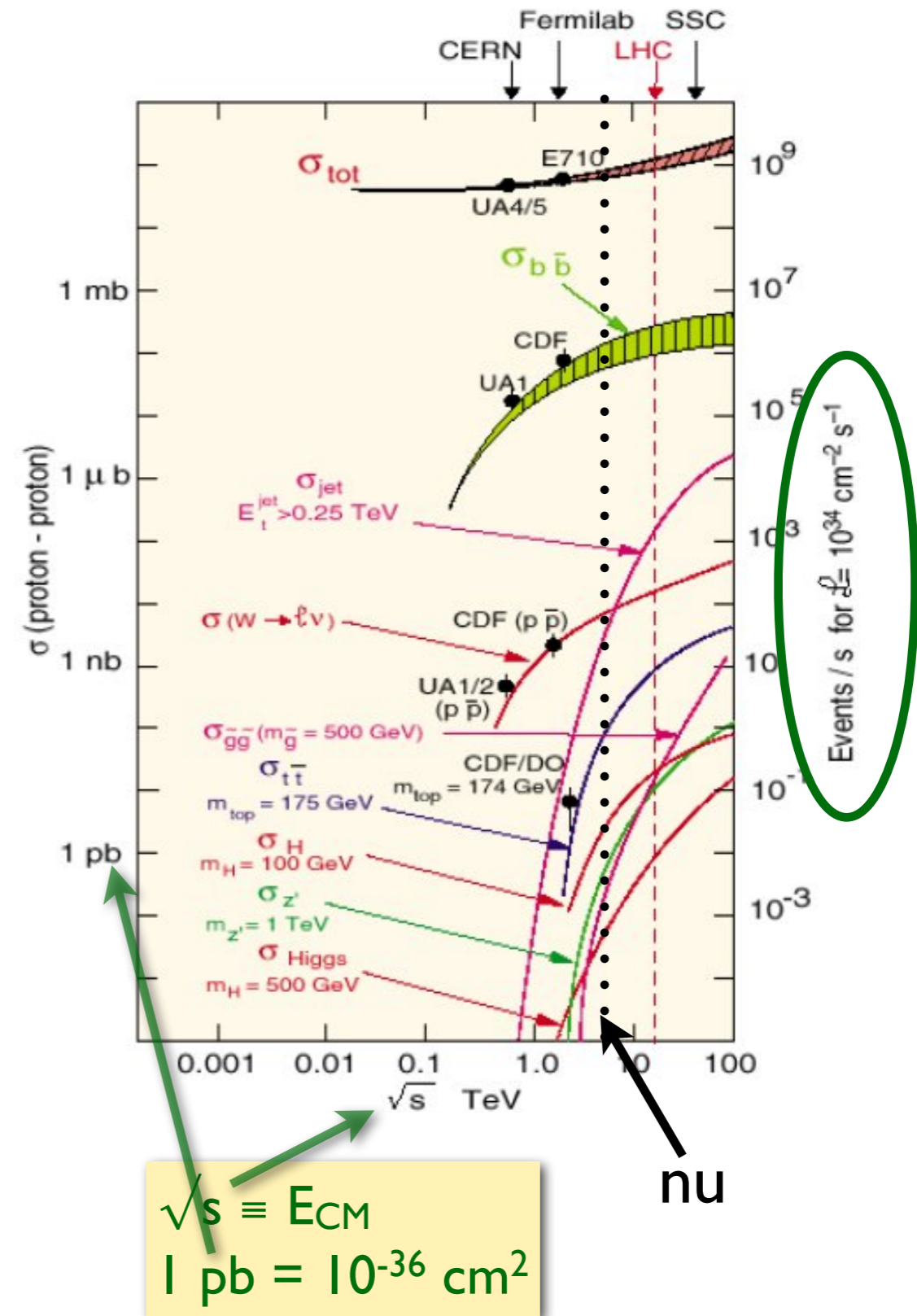


# Muon-systemem



# Experimentele condities

- Ontworpen voor luminositeit  $10^{33} - 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$
- $4 \cdot 10^7$  bundelkruisingen / s
- Bij  $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$ :
  - $\sim 10^7$  interacties / s
  - $\sim 1$  W-boson / s
  - $\sim 10^{-2}$  top-quarks / s
  - $\sim 10^{-4}$  Higgs-bosonen / s



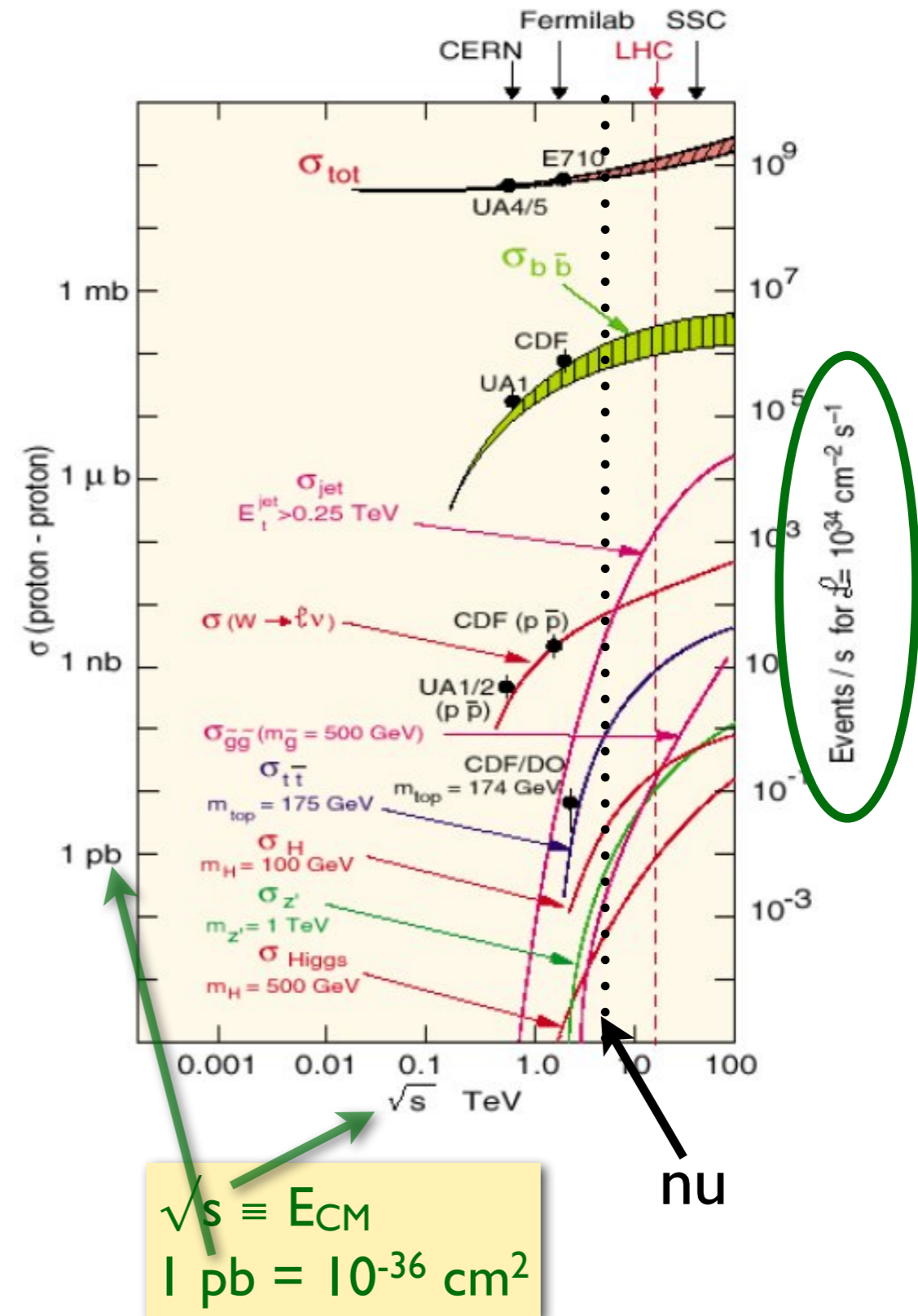
# Experimentele condities

- Ontworpen voor luminositeit  $10^{33} - 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$
- $4 \cdot 10^7$  bundelkruisingen / s
- Bij  $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$ :
  - $\sim 10^7$  interacties / s
  - $\sim 1$  W-boson / s
  - $\sim 10^{-2}$  top-quarks / s
  - $\sim 10^{-4}$  Higgs-bosonen / s

