

Deeltjesfysica in vogelvlucht

Frank Filthaut

Radboud Universiteit Nijmegen / Nikhef

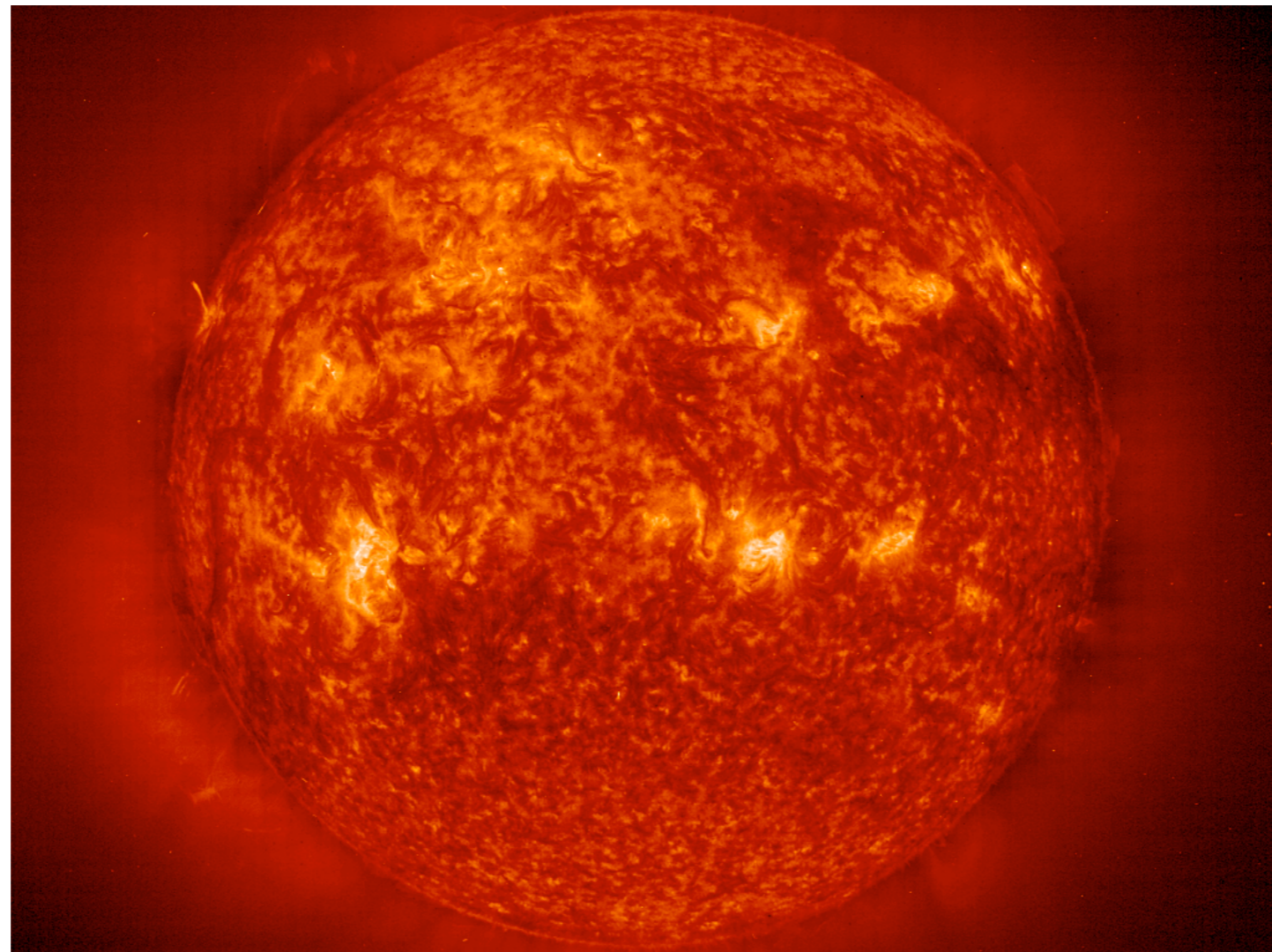
Inhoud:

- Op zoek naar het kleinste
- Deeltjes en interacties: het Standaardmodel
- De Large Hadron Collider

Deel I: Op zoek naar het kleinste

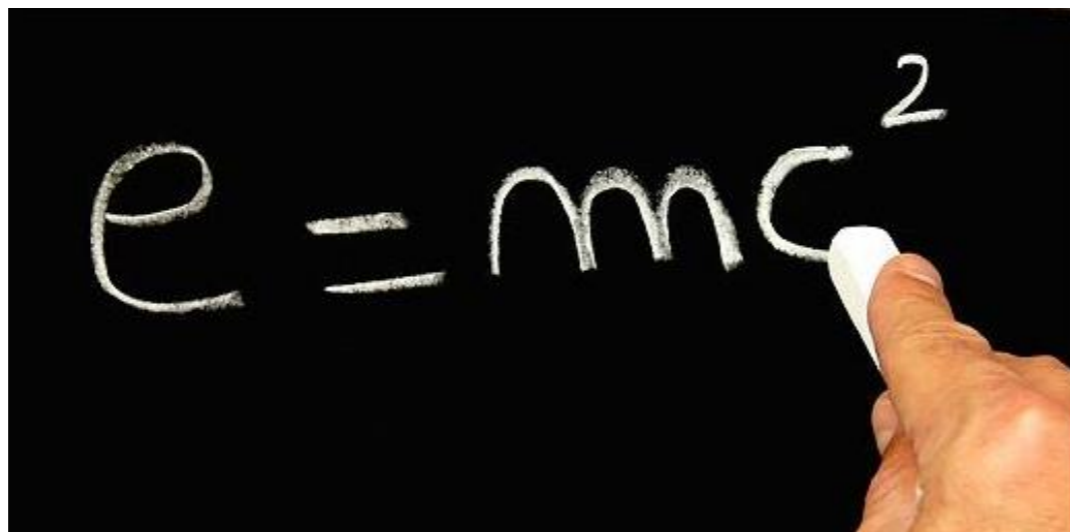
Het einde van de fysica?

- Eind 19^e eeuw: fysica is bijna “af” !?
- op enkele “rafeltjes” na (bijvoorbeeld energiebron zon)



Speciale relativiteitstheorie

- Een golf van nieuwe ontdekkingen!
- **Michelson&Morley**: snelheid van licht in vacuüm is constant
- **Lorentz**: wetten van Maxwell (unificatie beschrijving elektriciteit en magnetisme) niet compatibel met Galilei-transformaties
- **Einstein**: niet alleen electromagnetisme, maar een algemene eigenschap van ruimte en tijd
- “Hoge-energiefysica”: **equivalentie kinetische energie** (lichte, snelle deeltjes) **en massa** (zware, langzame deeltjes)

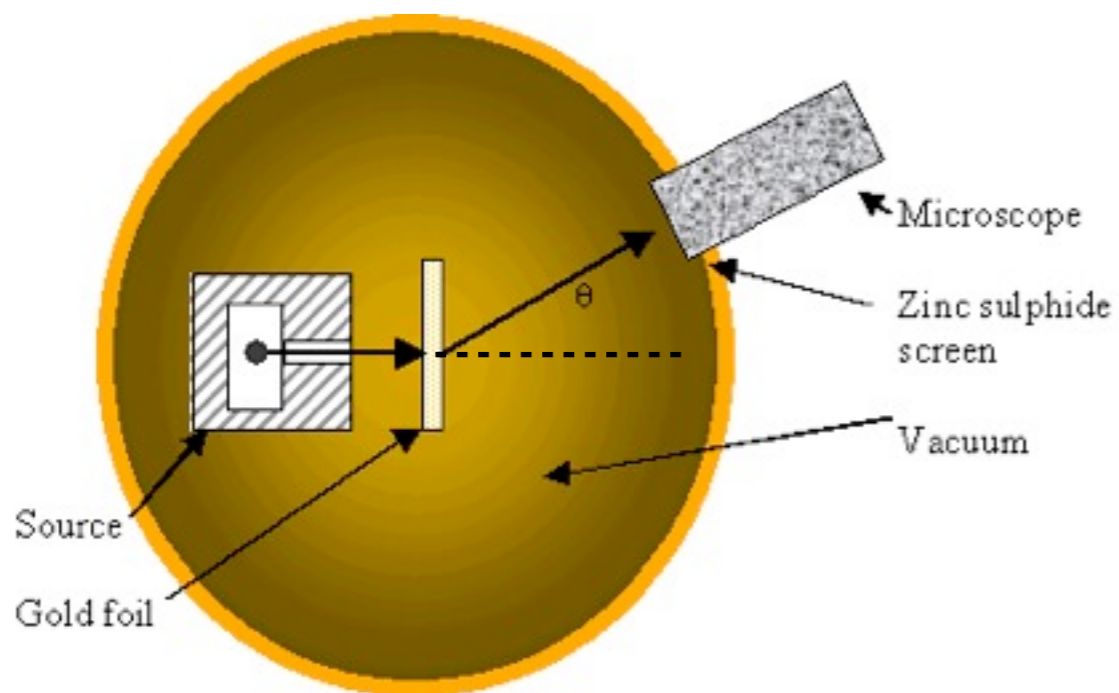
A close-up photograph of a hand holding a piece of white chalk, writing the equation $E = mc^2$ on a blackboard. The chalk is positioned at the end of the 'c' in the exponent, and the number '2' is being written above it.



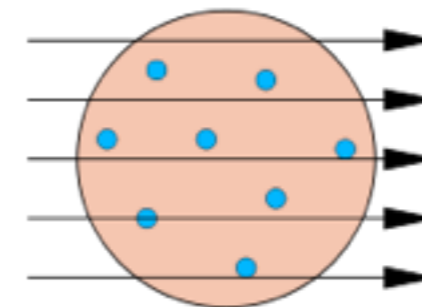
Maar hoe gaat dit in zijn werk?

Het atoom gekraakt

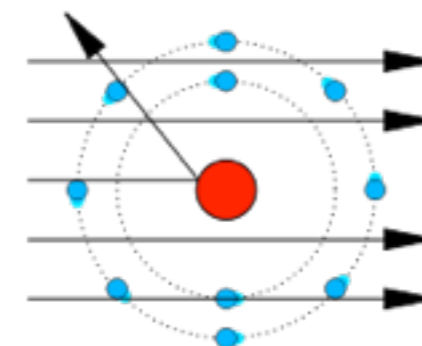
- Idee: “kijk” met deeltjes ipv. “normaal” licht
- Geiger, Marsden, 1909 (werkend voor Rutherford): verstrooiing α -deeltjes (${}^4\text{He}$ -kernen, $E_\alpha \approx 3 \text{ MeV}$) aan een goudfolie



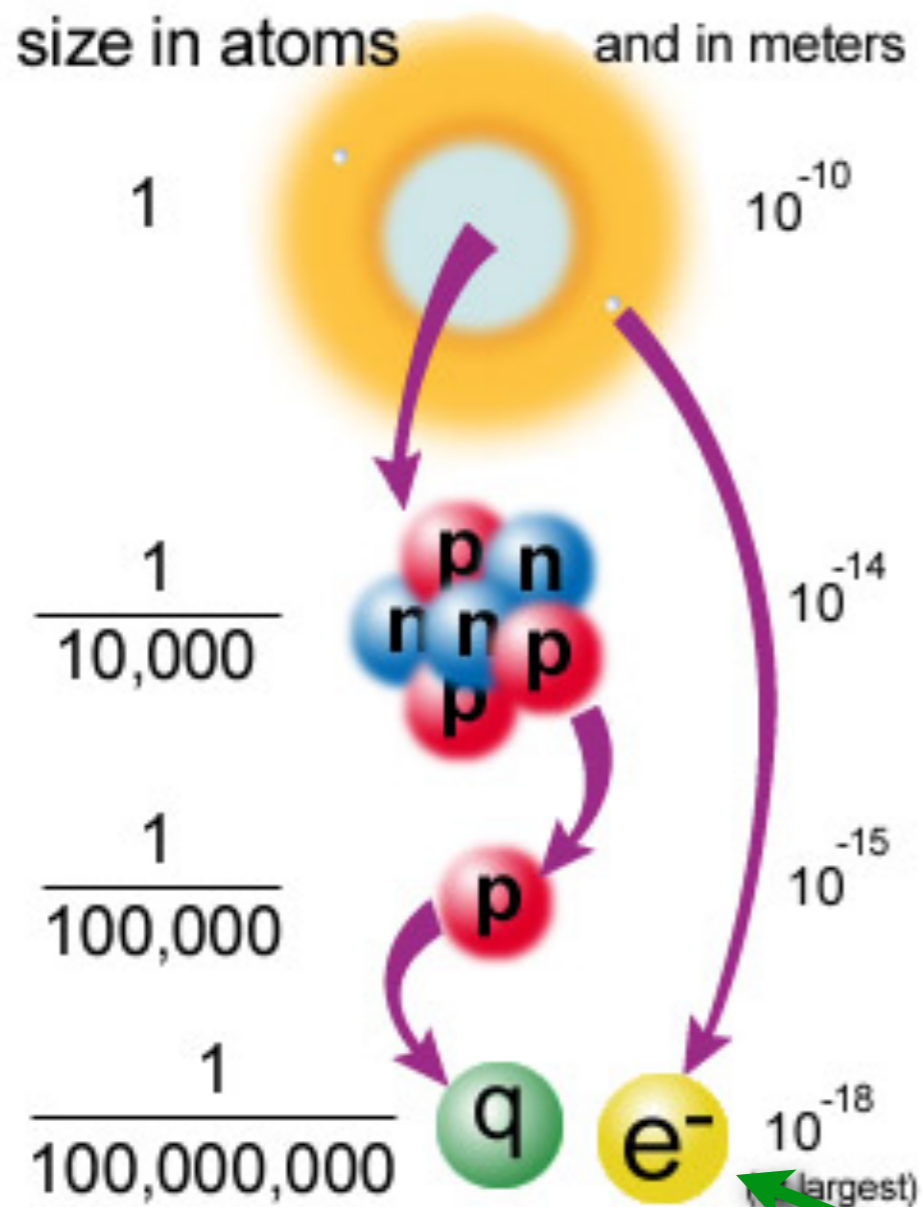
diffuse
ladingsverdeling
(Thomson)



ladingsverdeling
met kern
(Rutherford)



Structuur van het proton



Herhaling van Rutherford's α -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!

$E_e \approx 20 \text{ GeV}$: afstanden die "bekeken" kunnen worden zijn $\sim 1/E$