Gemiddelde interactie (na data-reductie):  $\sim 1 \text{ MB}$

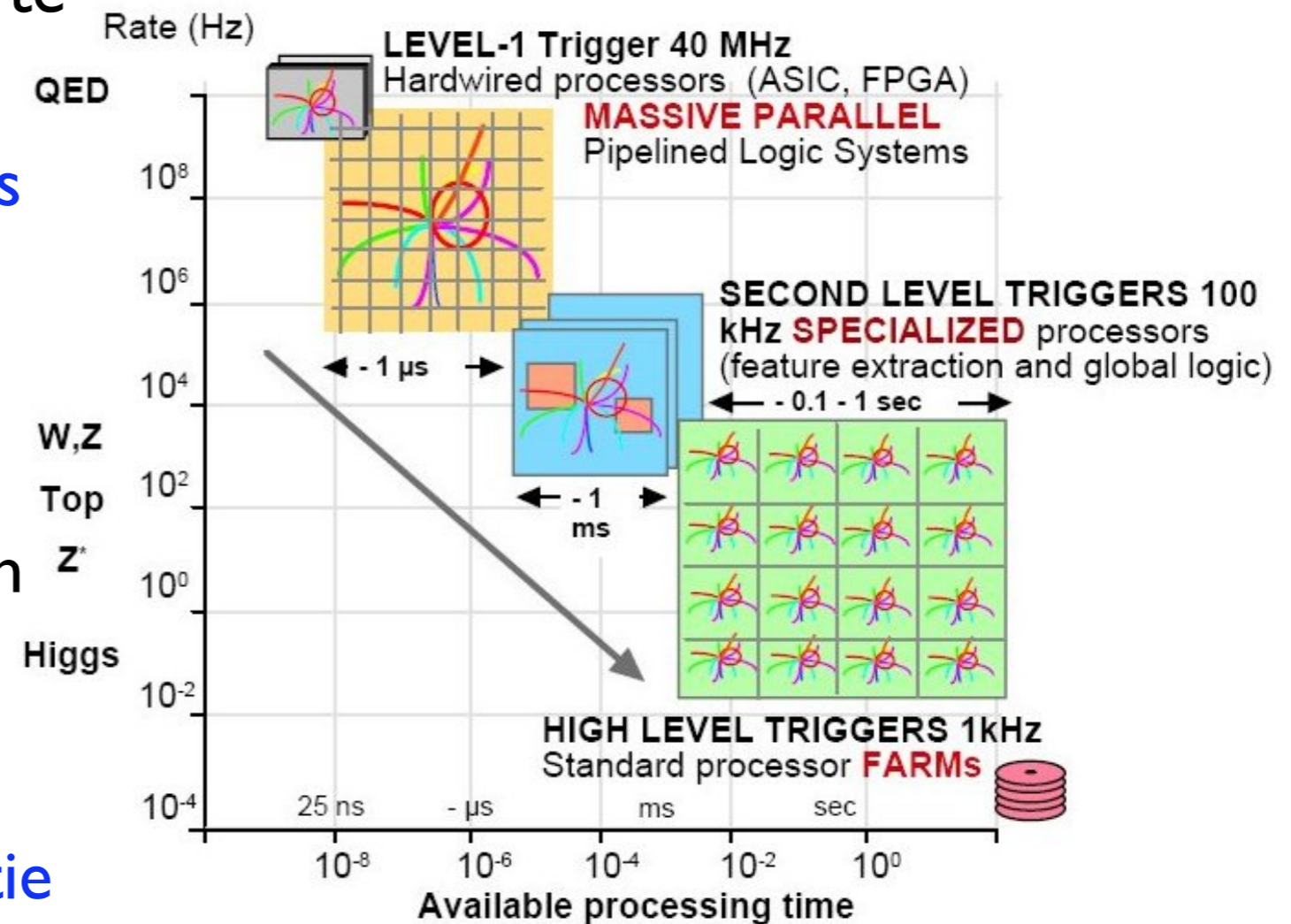
- bewaar  $\sim 200 \text{ Hz}$
- vele interacties moeten “online” weggegooid worden

Trigger



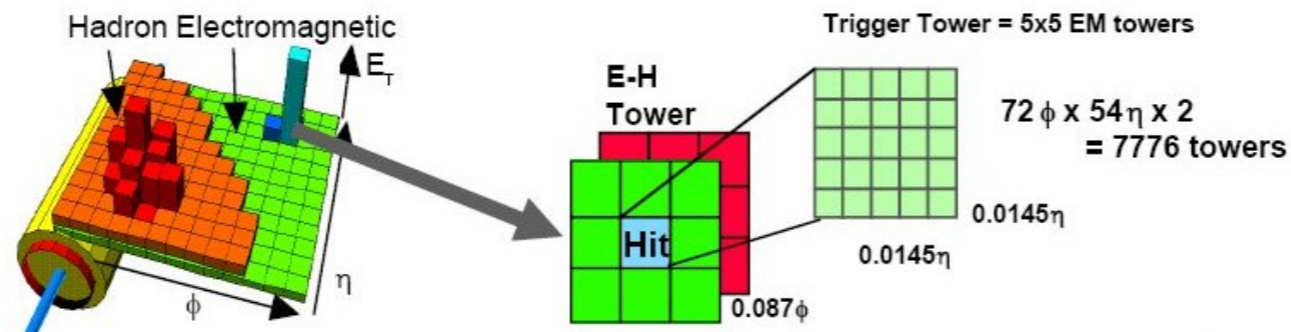
# Trigger-strategie

- Detectorgegevens zijn te complex om in een keer te beslissen welke interacties te bewaren
- Strategie: meerdere niveaus
  - gooi eerst duidelijke “rotzooi” weg
  - meer tijd om naar de moeilijke gevallen te kijken
  - 40 MHz → 100 kHz → 1 kHz → 200 Hz
- Digitalisatie en data-reductie na 1<sup>e</sup>-niveau trigger



# Een beslissing iedere 25 ns

- 1<sup>e</sup> niveau:
- patronen in calorimeters:  $e^\pm, \gamma, \text{jets}$

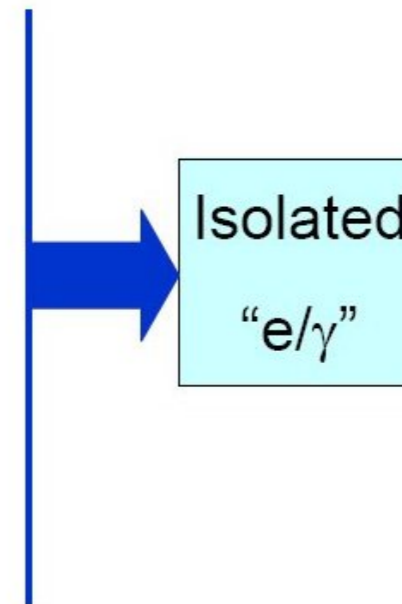


$$E_T(\text{Hit Tower}) + \max E_T(\text{Surrounding Towers}) > E_T^{\min}$$

$$E_T(\text{Hit Tower}) / E_T(\text{Surrounding Towers}) < H_0 E^{\max}$$

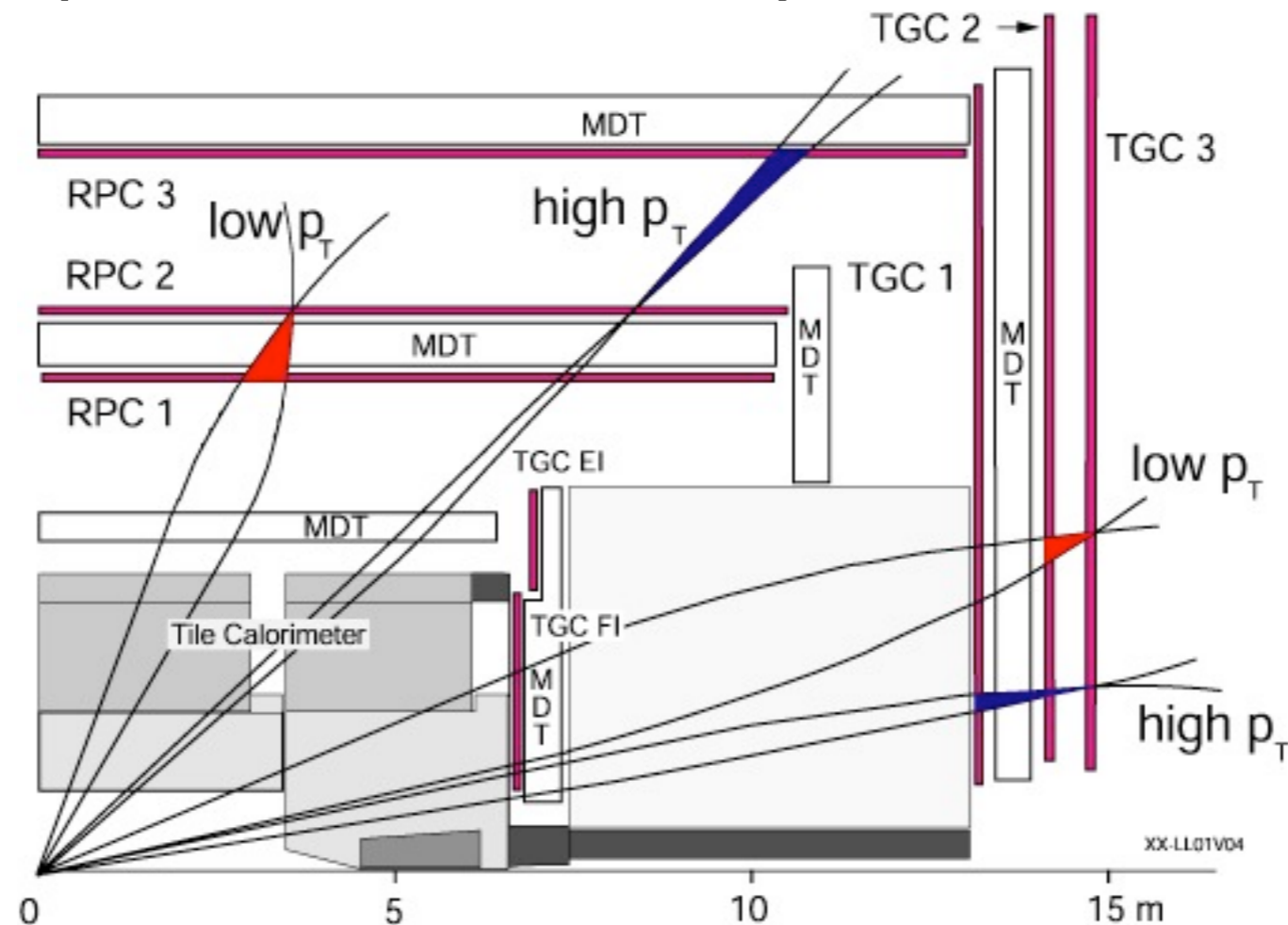
$$\text{At least 1 } E_T(\text{Surrounding Towers}) < E_{\text{iso}}^{\max}$$

$$\text{Fine-grain: } \geq 1(\text{Fine-grain Towers}) > R E_T^{\min}$$



# Een beslissing iedere 25 ns

- 1<sup>e</sup> niveau:
- patronen in calorimeters:  $e^\pm$ ,  $\gamma$ , jets
- grofmazige patronen in het muon-systeem



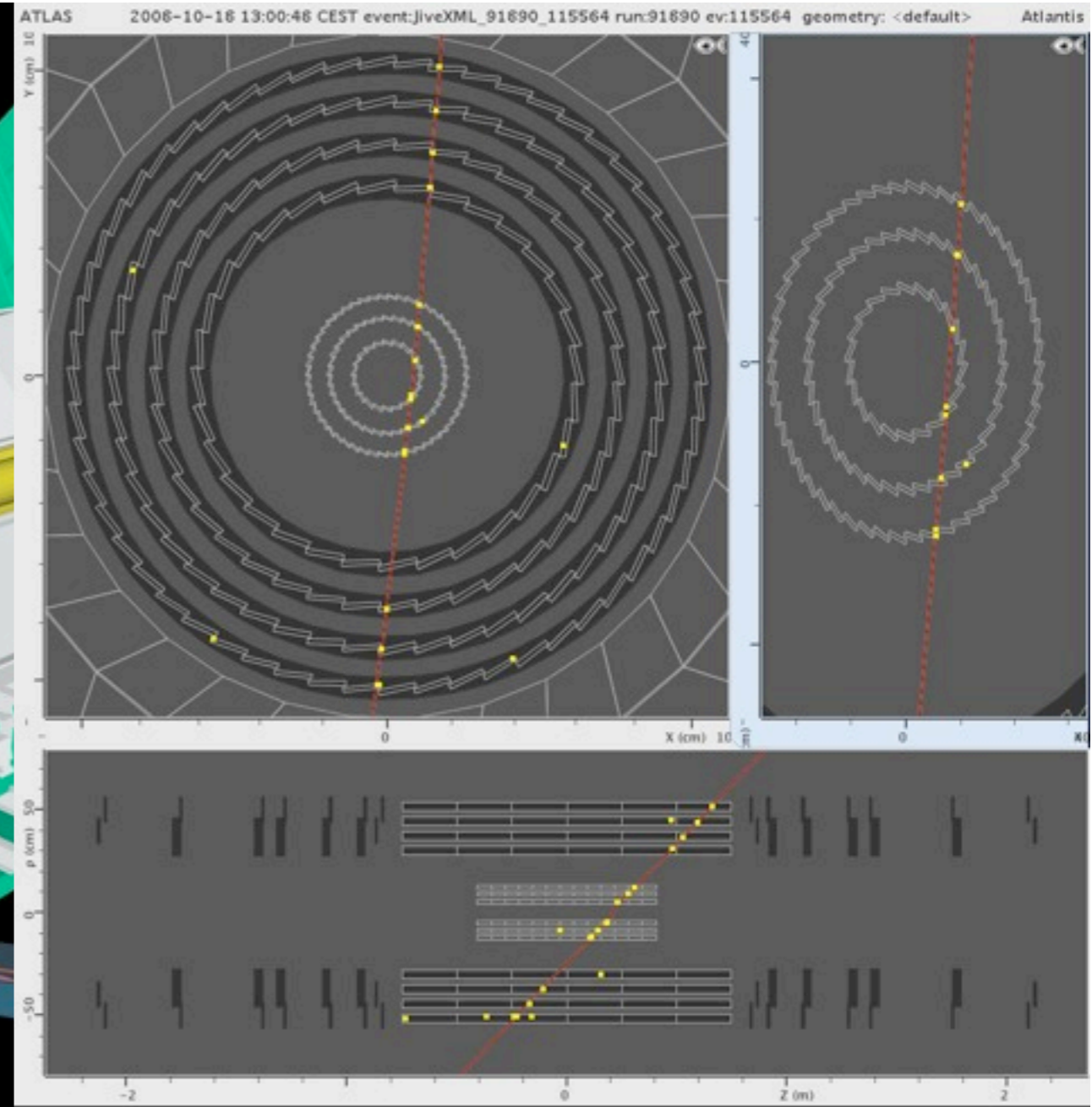
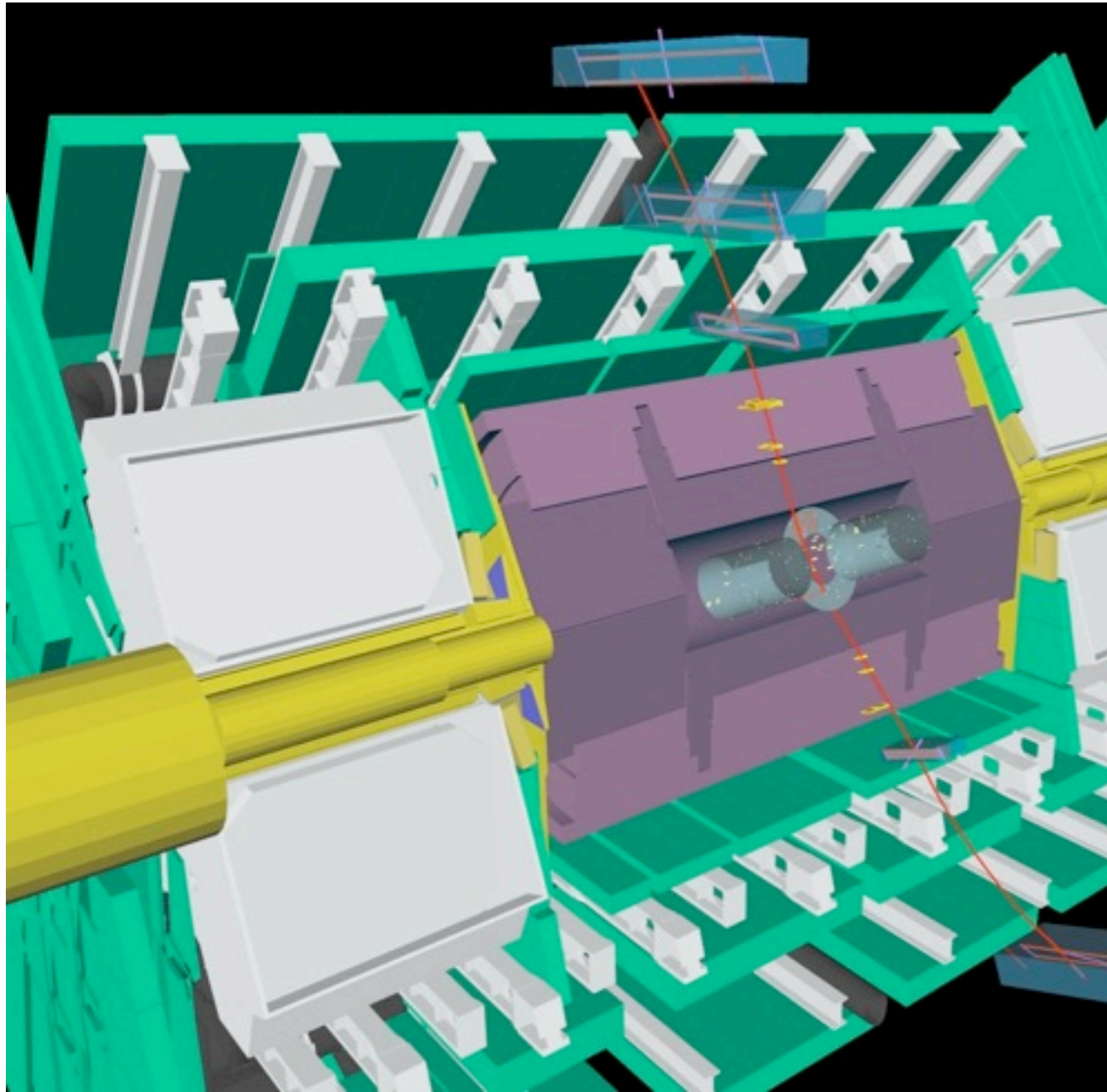
# On-line data-reconstructie