Deel II: Deeltjes en interacties: het Standaardmodel

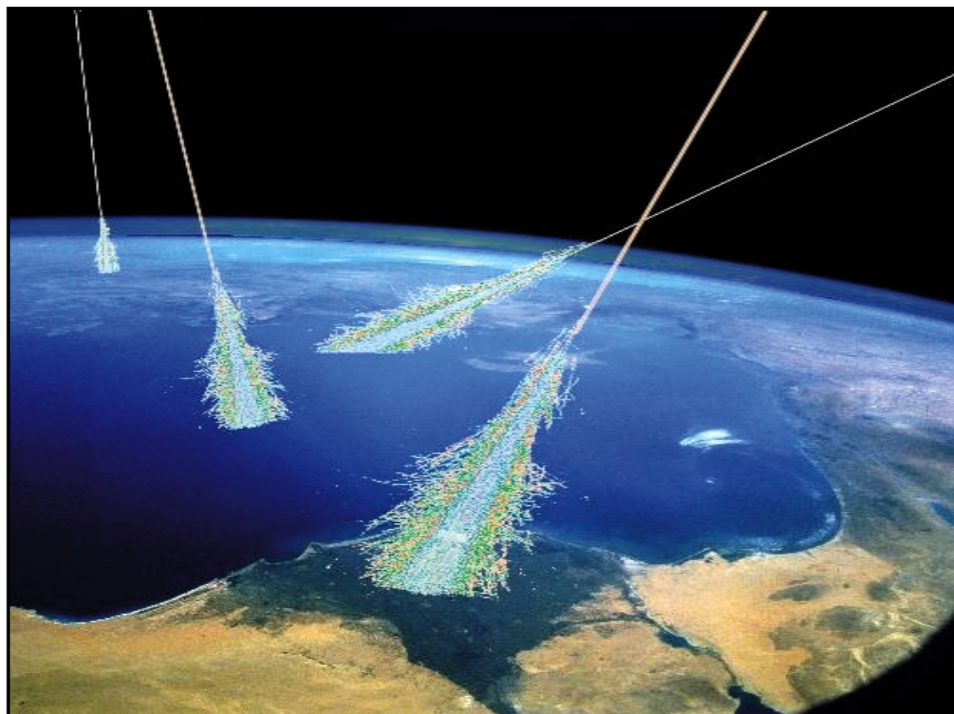
Quantum-Electrodynamica

- 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



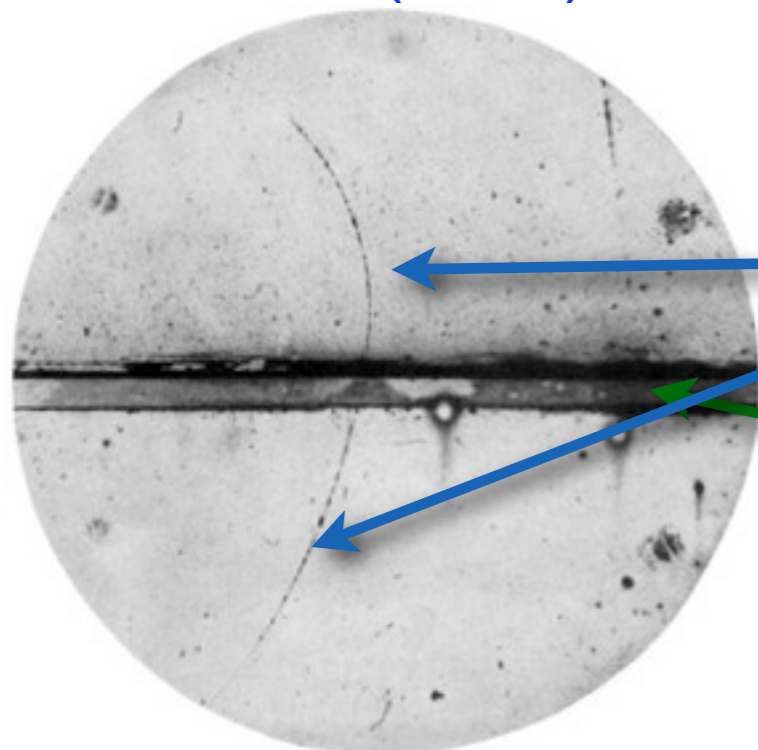
Quantum-Electrodynamica

- 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

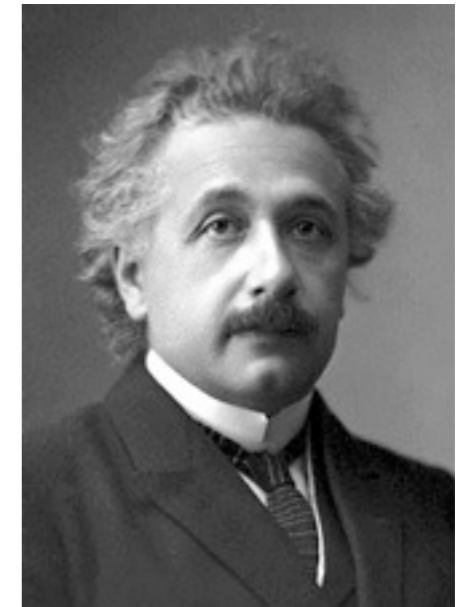
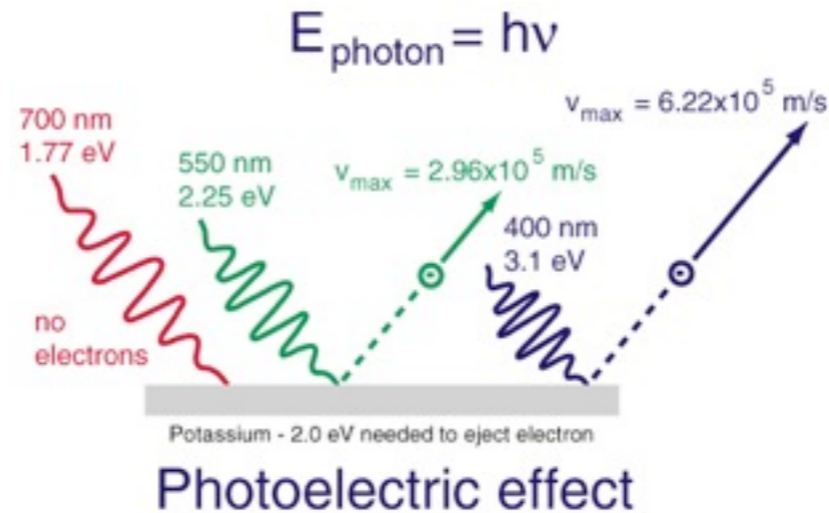


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_p=2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p=7.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

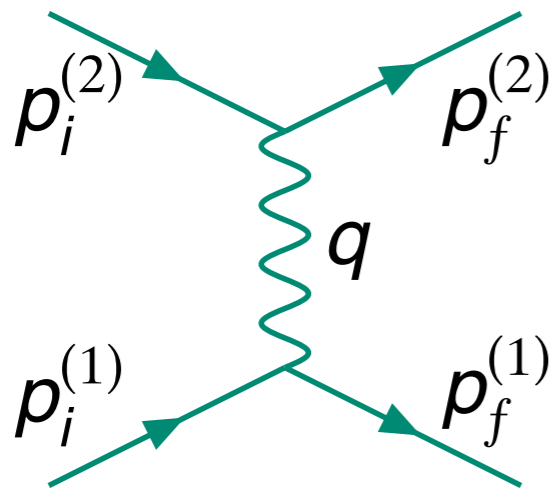
Quantum-Electrodynamica

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

relatie met kinematica e^-



- EM interactie dmv uitwisselen van fotonen

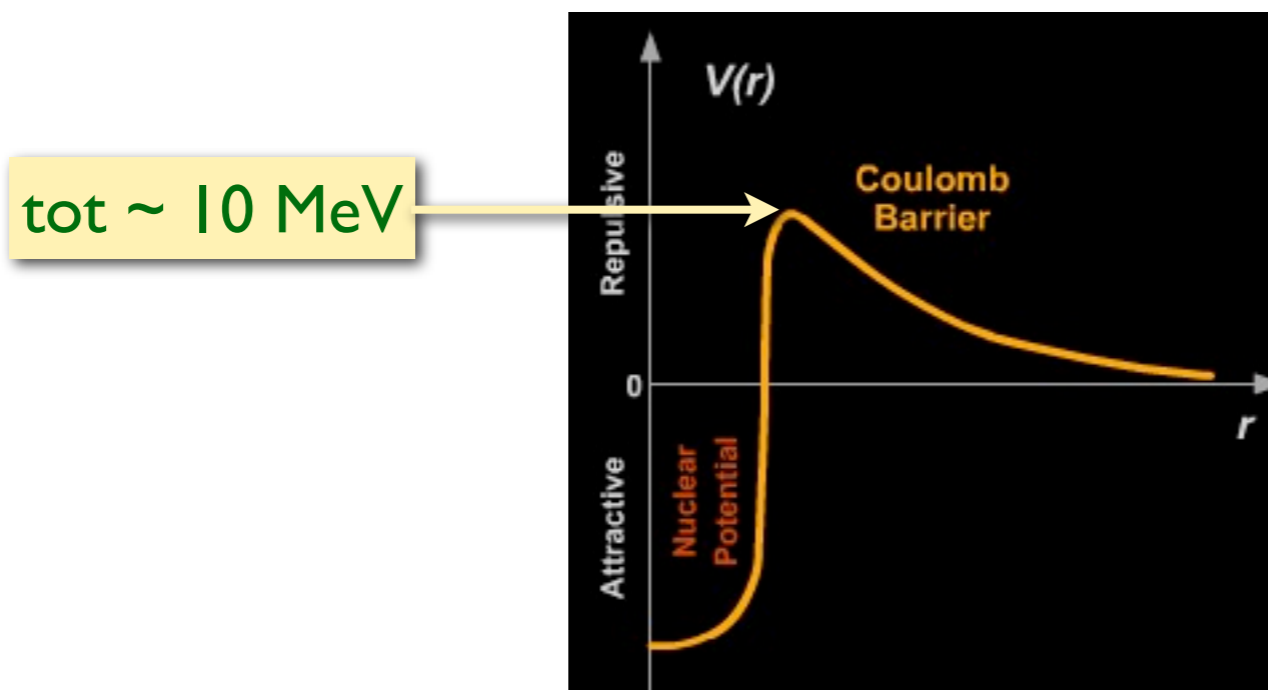
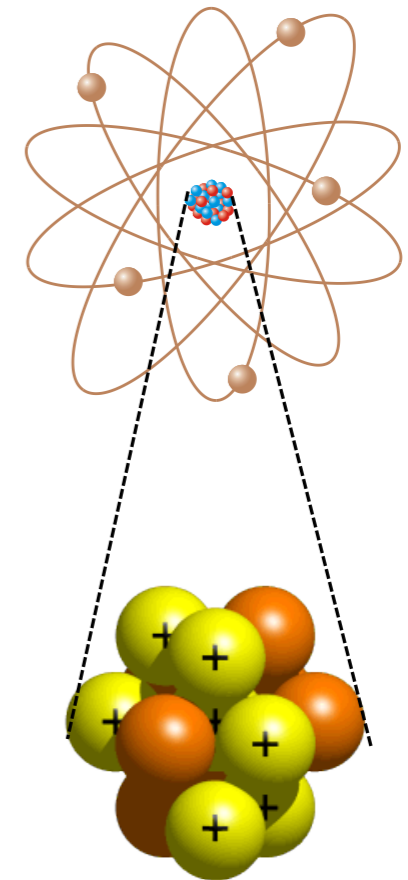


Grafische representatie:
Feynman-diagrammen
(intuïtieve manier van het
berekenen van QM
overgangsamplitudes)



Wat houdt atoomkernen bijeen?

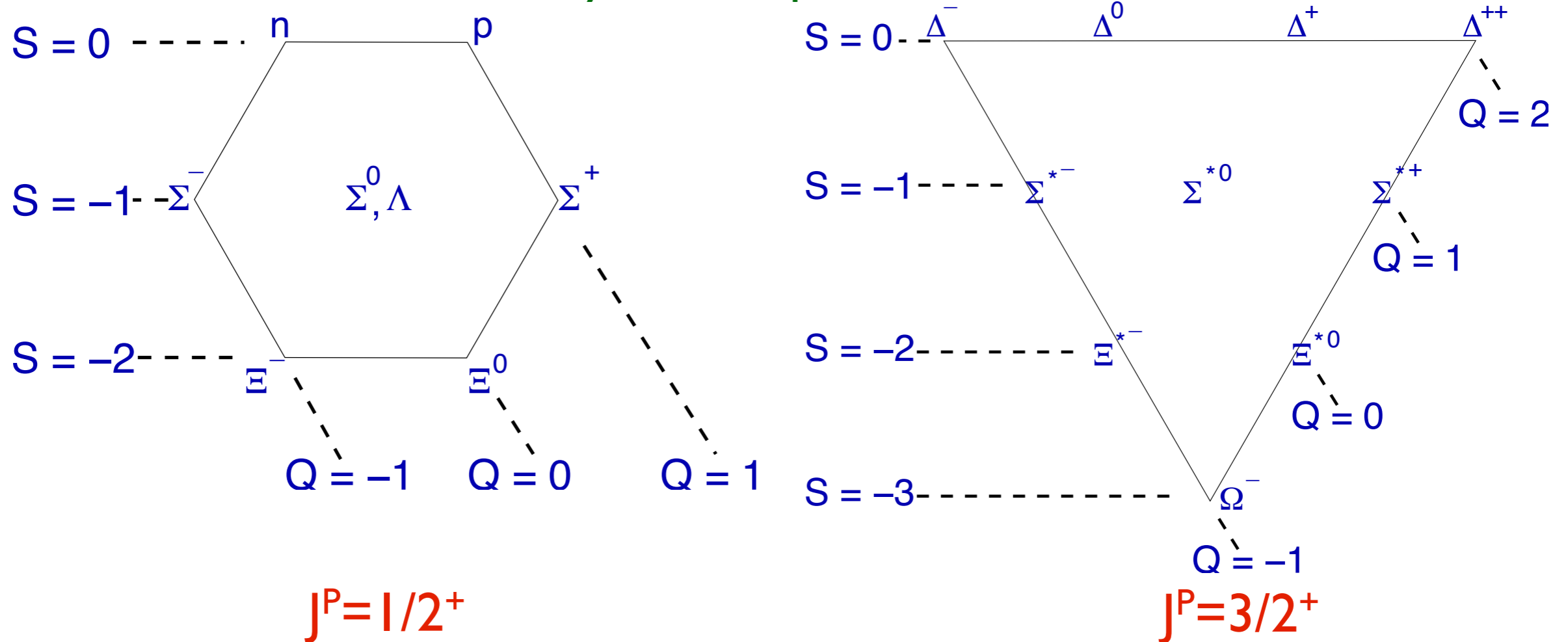
- Sterke wisselwerking:
- sterk genoeg om **Coulomb-afstoting** te overwinnen
- maar alleen merkbaar op kleine afstand?



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^{-25} s)

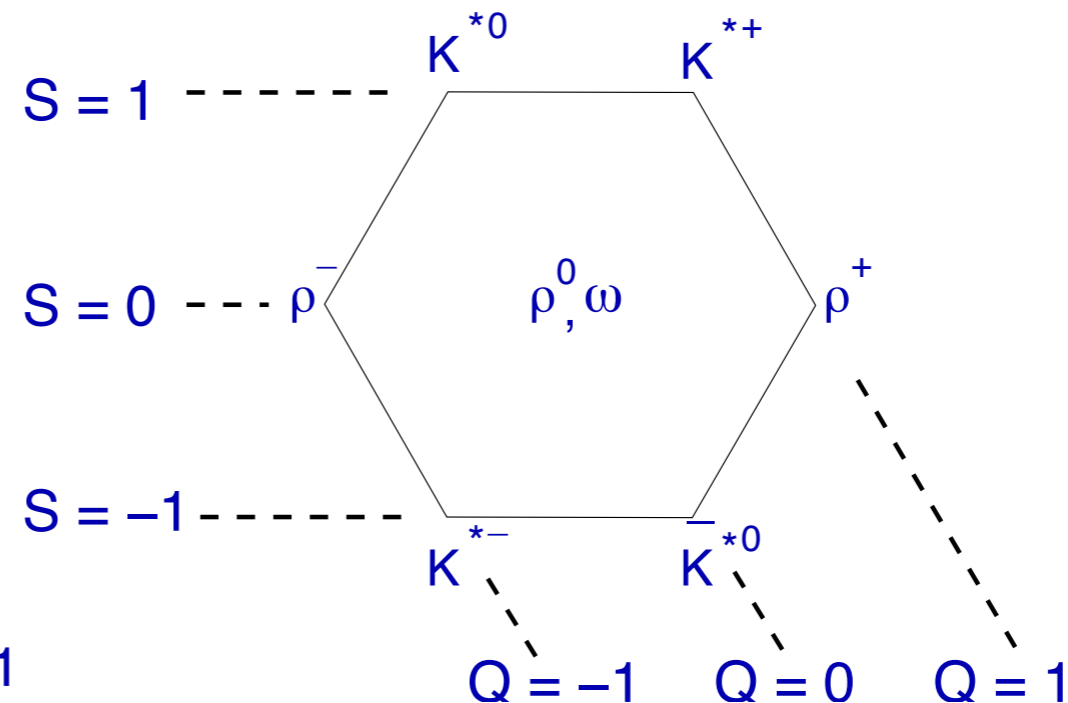
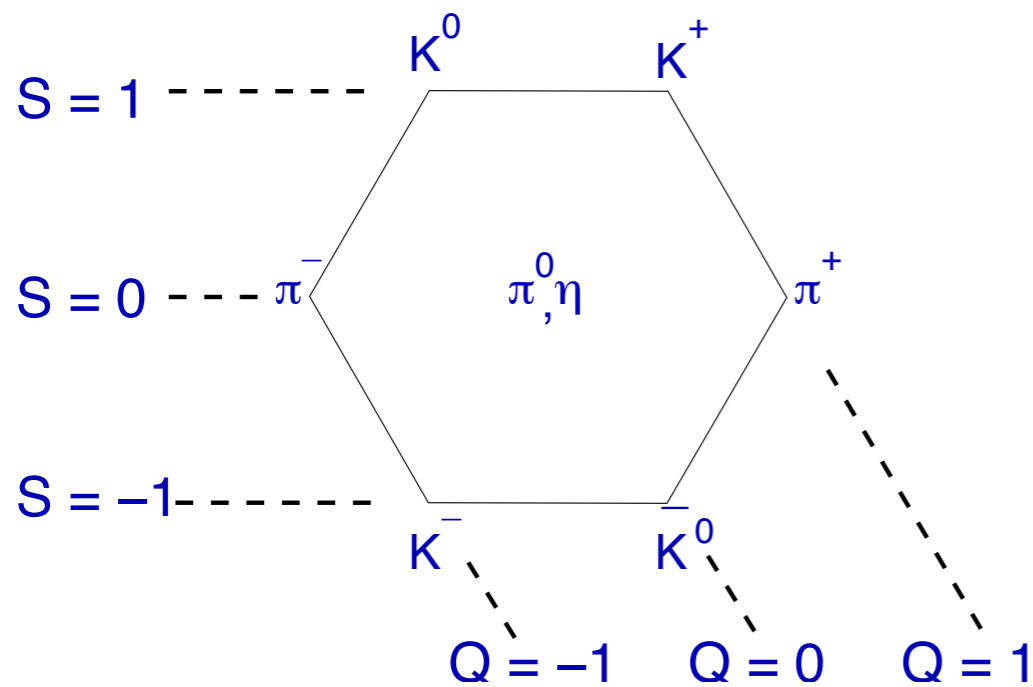
Hadronen

- 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 ($10^{-25}s$)

Hadronen

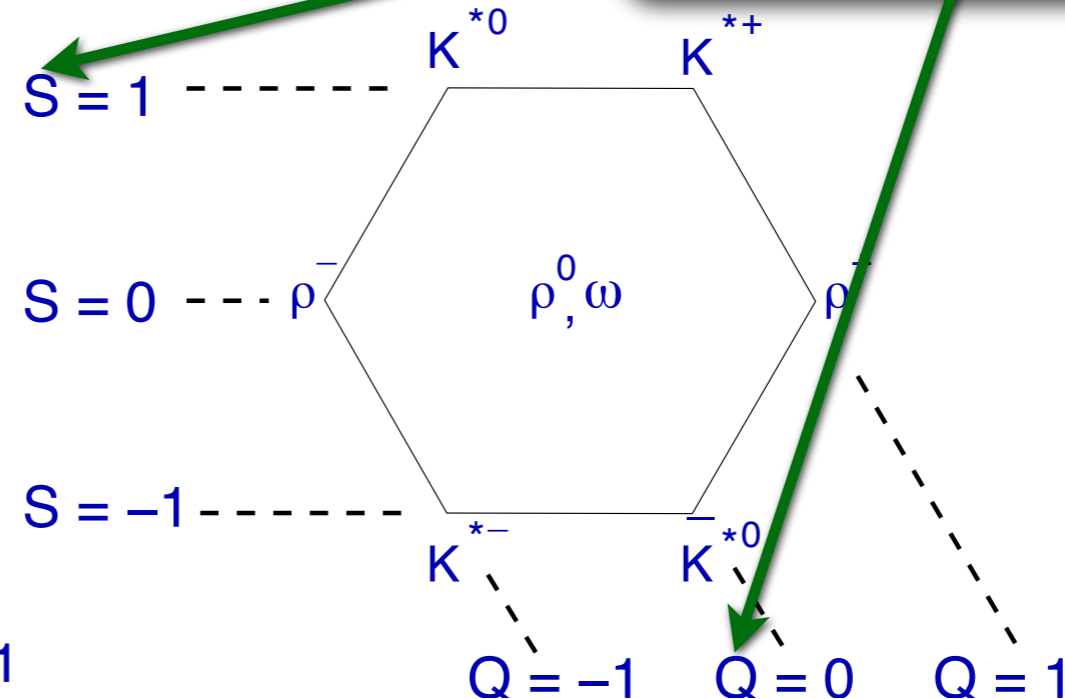
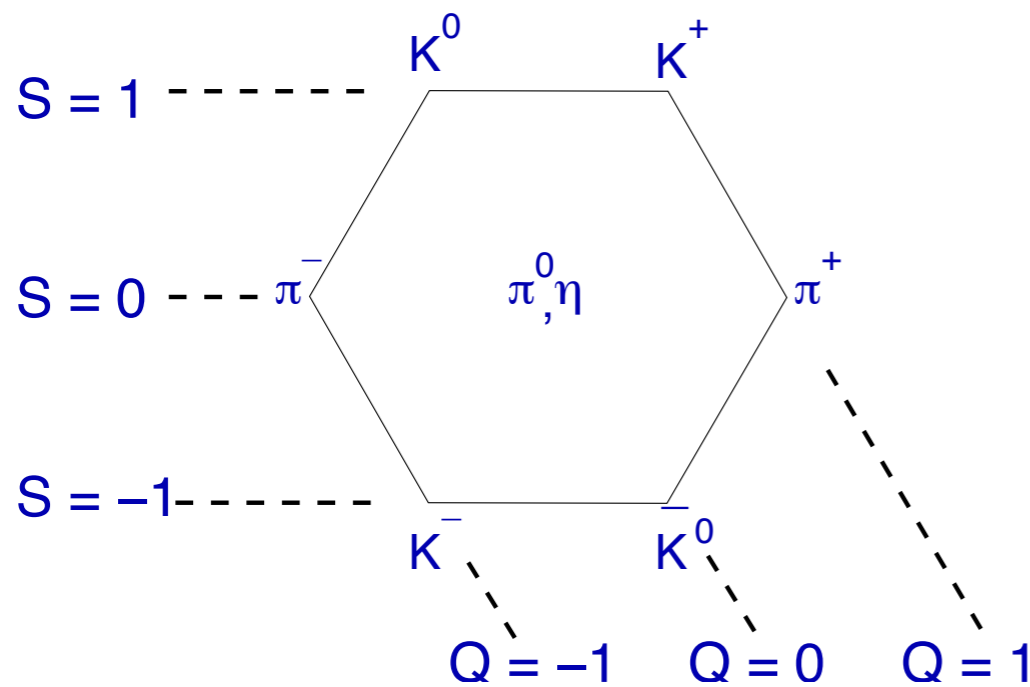
- Meer dan alleen protonen en neutronen!

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 ($10^{-25}s$)

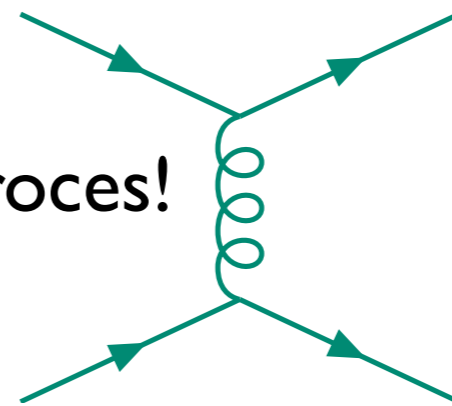
Sterke wisselwerking

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

- interactie tussen quarks dmv uitwisselen gluonen $q \rightarrow$

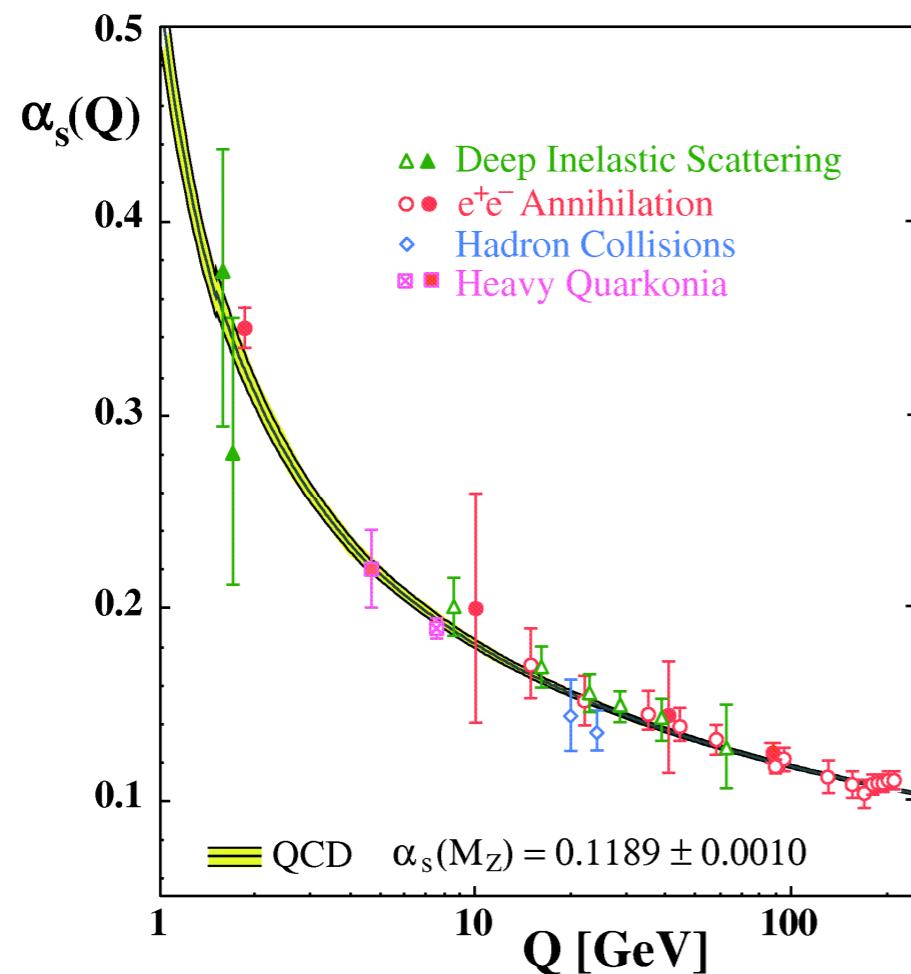
$$\begin{pmatrix} q_r \\ q_g \\ q_b \end{pmatrix}$$

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



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

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



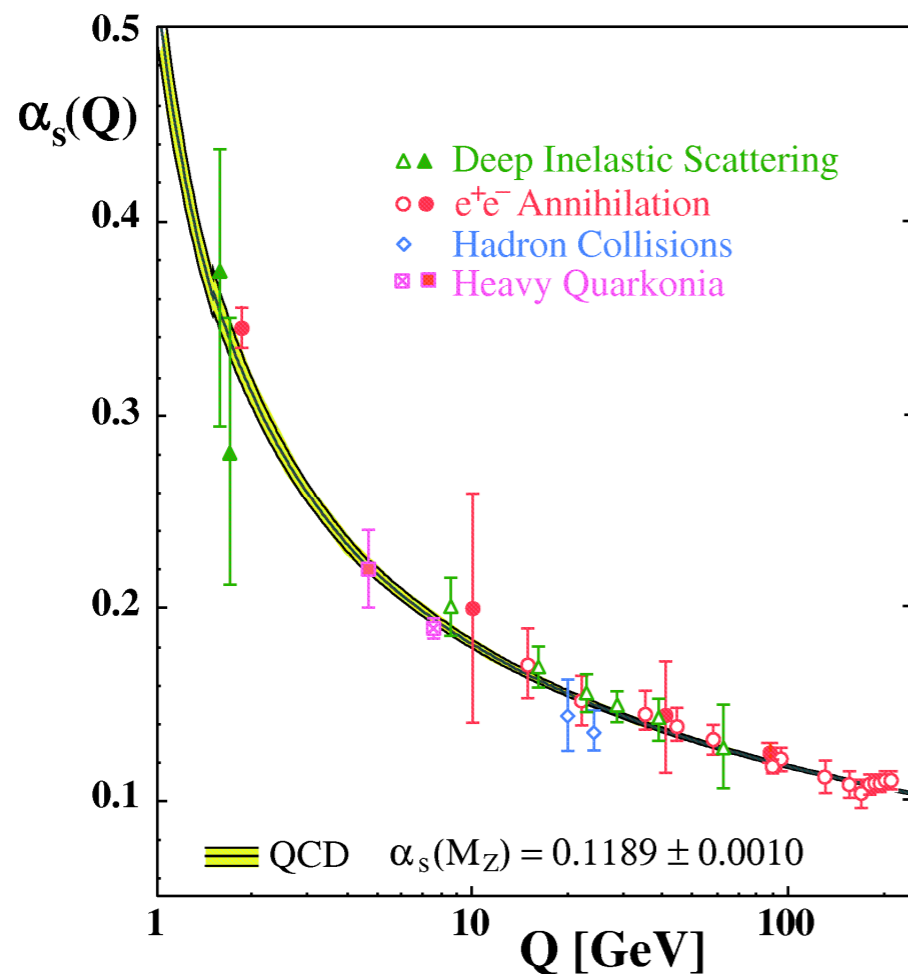
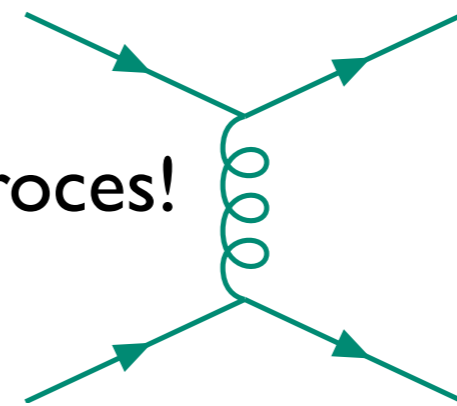
Sterke wisselwerking

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

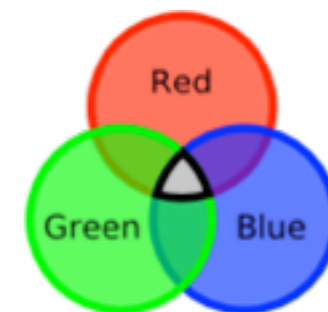
- interactie tussen quarks dmv uitwisselen gluonen

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

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



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



Quarks opgesloten bij lage energie

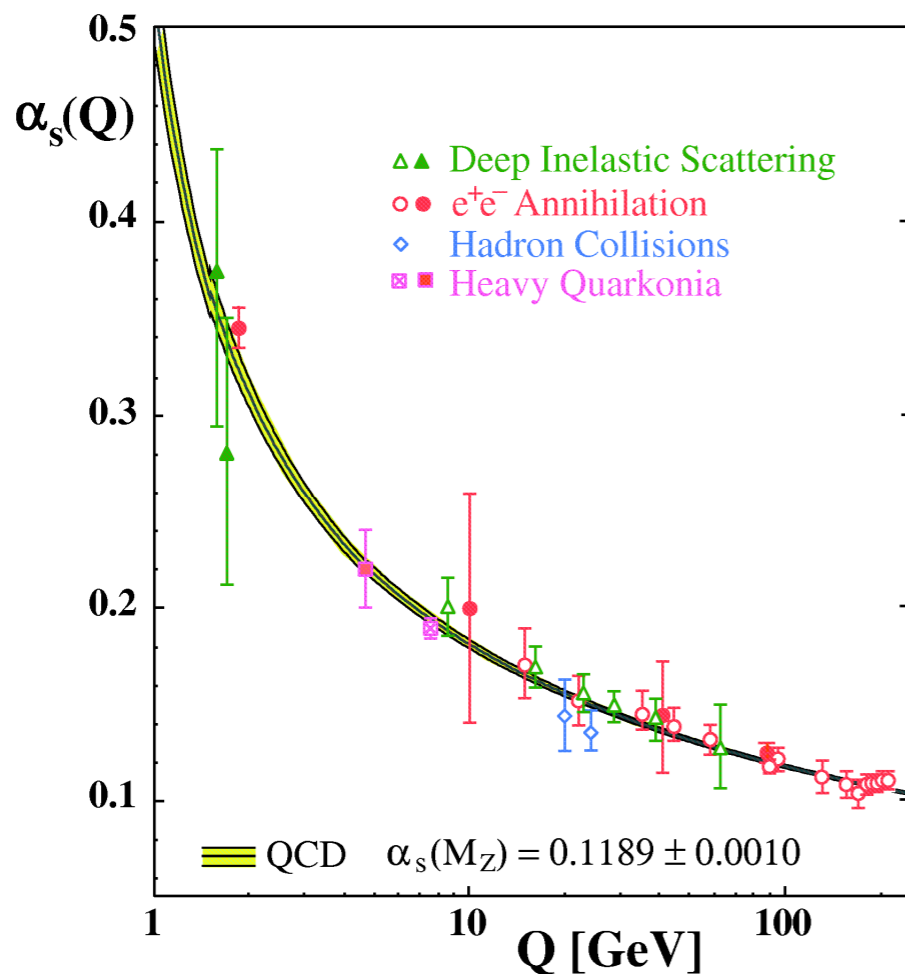
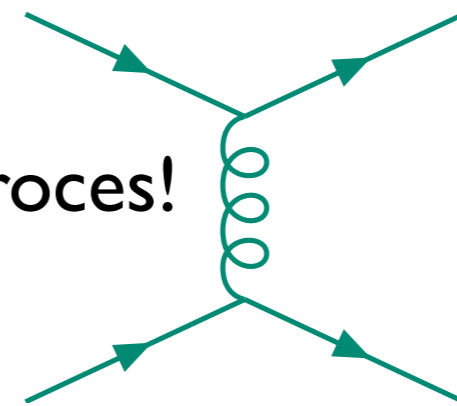
Sterke wisselwerking

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

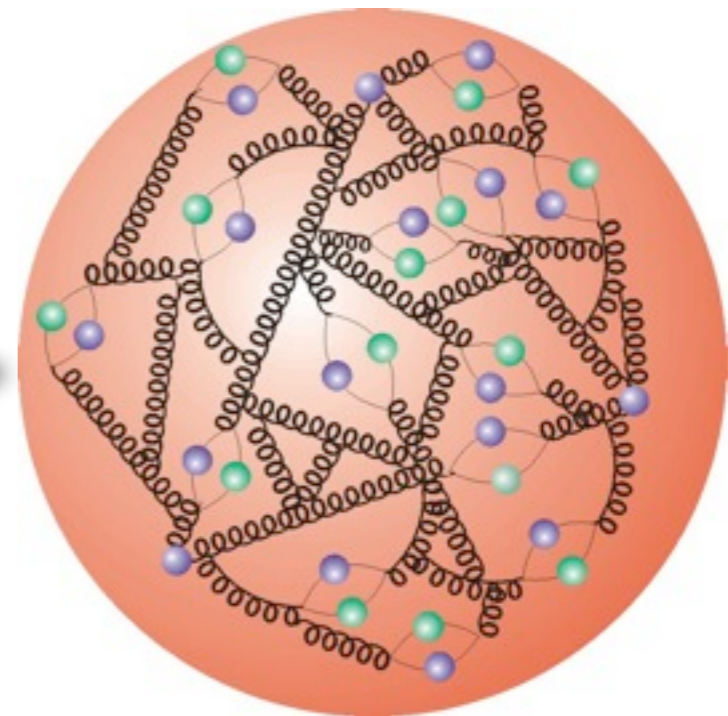
- interactie tussen quarks dmv uitwisselen gluonen

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

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



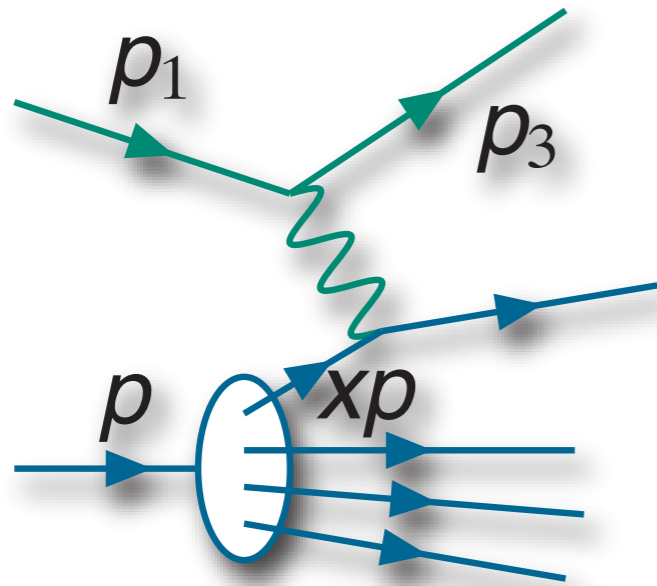
$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$$