- 2<sup>e</sup>- en 3<sup>e</sup>-niveau: “standaard” PCs!
  - L2: 500
  - L3: 1800
- Verzamel informatie uit verschillende subsystemen → switches



# Kosmische en aardse botsingen

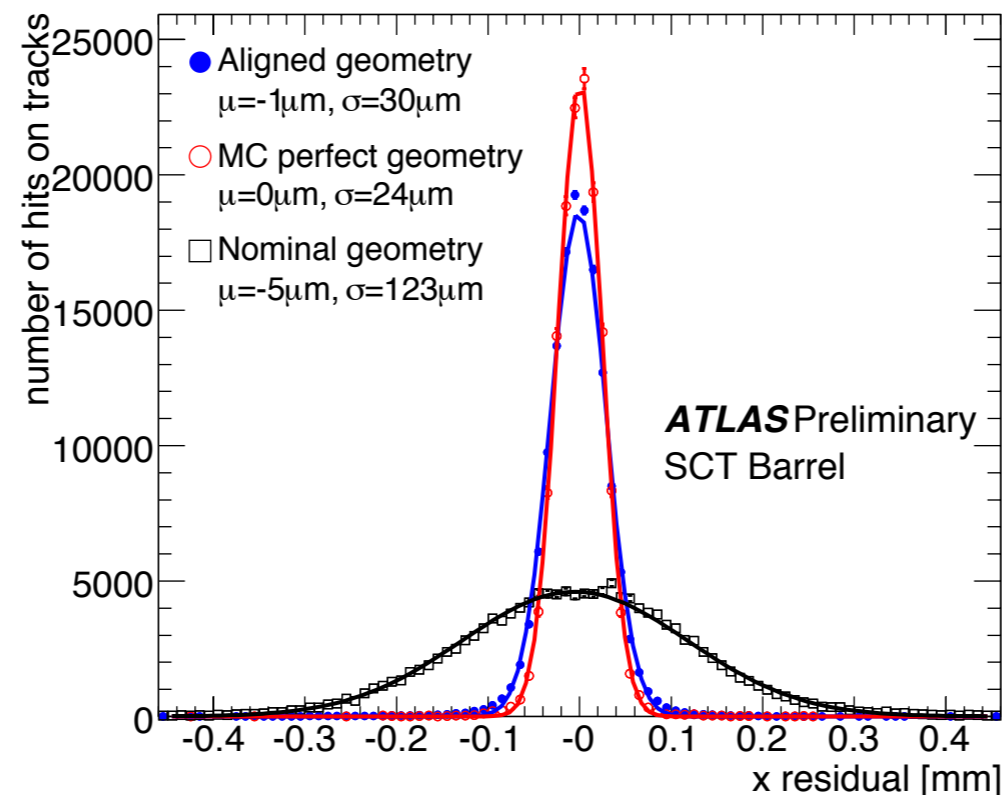
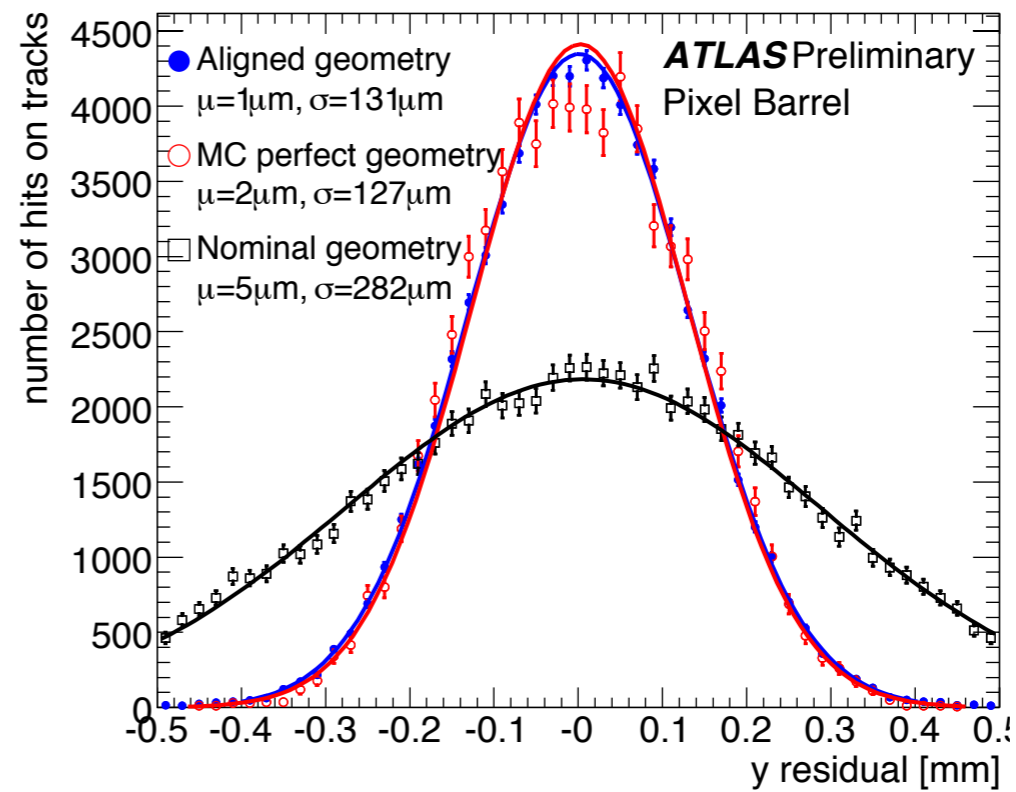
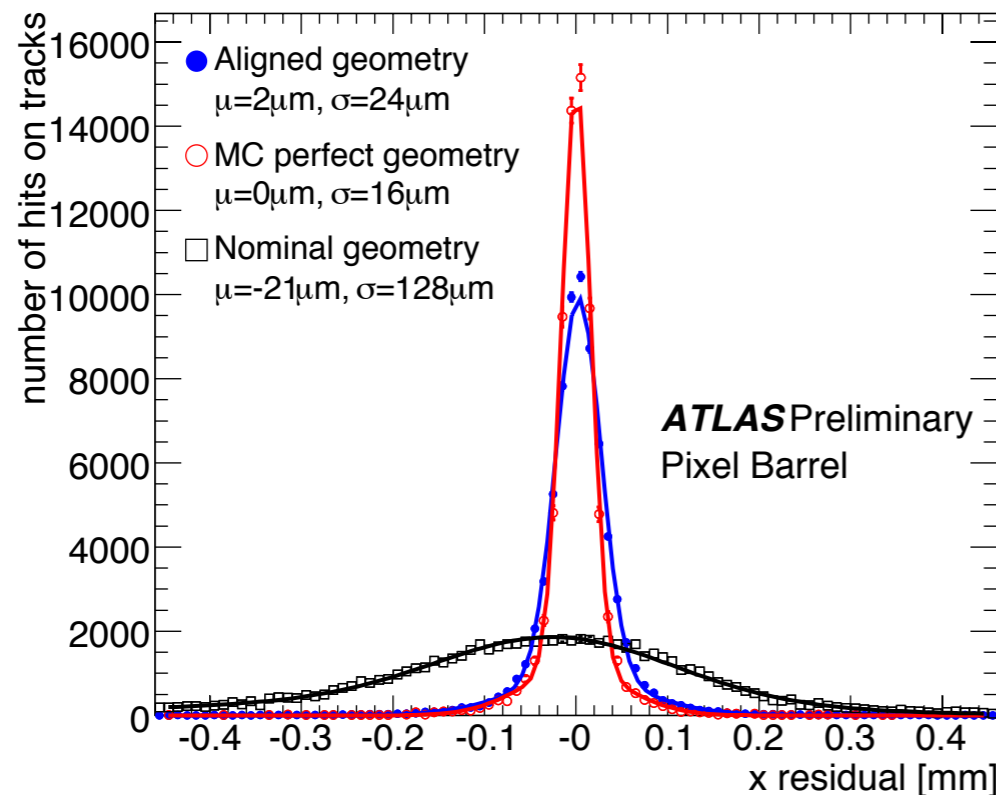
- Na september 2008 heeft ATLAS niet stil gezeten...