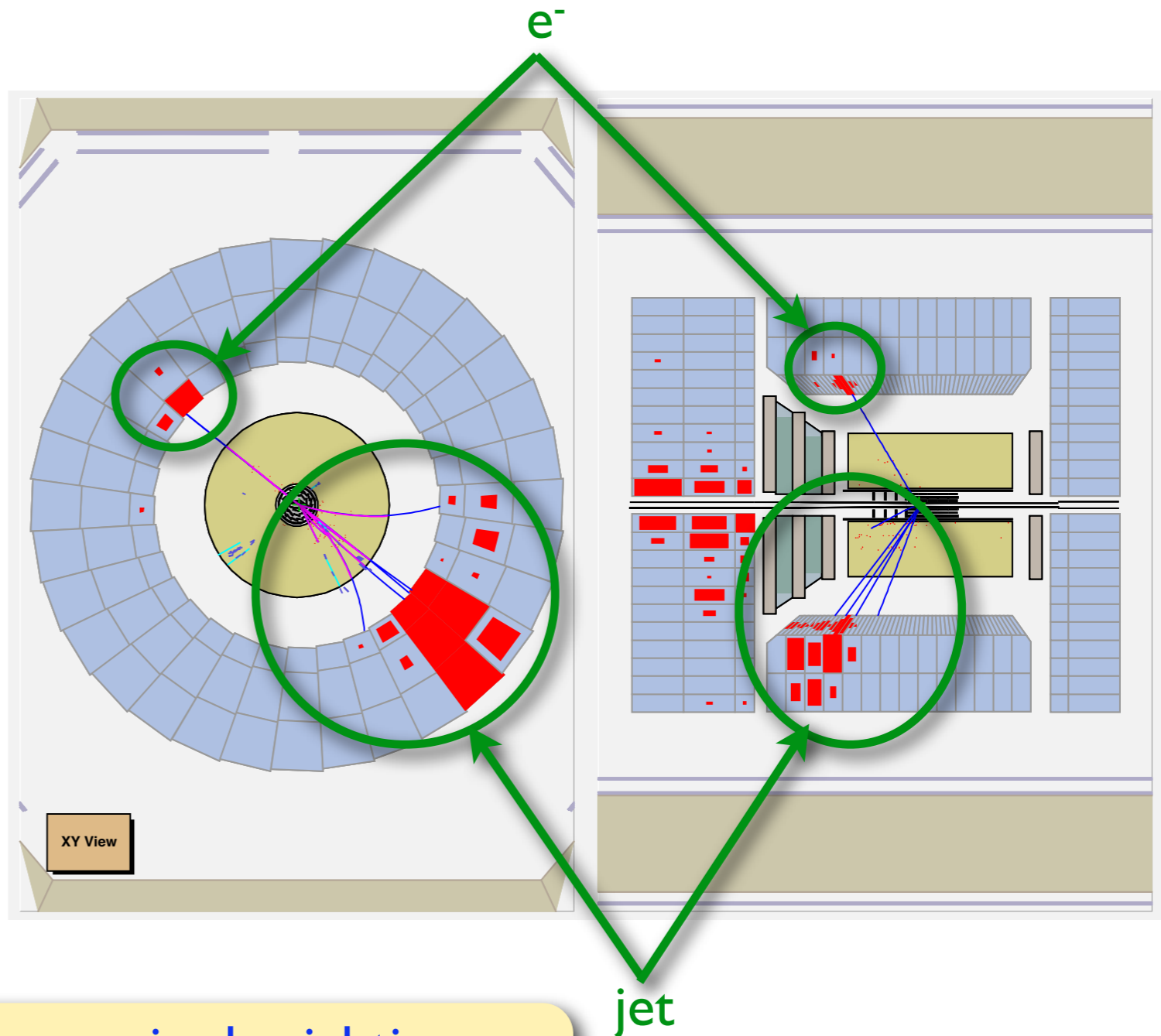
Quarks opgesloten bij lage energie

QCD bij hoge energie

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



electron-proton verstrooiing:
27.5 GeV + 920 GeV

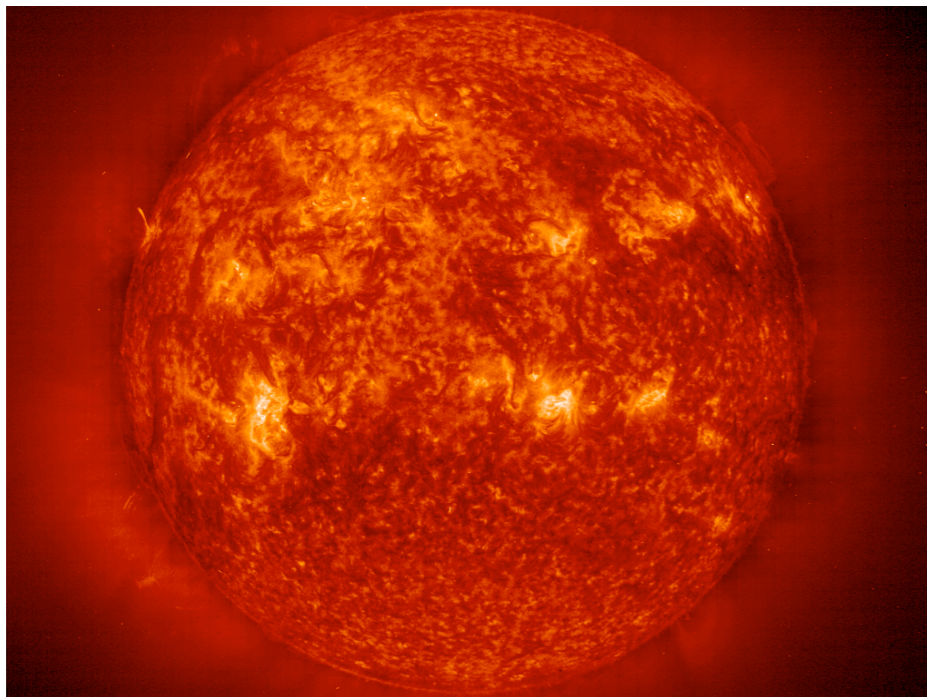


jet: vele hadronen in de richting van
het oorspronkelijke quark/gluon)

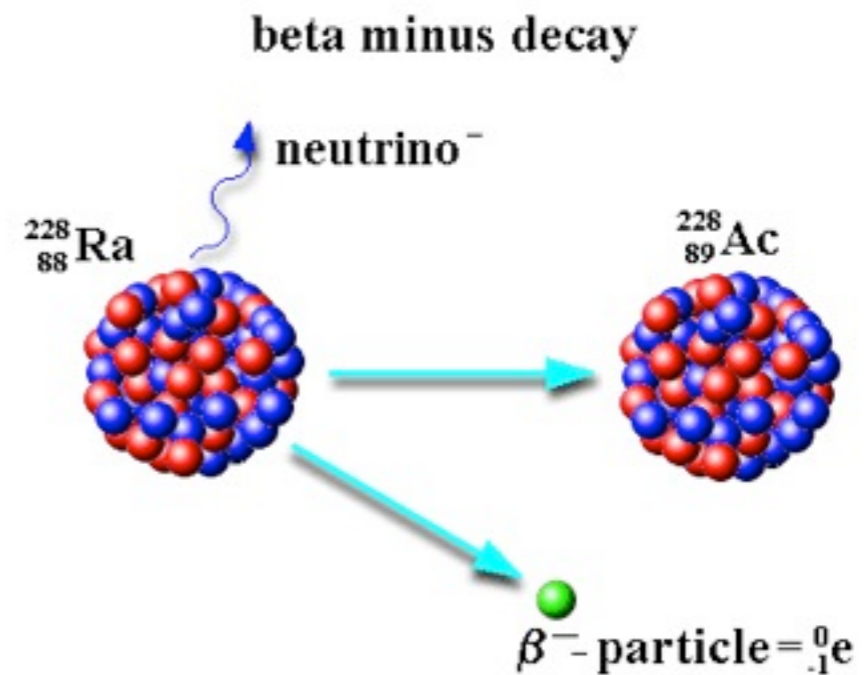
De zwakke wisselwerking

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

fusie

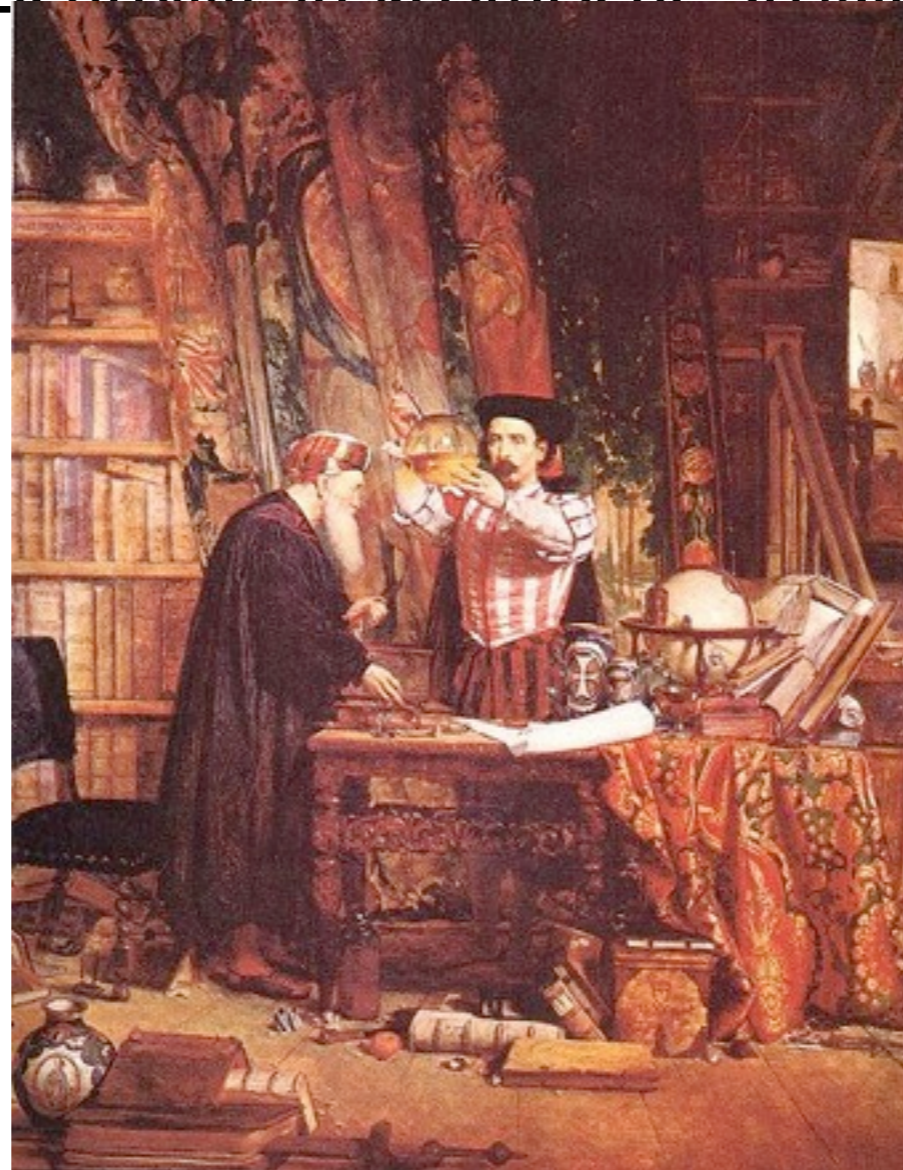


radioactiviteit (β -verval)



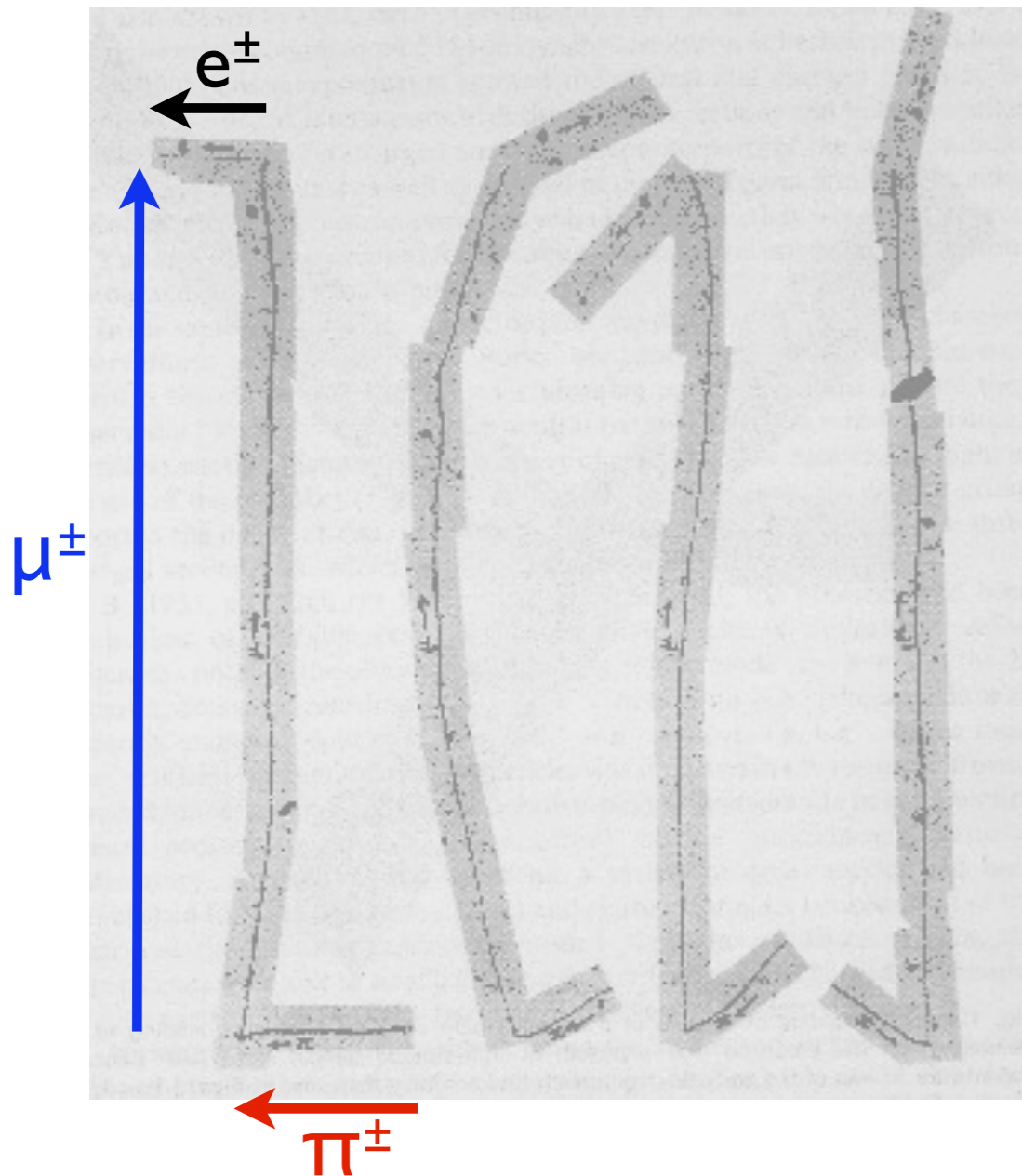
De zwakke wisselwerking

- 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

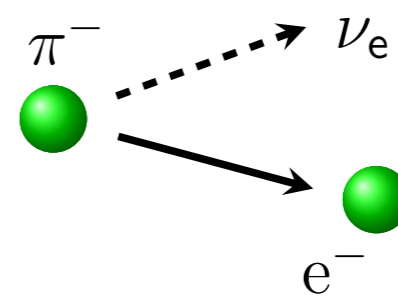
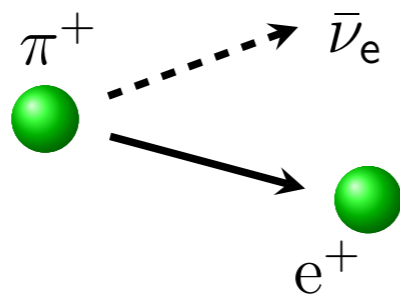
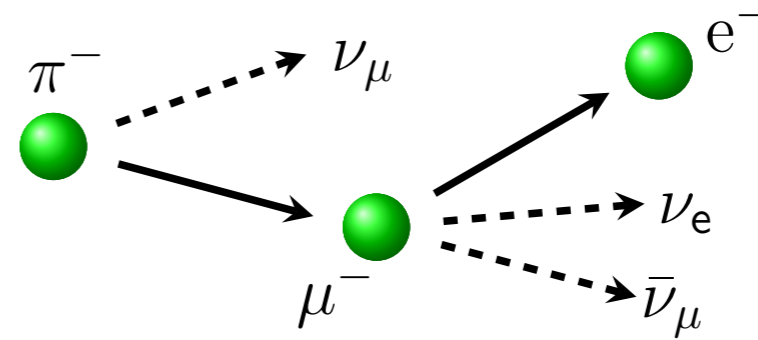
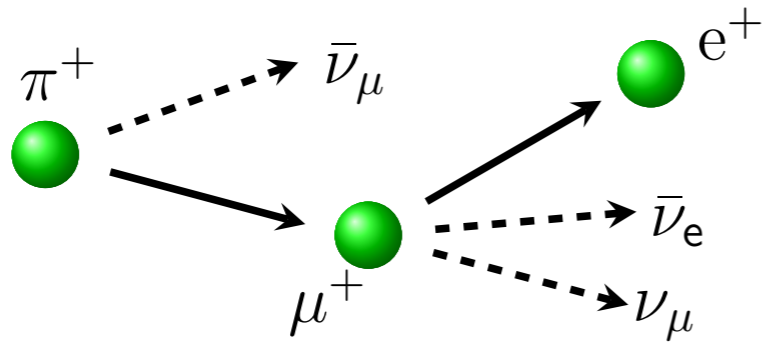


emulsie (fotografische plaat):
energieverlies van geladen deeltjes
▣▶ stop, verval



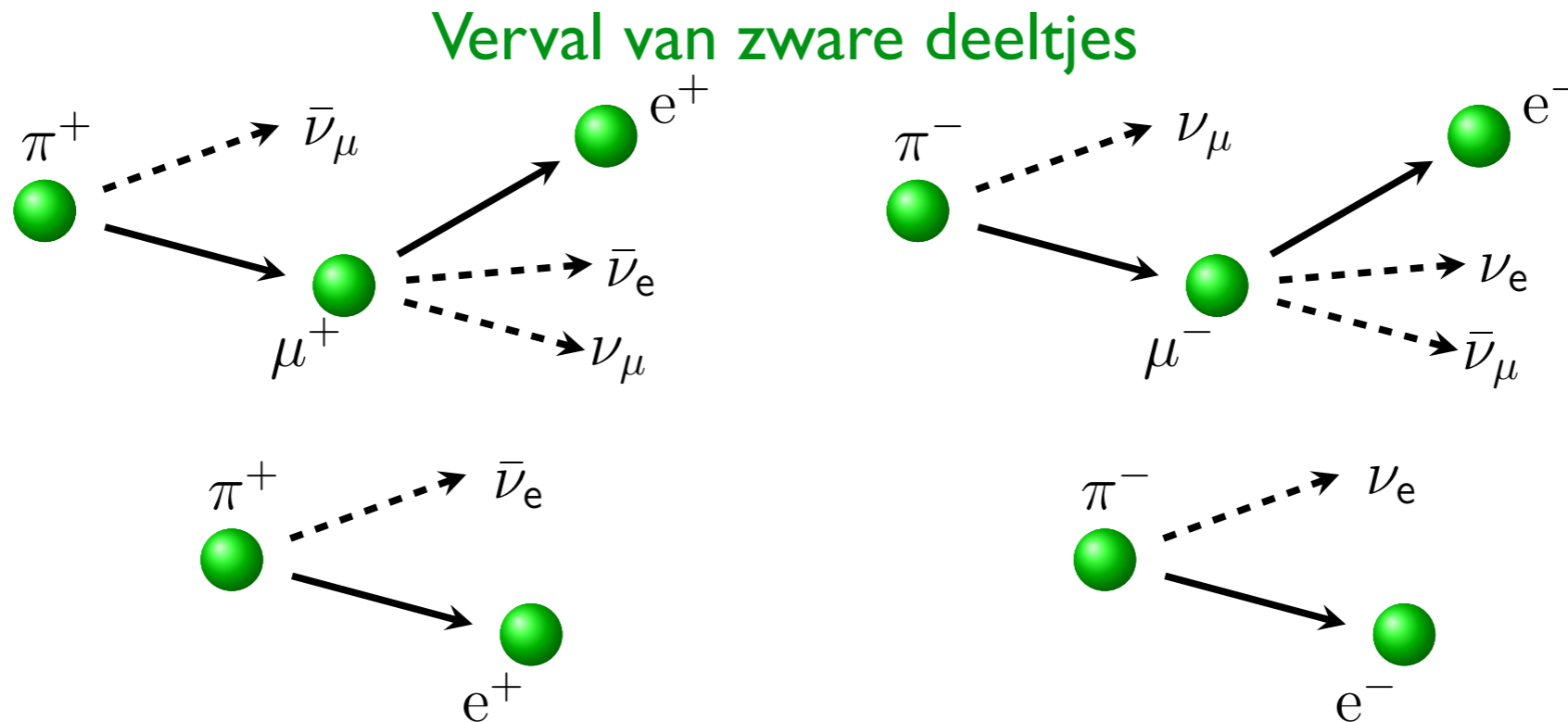
De zwakke wisselwerking (2)

Verval van zware deeltjes





De zwakke wisselwerking (2)



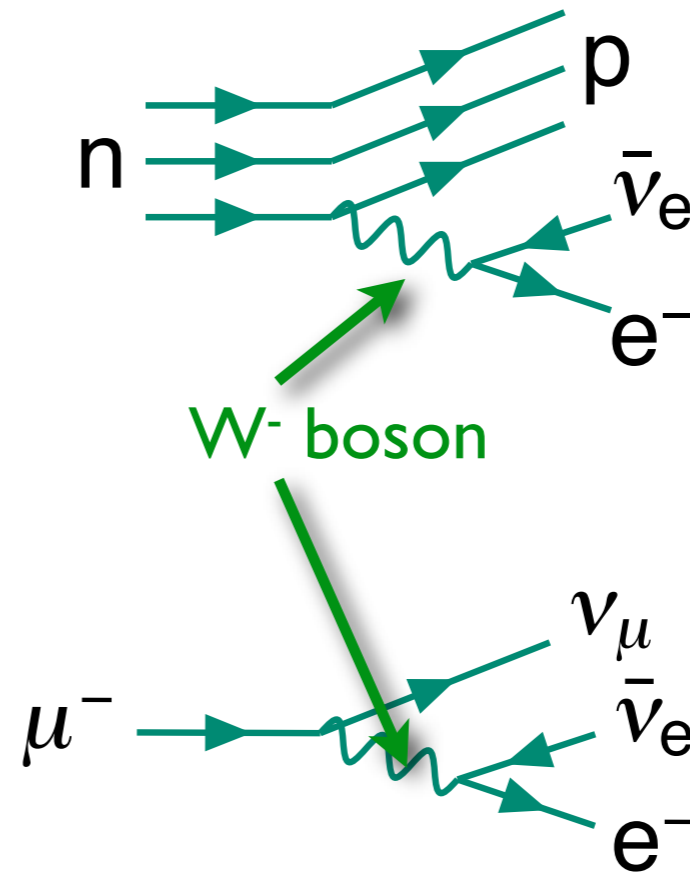
- De zwakke wisselwerking is écht zwak!
 - **ν -flux** van de zon op aarde: $\sim 6 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - in een mensenleven zullen **ten hoogste enkele ν** met je lichaam interageren!

Waarom zo zwak?

- Uitwisselen van **zware** deeltjes!

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

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

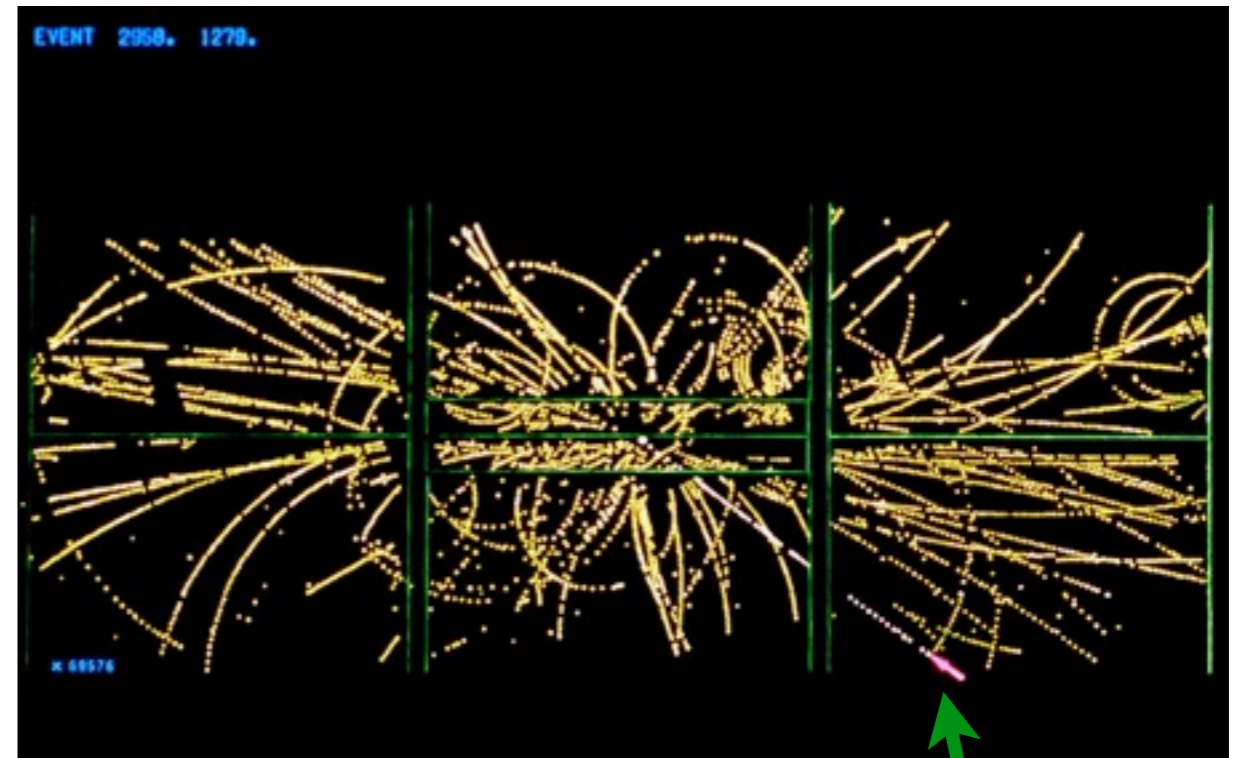
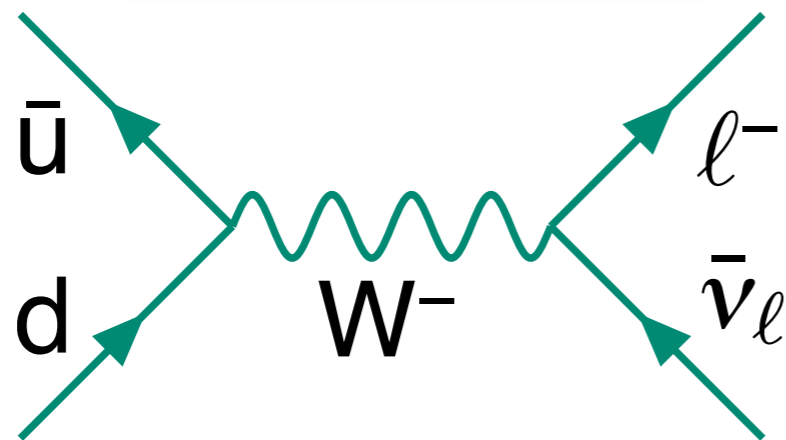


Botsingen tussen protonen worden gedomineerd door de sterke wisselwerking \Rightarrow zoek naar **leptonen** (alleen EM en zwakke wisselwerking)

Waarom zo zwak?

- Uitwisselen van **zware** deeltjes!

W-boson productie
(en verval)

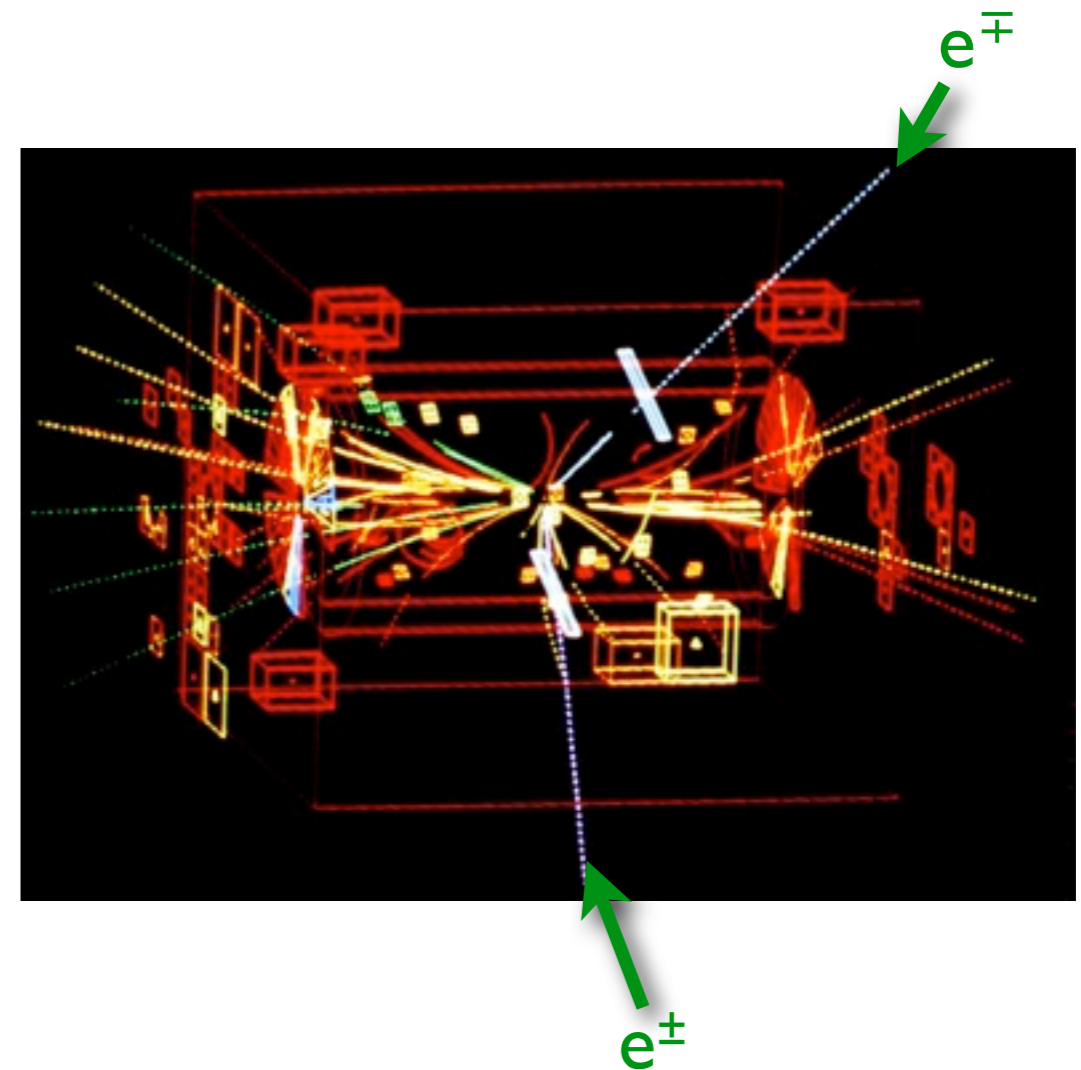
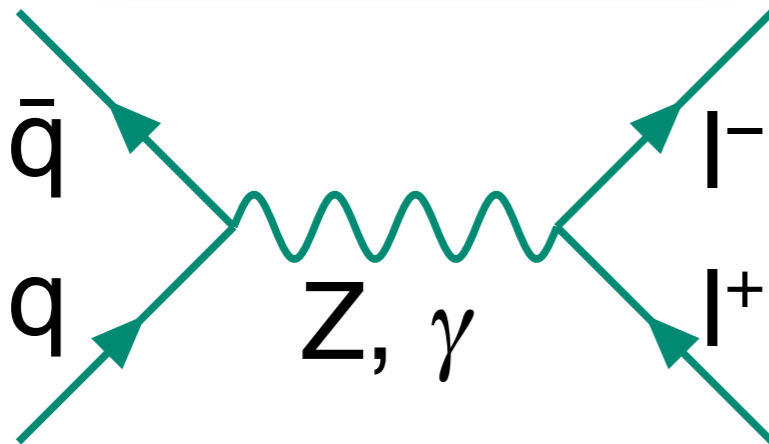


Botsingen tussen protonen worden gedomineerd door de sterke wisselwerking \Rightarrow zoek naar **leptonen** (alleen EM en zwakke wisselwerking)

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, $E_{\text{CM}} = 630 \text{ GeV}$

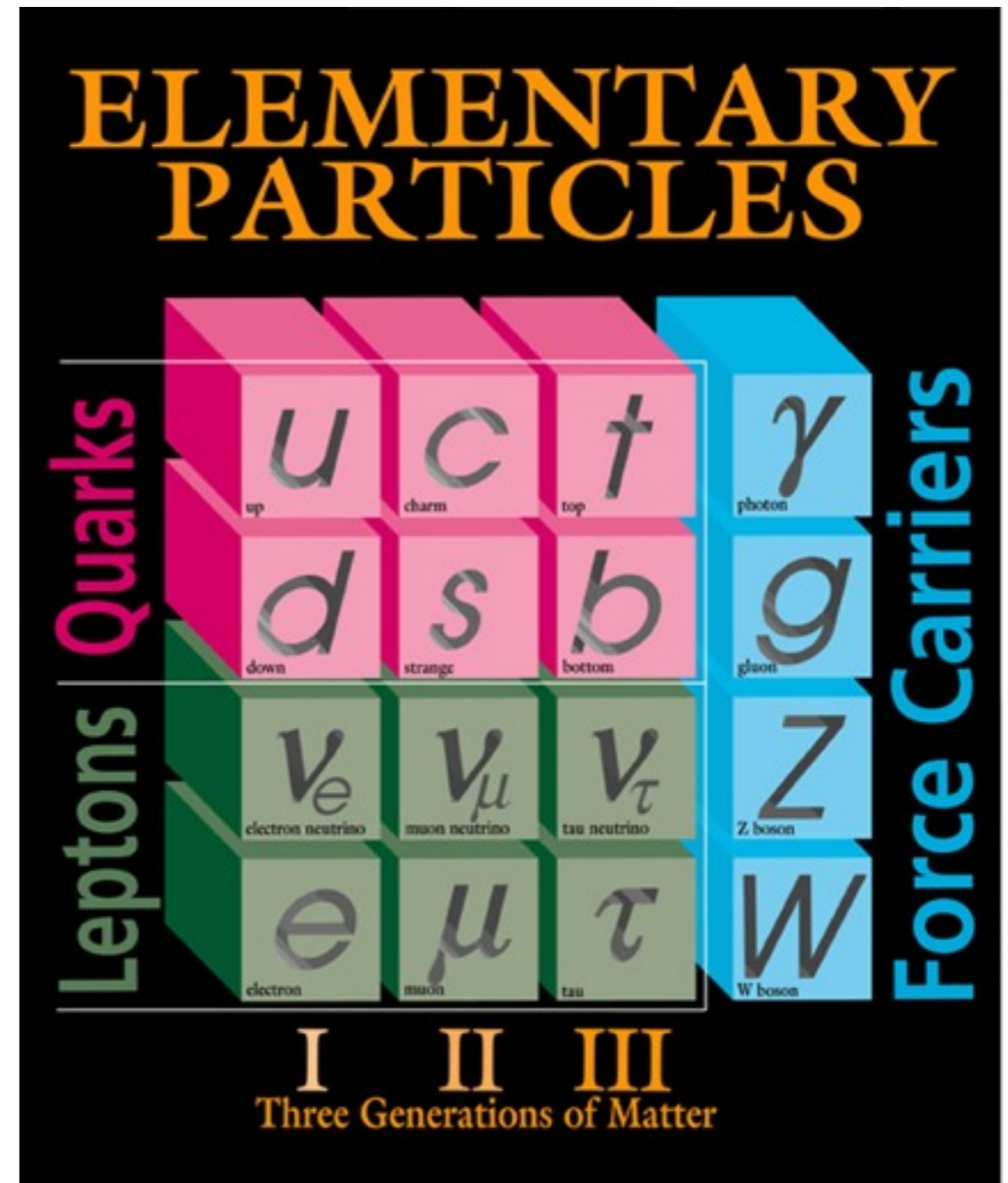
Botsingen tussen protonen worden gedomineerd door de sterke wisselwerking \Rightarrow zoek naar **leptonen** (alleen EM en zwakke wisselwerking)

Deeltjes in het Standaardmodel

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

Enorme verschillen in massa!