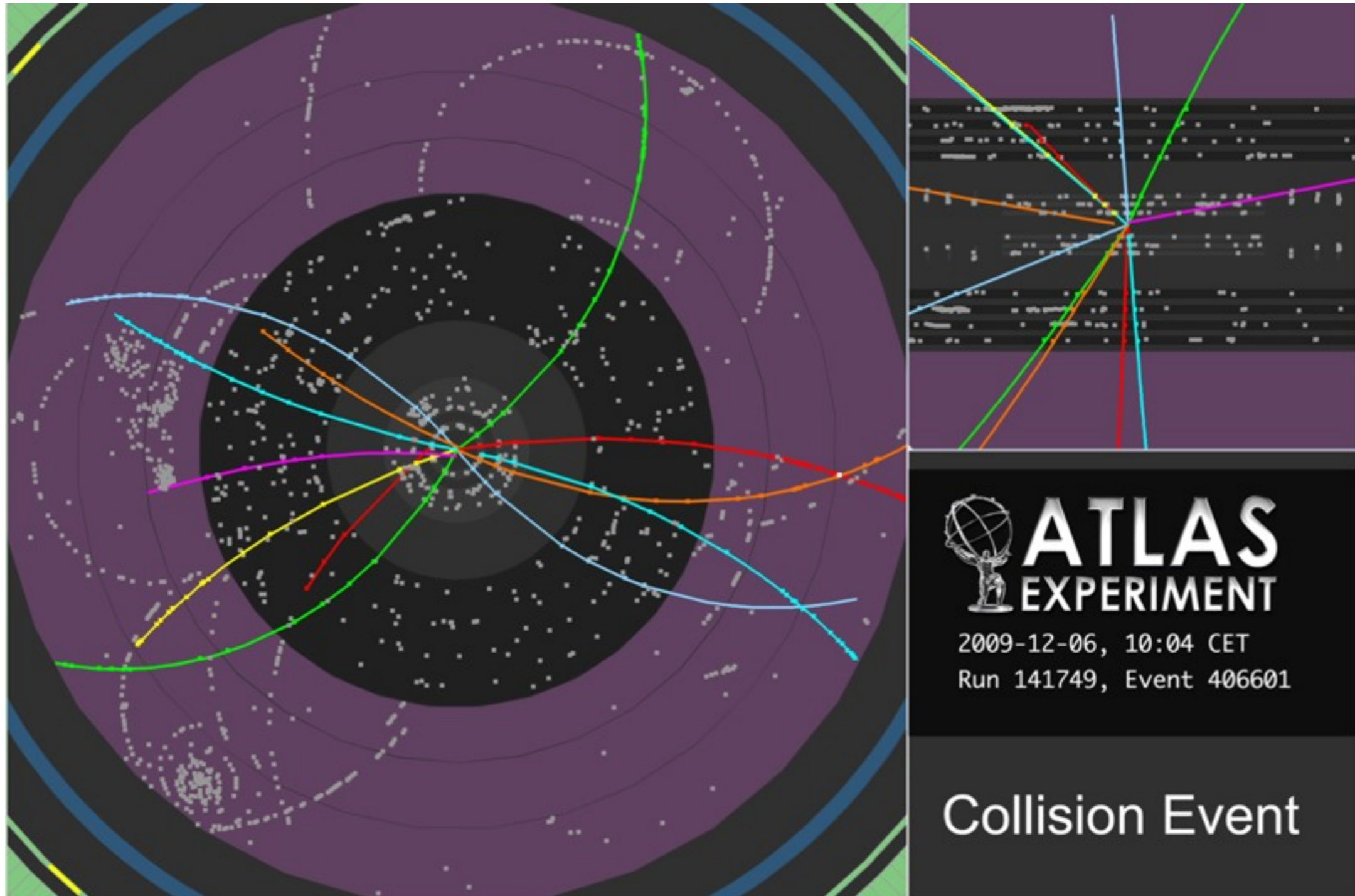
# Kosmische en aardse botsingen

- Na september 2008 heeft ATLAS niet stil gezeten...



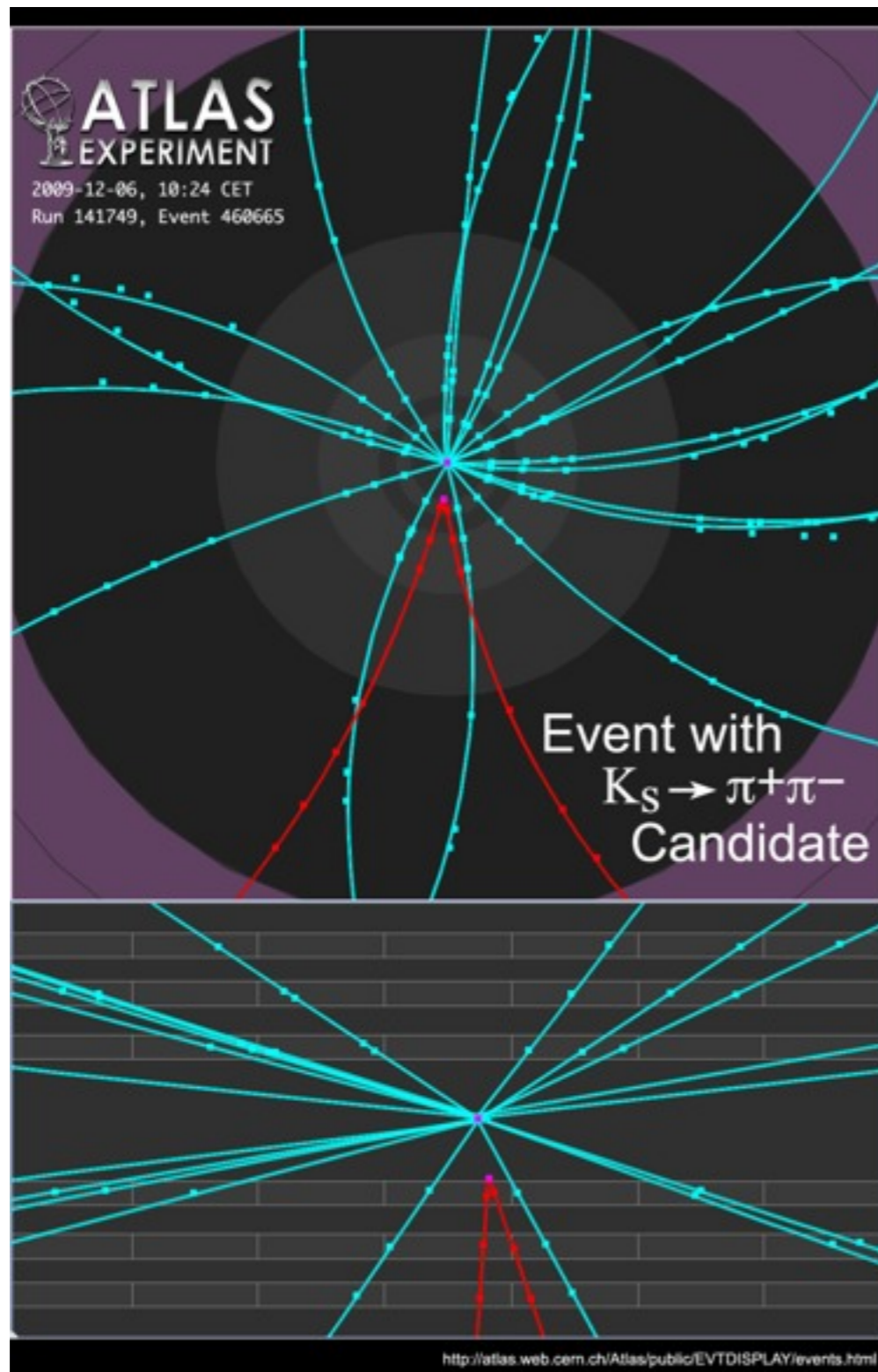
# Kosmische en aardse botsingen

- Na september 2008 heeft ATLAS niet stil gezeten...



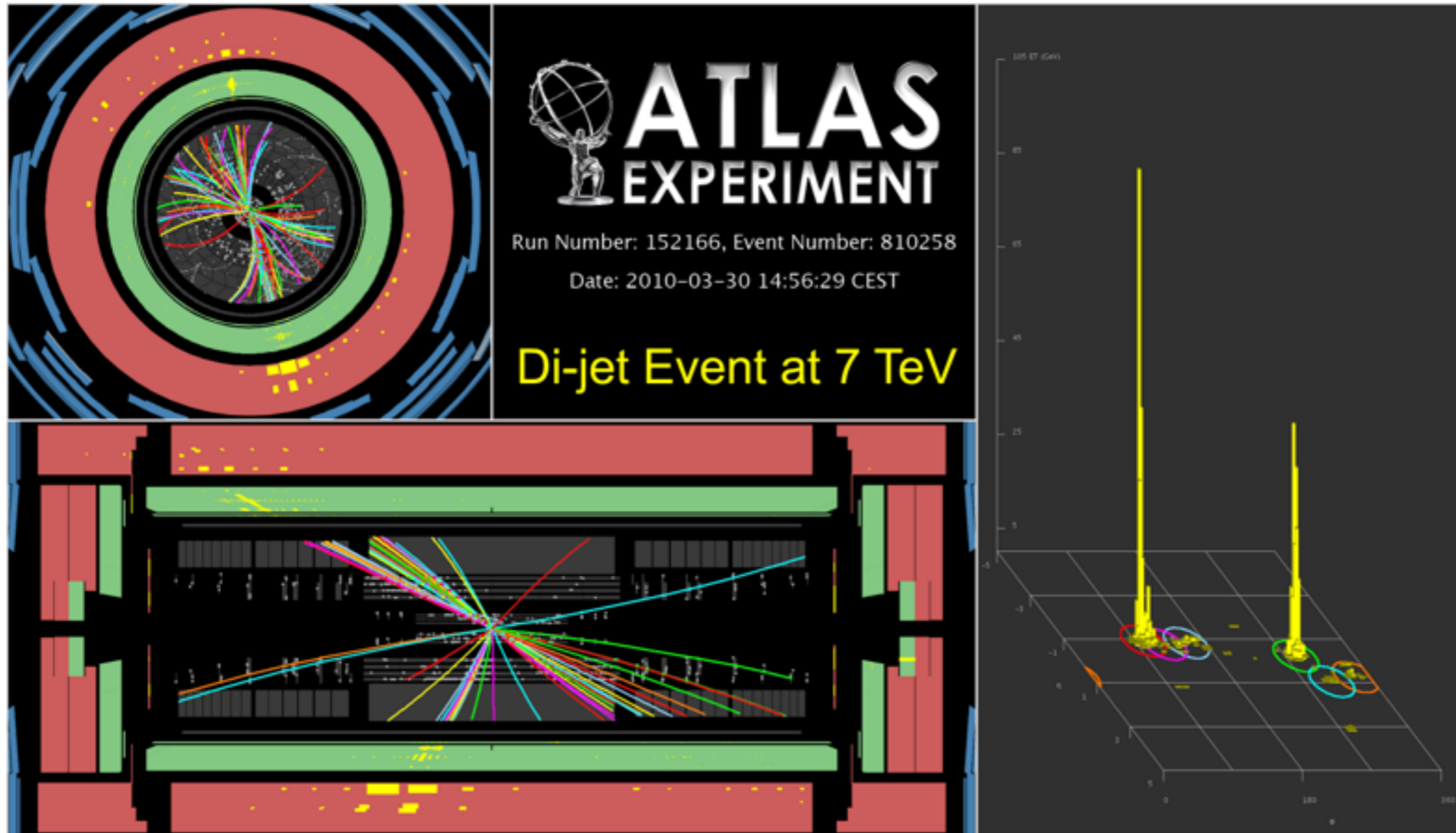
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