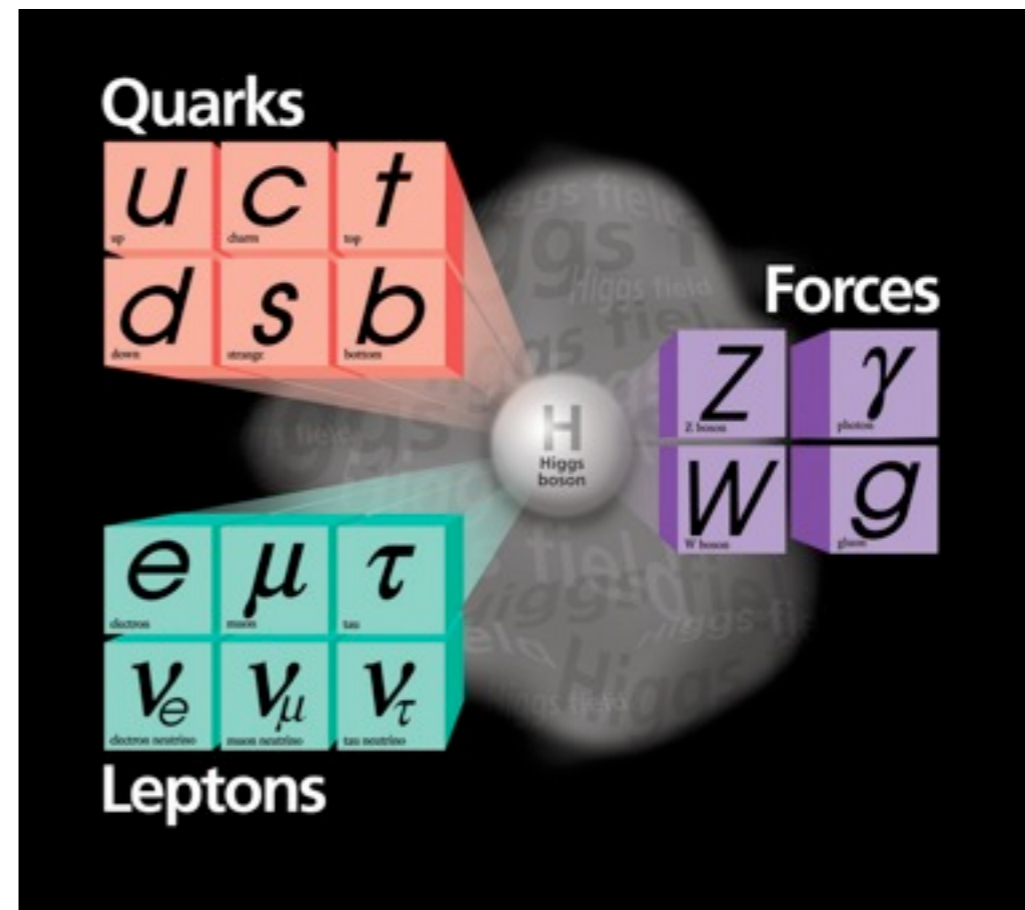
- $m_\nu < 1 \text{ eV}$
- $m_t \approx 170 \text{ GeV}$



Fermilab 95-759

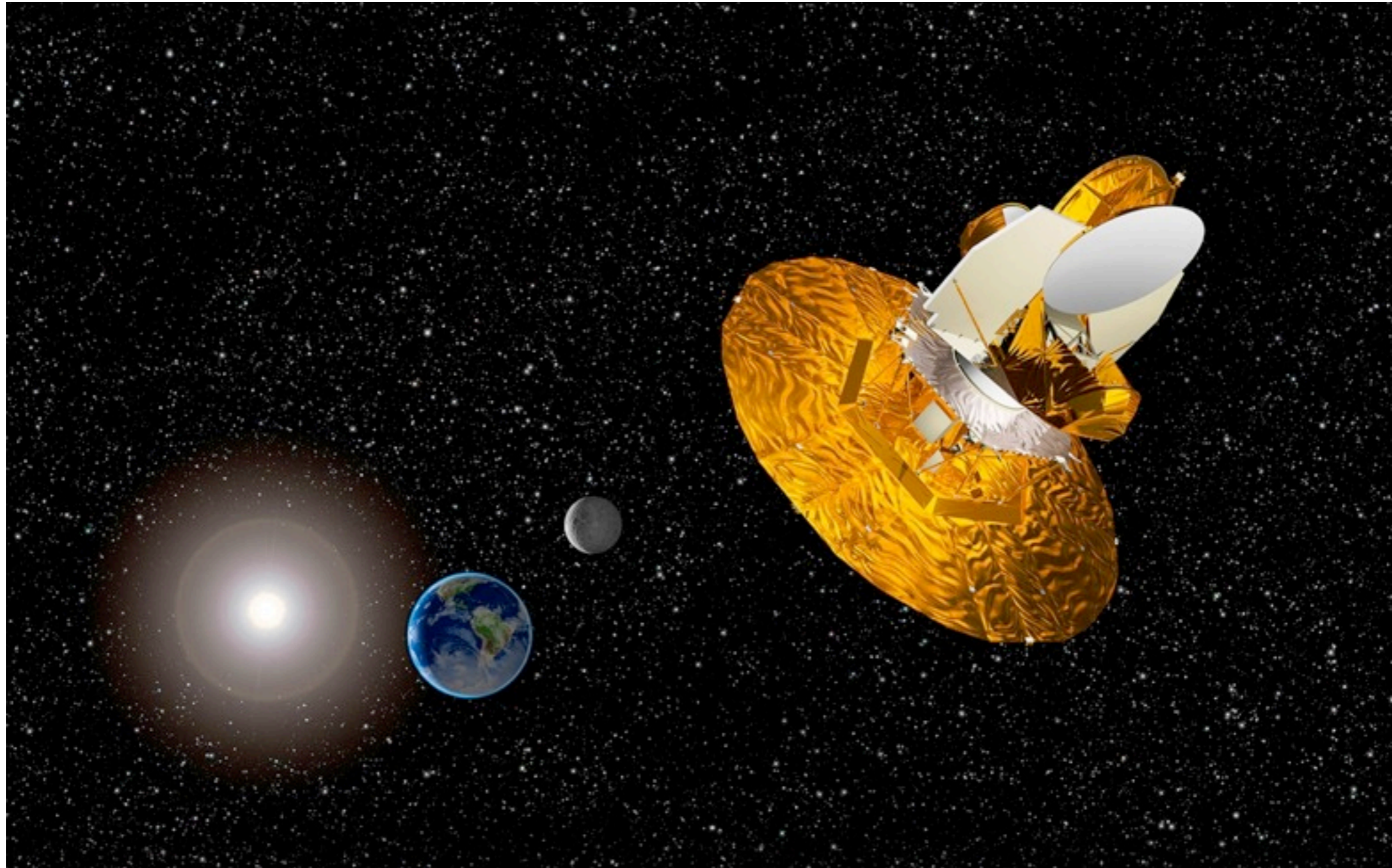
Het Higgs-deeltje

- Het Standaardmodel is nog niet compleet!
Er is nog een verklaring nodig voor:
 - verschillende massa's geladen leptonen en bijbehorende neutrino's
 - verschillende massa's up- en down-type quarks
 - massa's W- en Z-bosonen
- In het Standaardmodel: het Higgs-mechanisme
 - met bijbehorend Higgs-deeltje
 - ... helaas zonder voorspelling massa
 - maar alle andere eigenschappen van dit deeltje hangen alleen af van deze massa



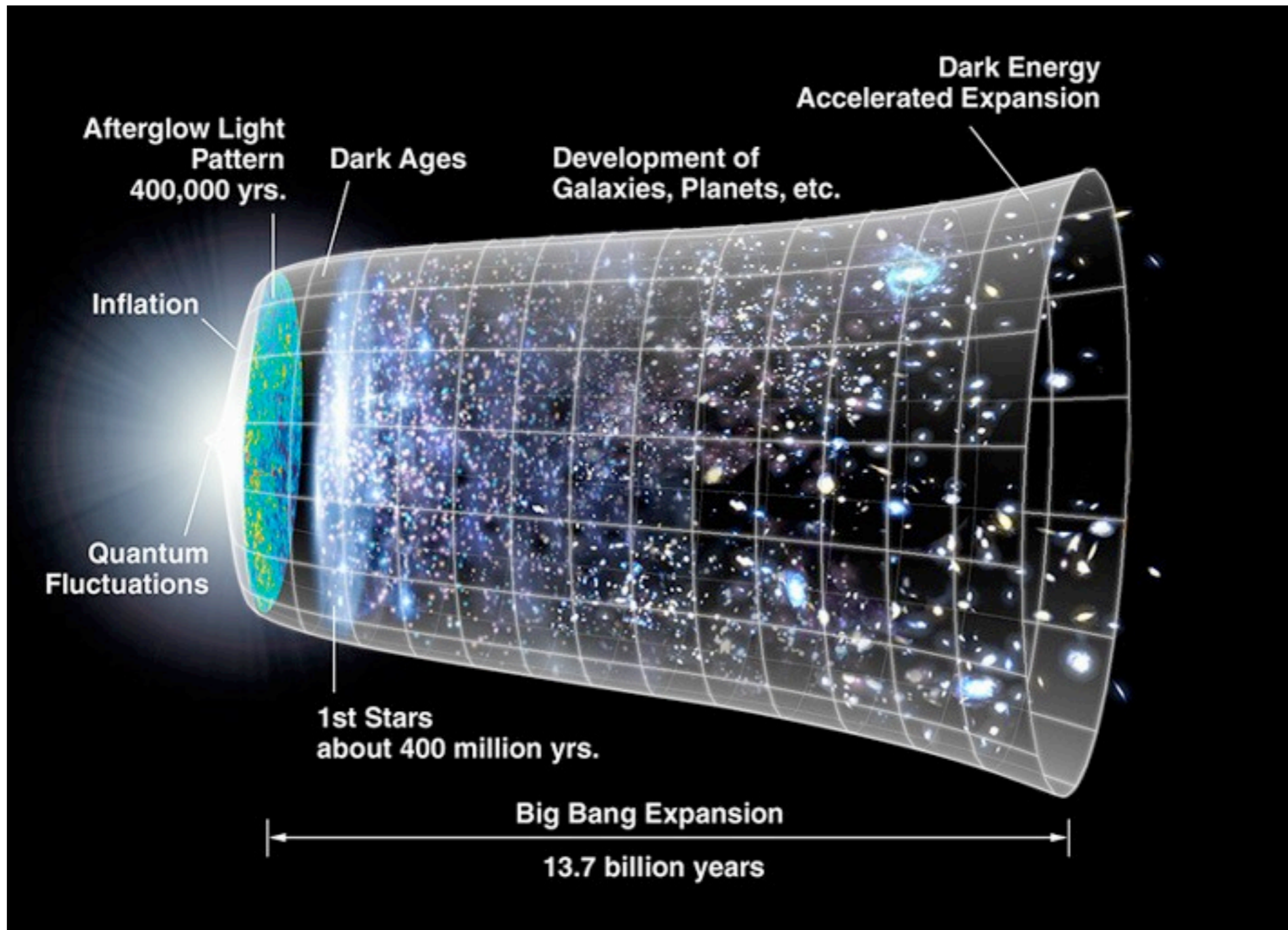
Kosmologie: het heelal

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



Kosmologie: het heelal

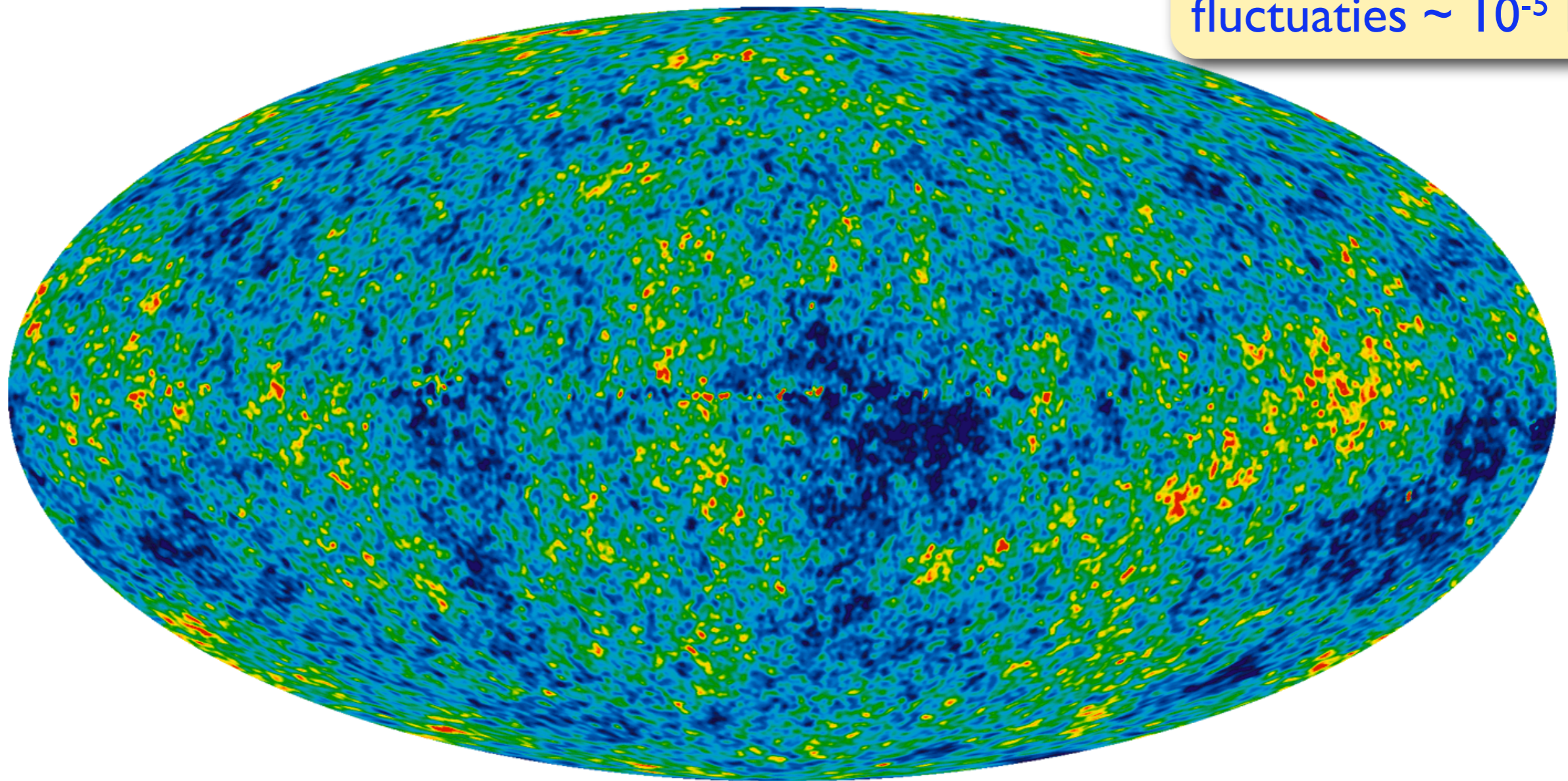
- Op grote schaal is het heelal **isotroop** en **homogeen**!



Kosmologie: het heelal

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

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



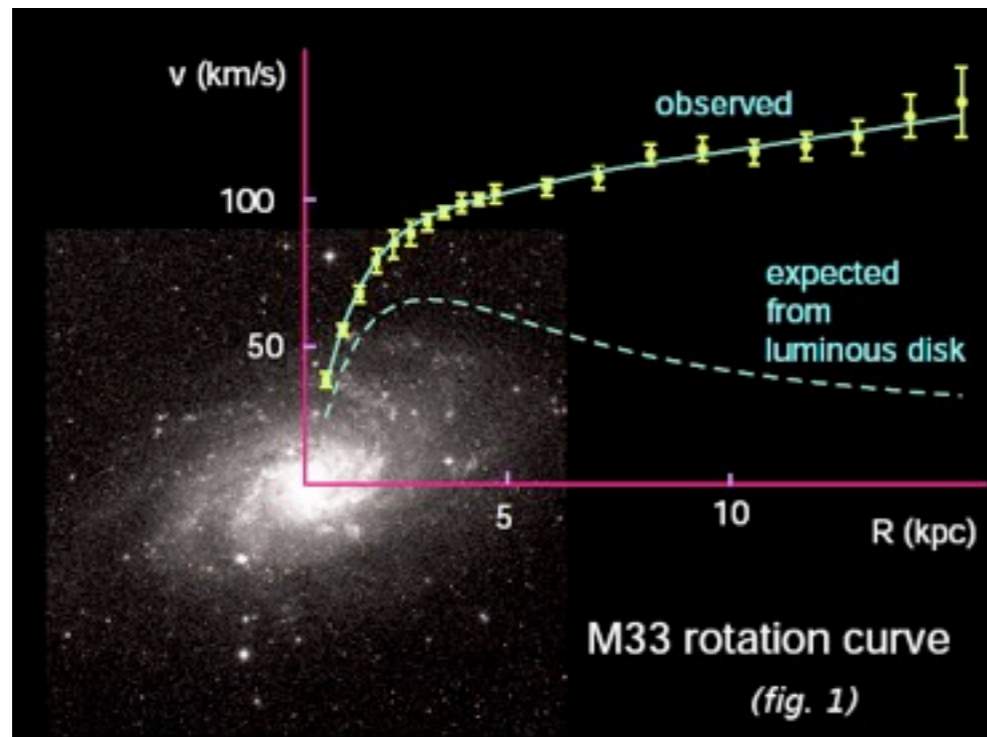
WMAP resultaten (7 jaar observaties)