# Het begin van fysica-analyse



november 2009:  $E_{CM} = 900$  GeV,  
gedetailleerde studies  
sporendetectoren

# Het begin van fysica-analyse

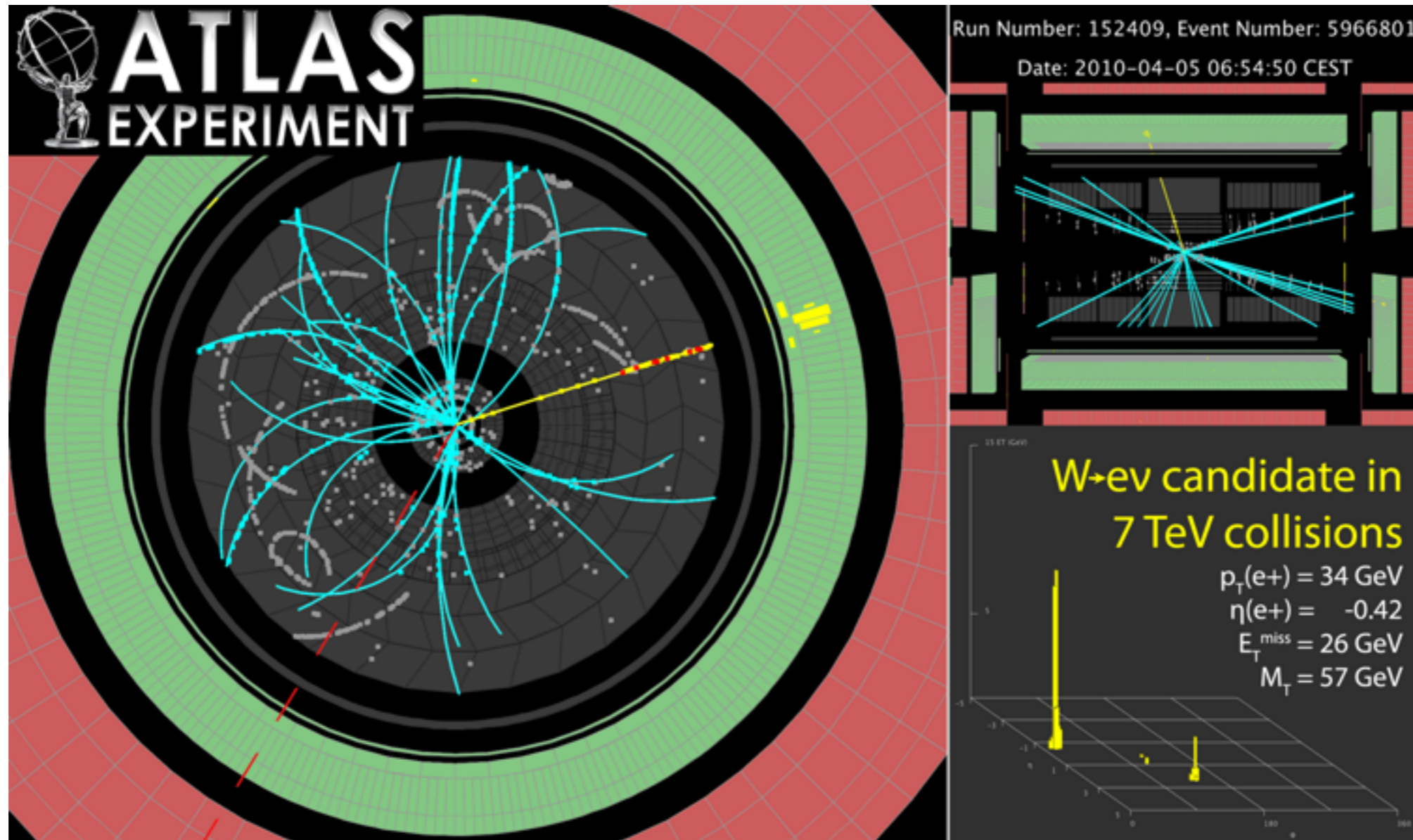


maart 2010:  $E_{CM} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge  $p_T$
- W-bosonen
- gedetailleerde calibraties

We zijn écht begonnen!

# Het begin van fysica-analyse

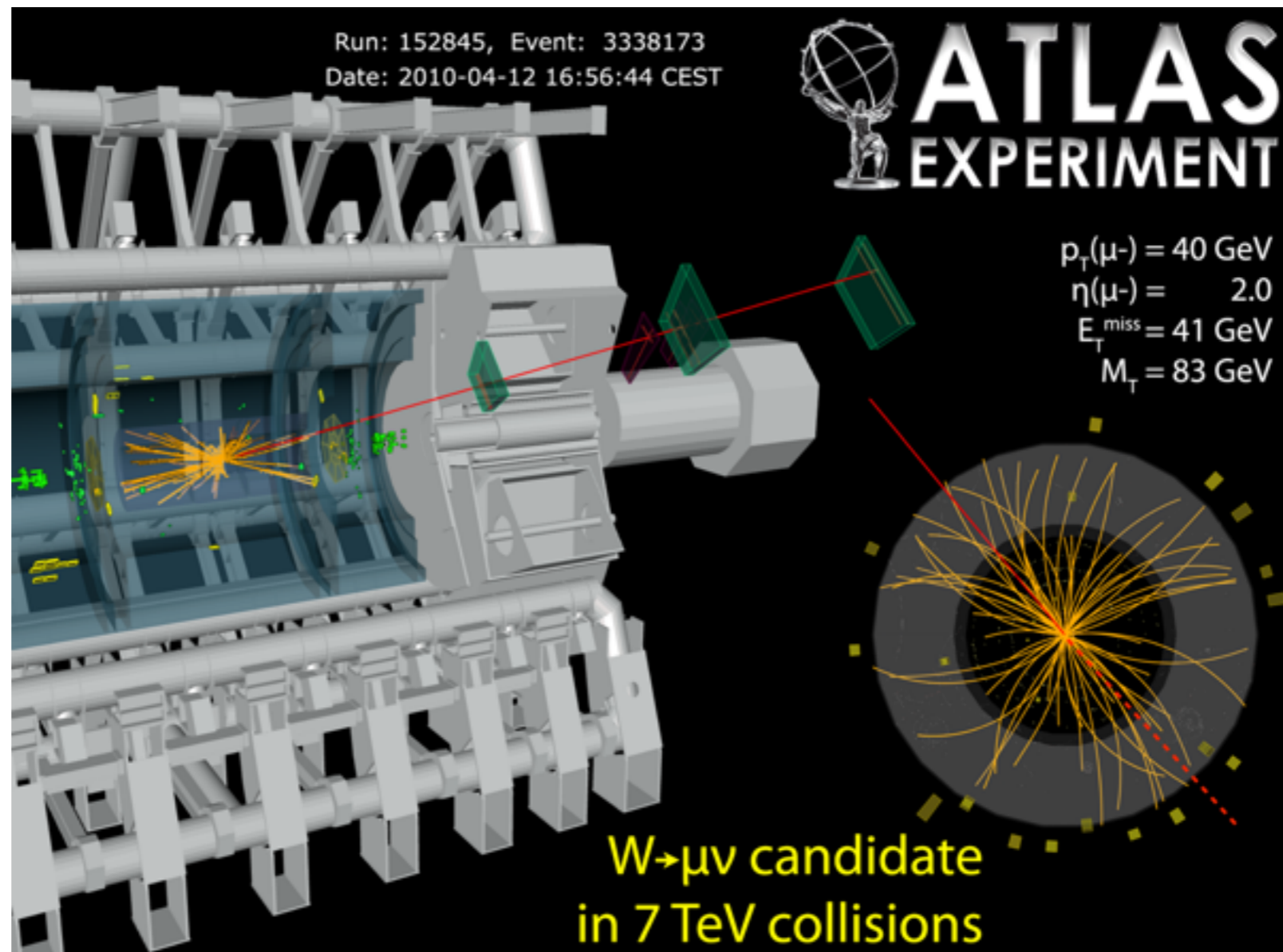


maart 2010:  $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge  $p_T$
- W-bosonen
- gedetailleerde calibraties

**We zijn écht begonnen!**

# Het begin van fysica-analyse

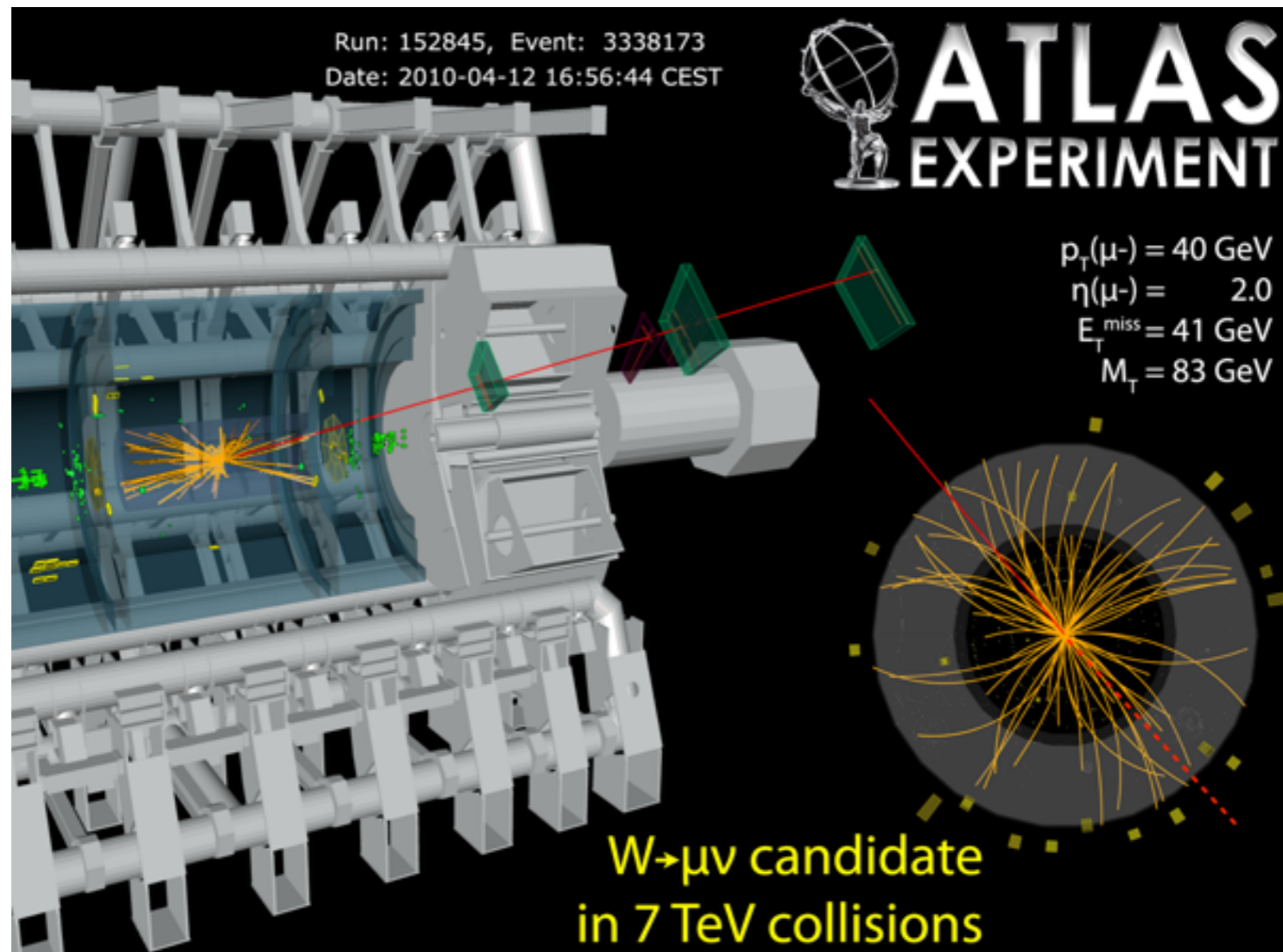


maart 2010:  $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge  $p_T$
- W-bosonen
- gedetailleerde calibraties

**We zijn écht begonnen!**

# Het begin van fysica-analyse



maart 2010:  $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge  $p_T$
- W-bosonen
- gedetailleerde calibraties

**We zijn écht begonnen!**

**Planning:**

- 2010 – 2011:  $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$
- 2012: LHC-“upgrade”
- 2013 – 20xx:  $E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$

# De toekomst



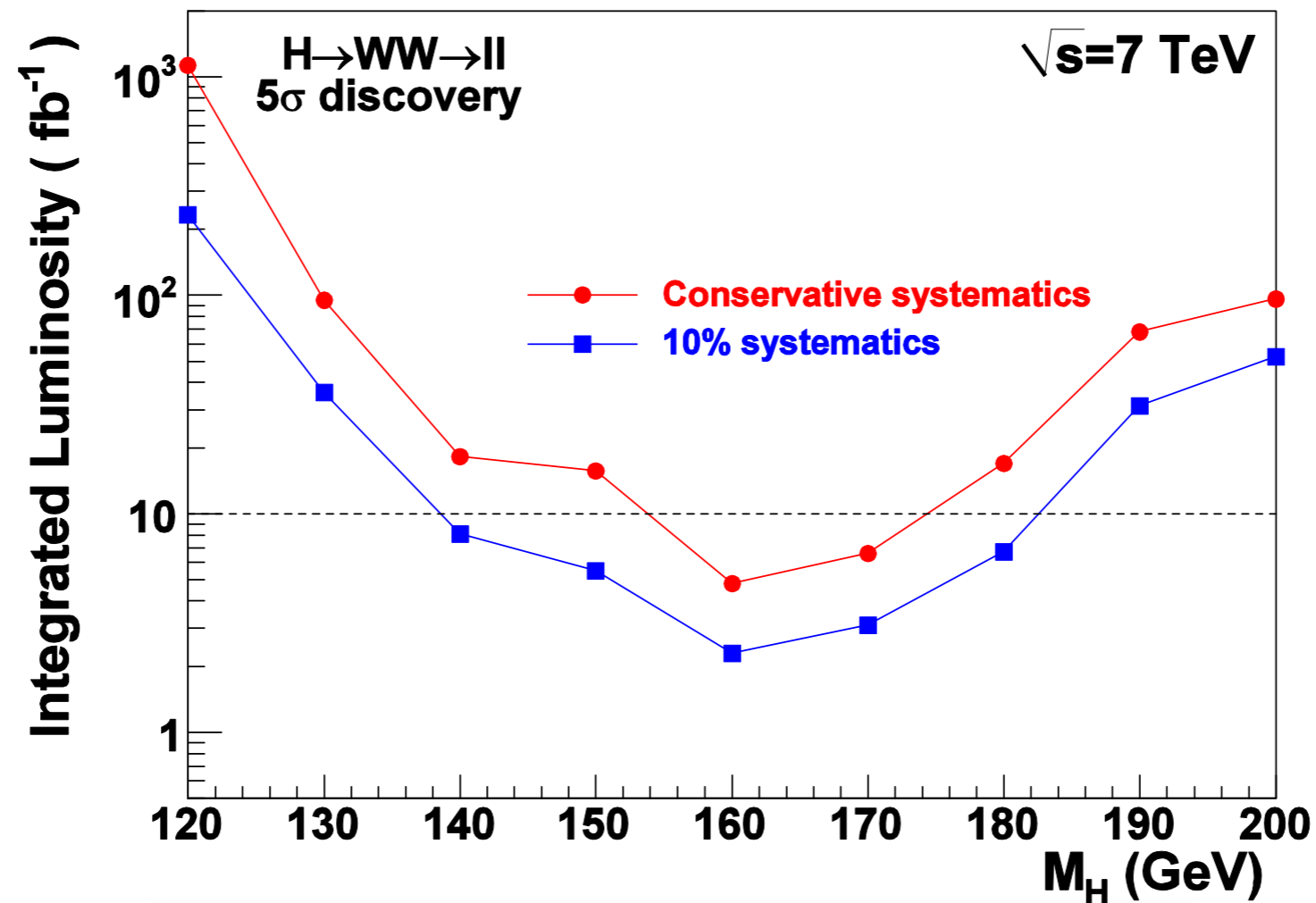
The ghost you're trying to reach is currently unavailable.  
Please leave a message after the beep.



# De toekomst

- De eerste fysica-publicatie is de deur uit
- Op naar vele andere!

LHC sensitivity ( $H \rightarrow WW$  mode)



Zicht op het Higgs-boson in 2011??