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

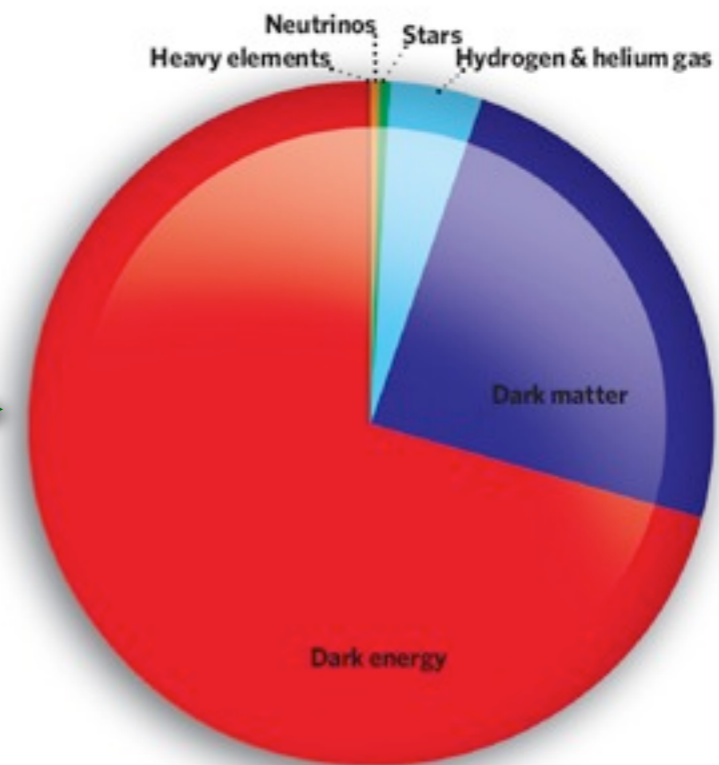
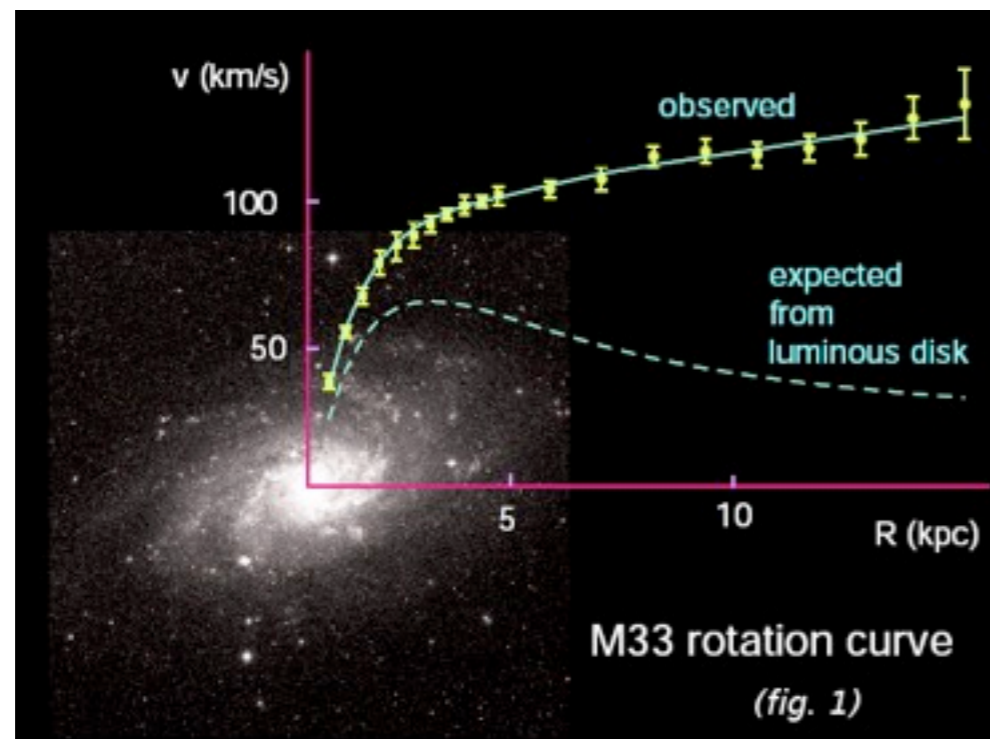
- We begrijpen **ten hoogste 4%** van het heelal!



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

Donkere materie en energie

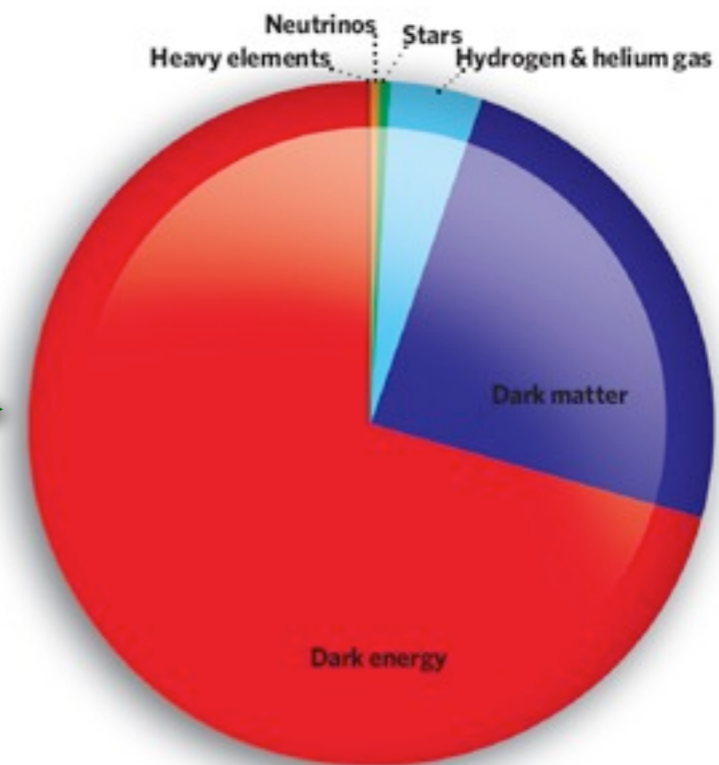
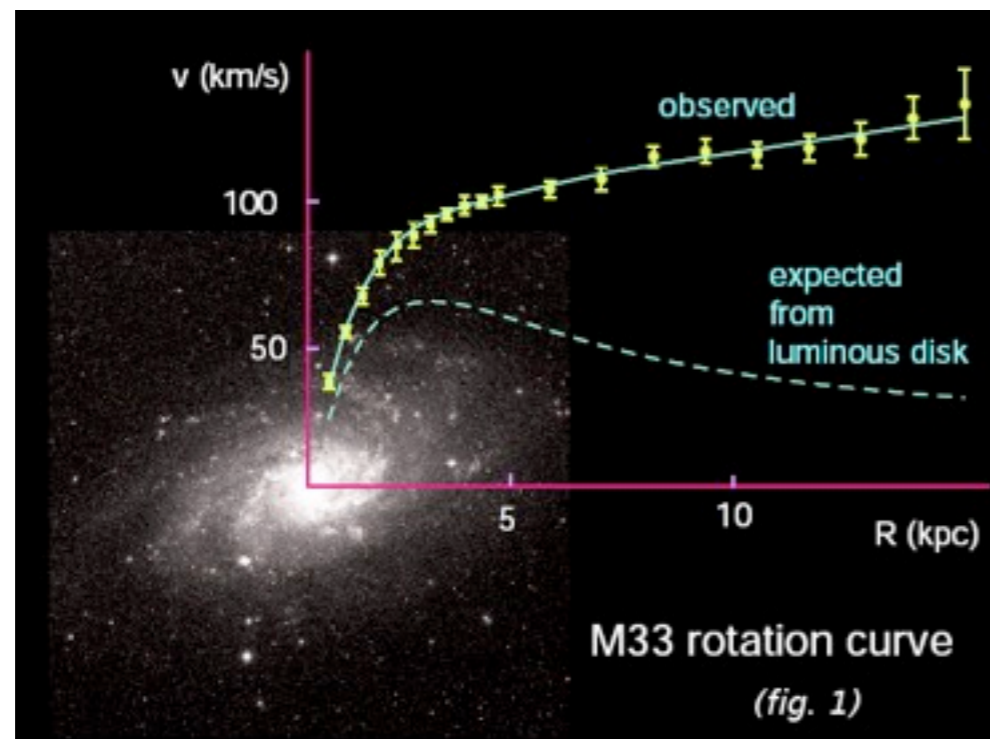
- We begrijpen **ten hoogste 4%** van het heelal!



- **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!



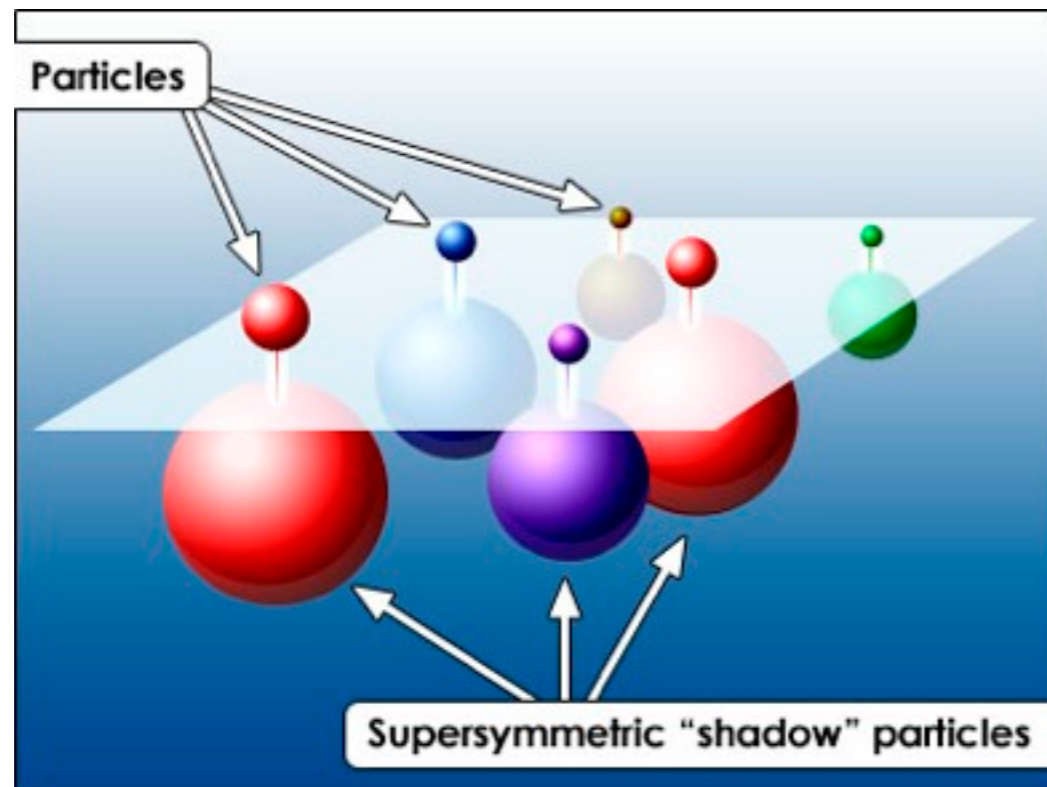
- **donkere materie:** zware deeltjes, niet voorspeld door het Standaardmodel
- zonder **EM**, **zwakke** of **sterke wisselwerking**

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~~

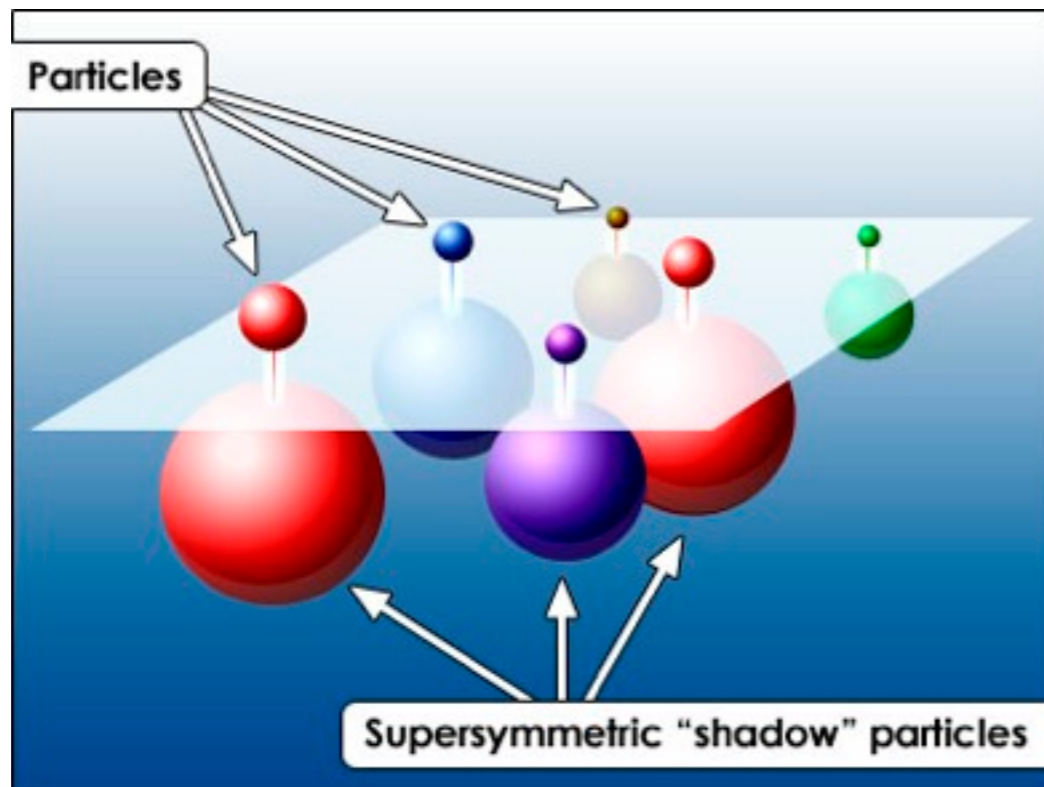


Gebroken symmetrie:
vele realisaties

- 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

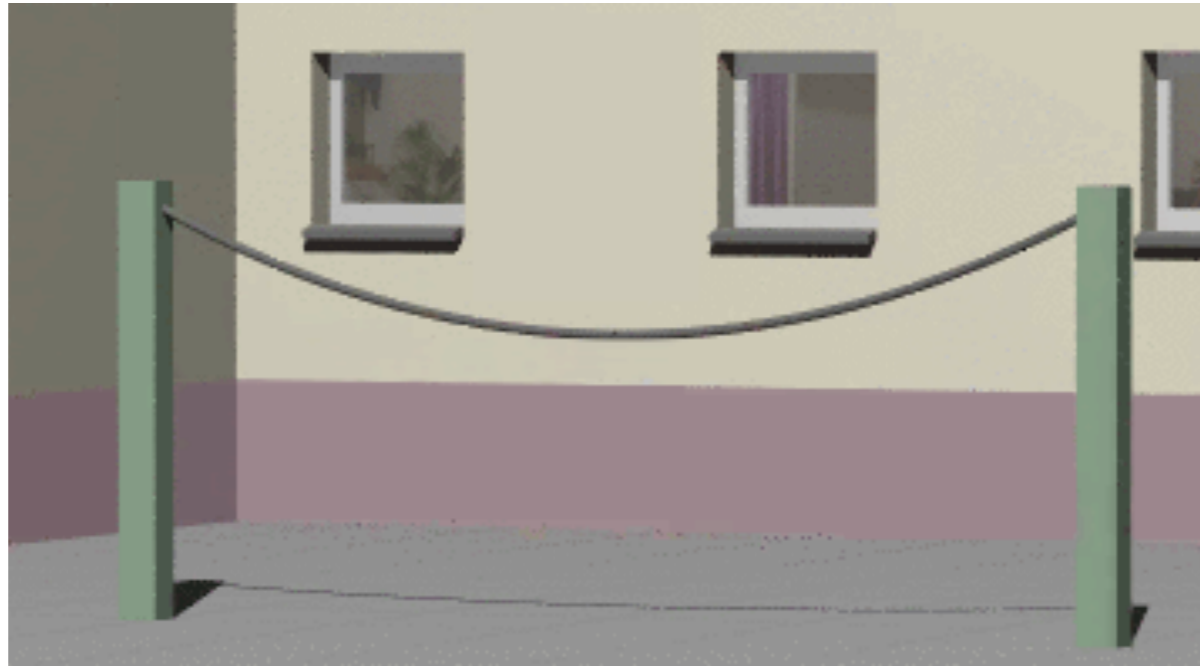
- donkere materie: stabiel neutraal
lichtste supersymmetrische deeltje



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

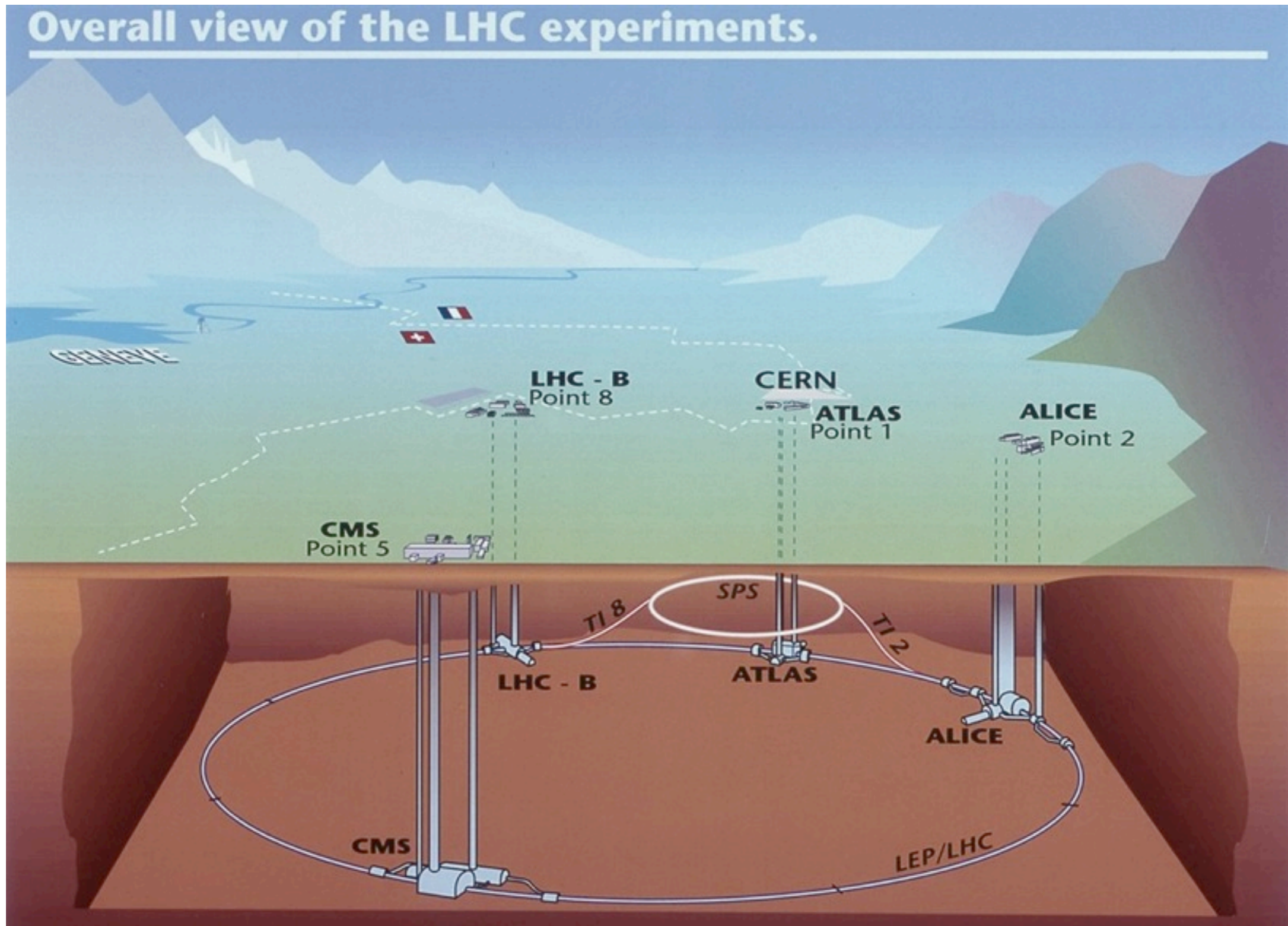


Andere vragen

- 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?

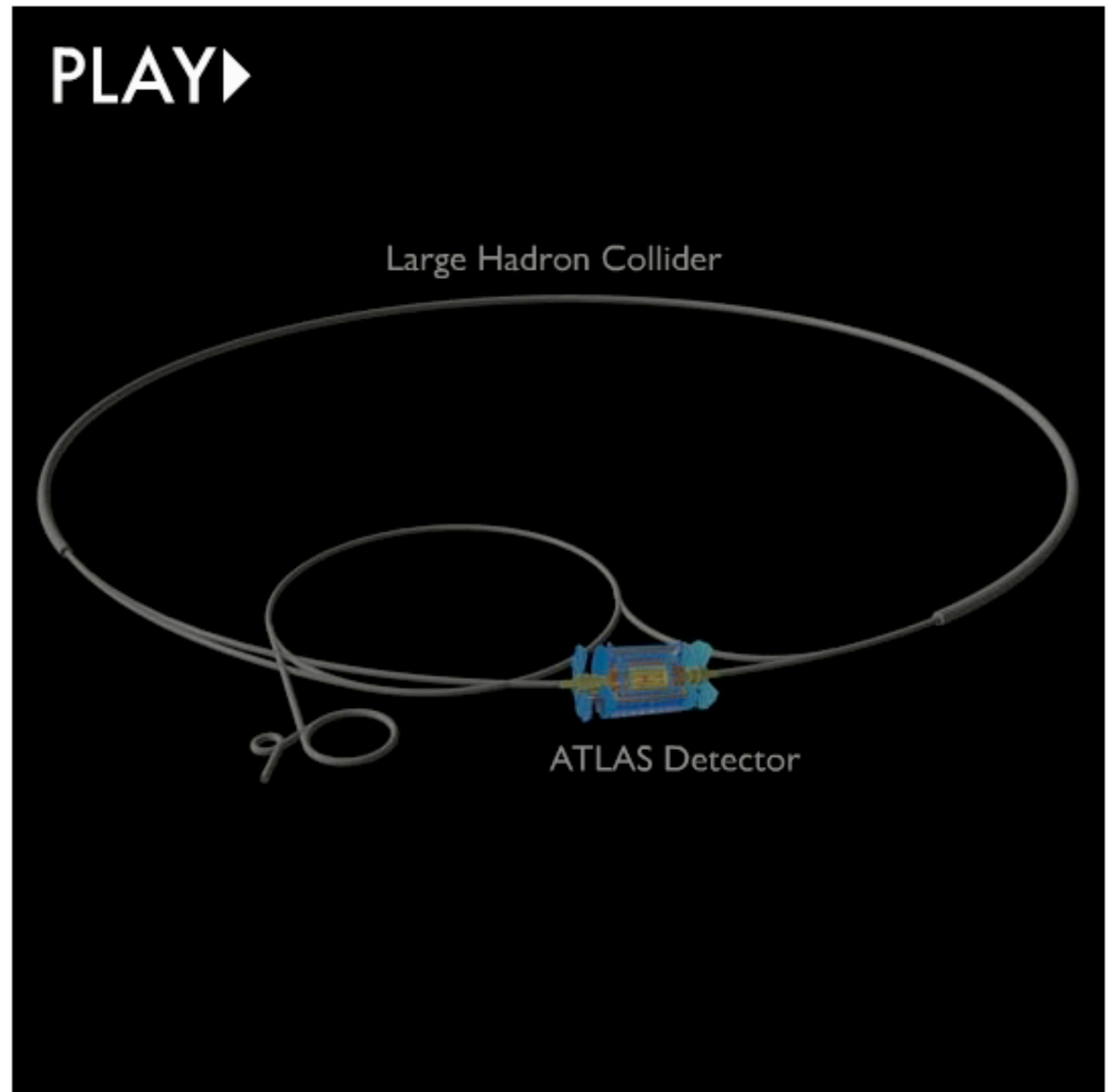
Deel III: De Large Hadron Collider

De LHC: principe



De LHC: principe

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



De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten



- Uitdaging 2: bundelintensiteit

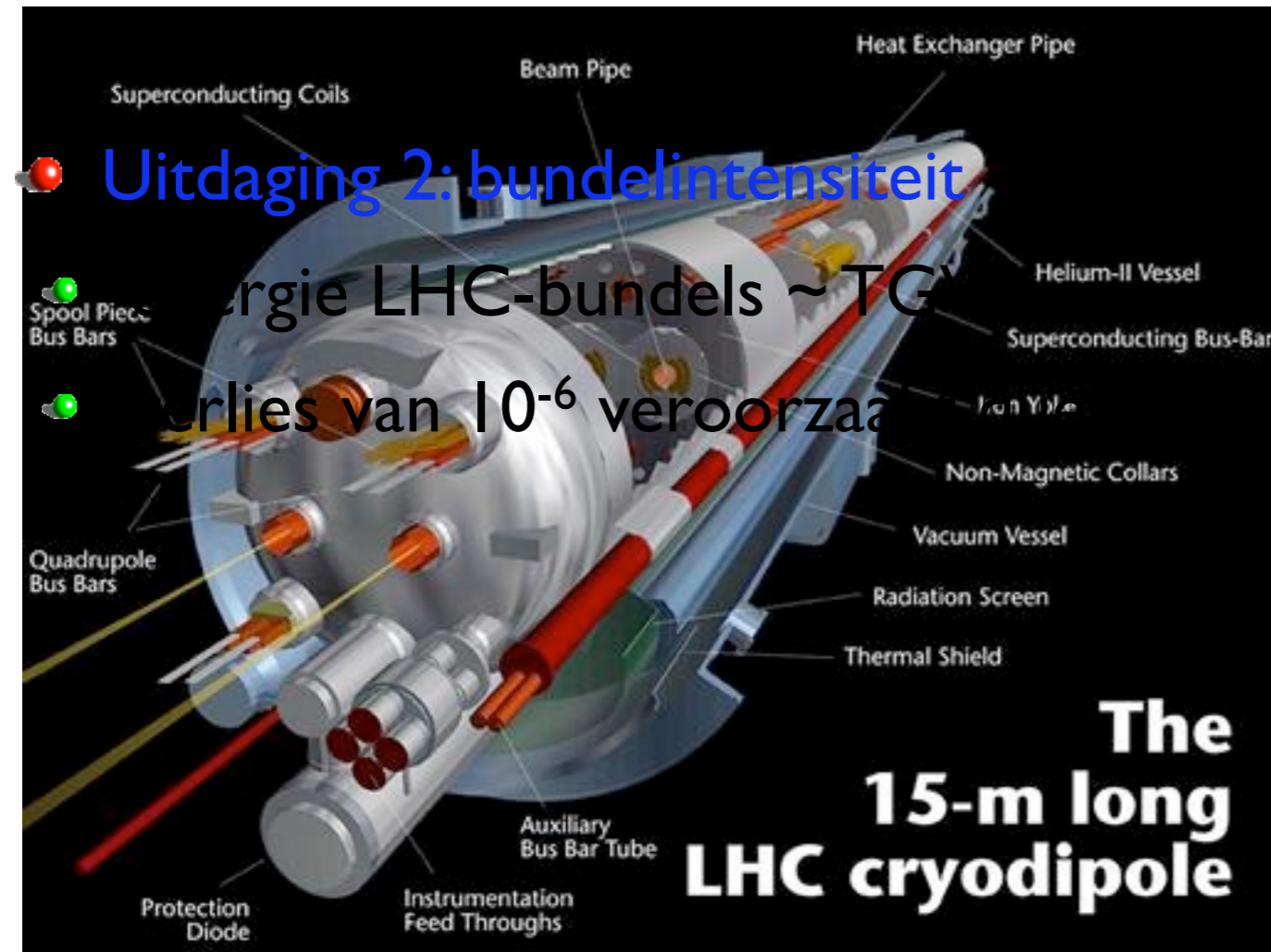
- energie LHC-bundels \sim TGV

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

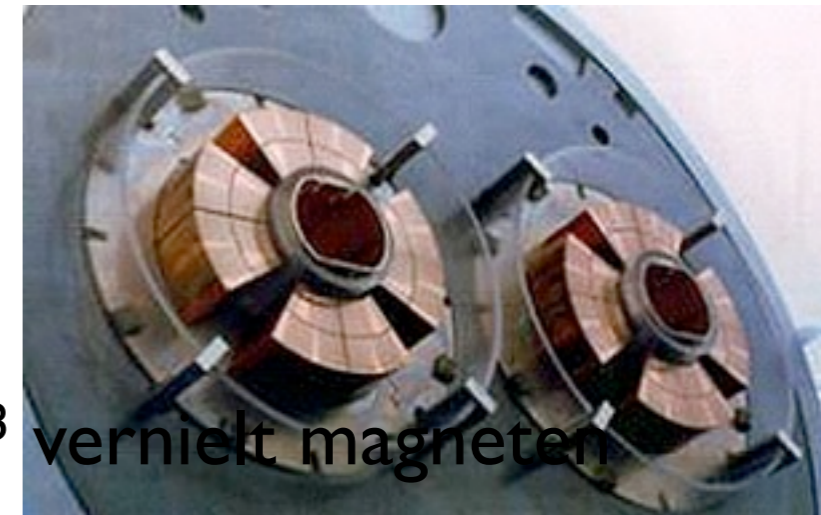
De LHC: praktijk

- Uitdaging 1: dipoolmagneten

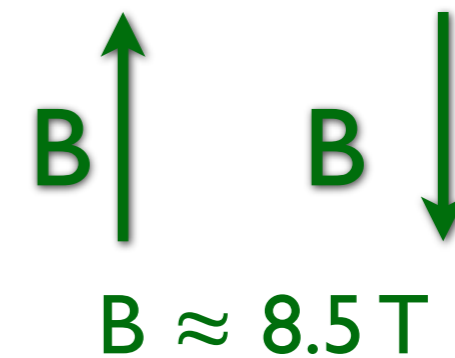
- Uitdaging 2: bundelintensiteit



Energie LHC-bundels ~ 7 TeV
Stralingsverlies van 10^{-6} veroorzaakt

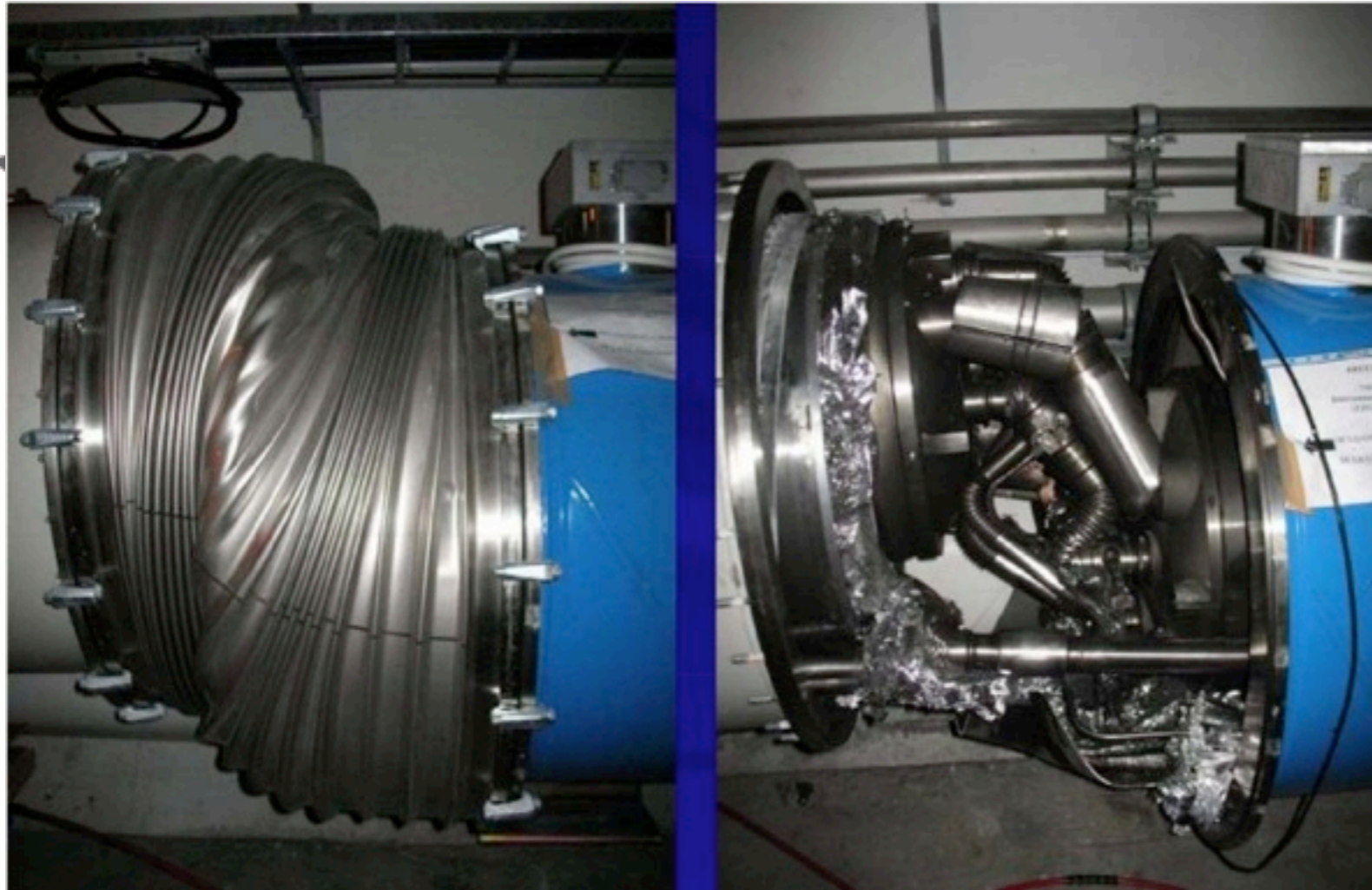


verniet magneten



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

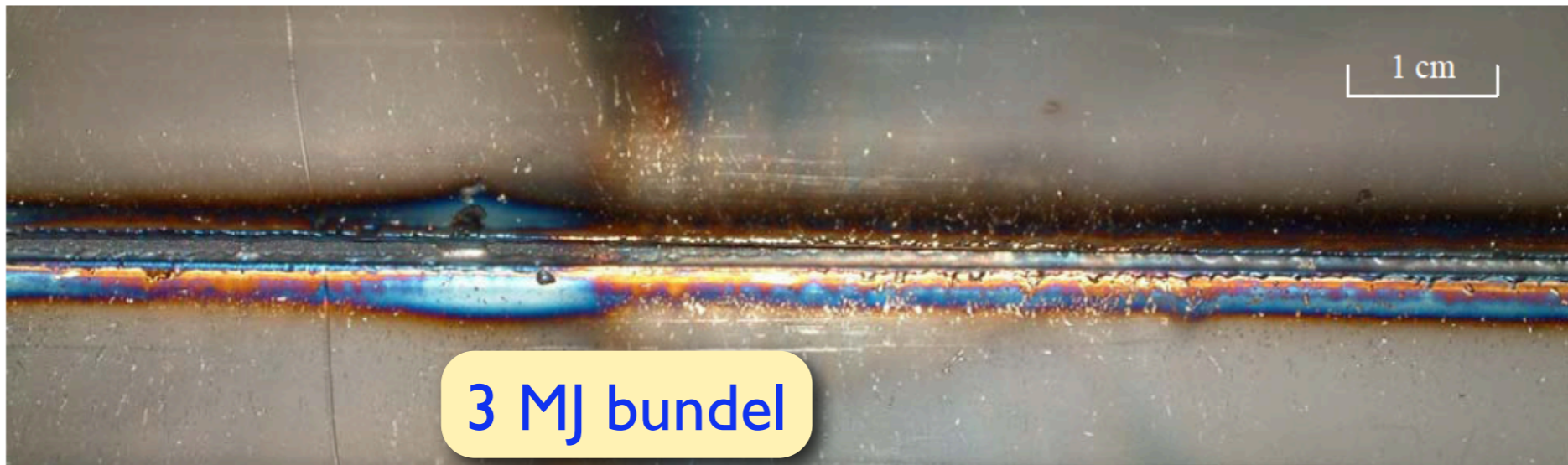


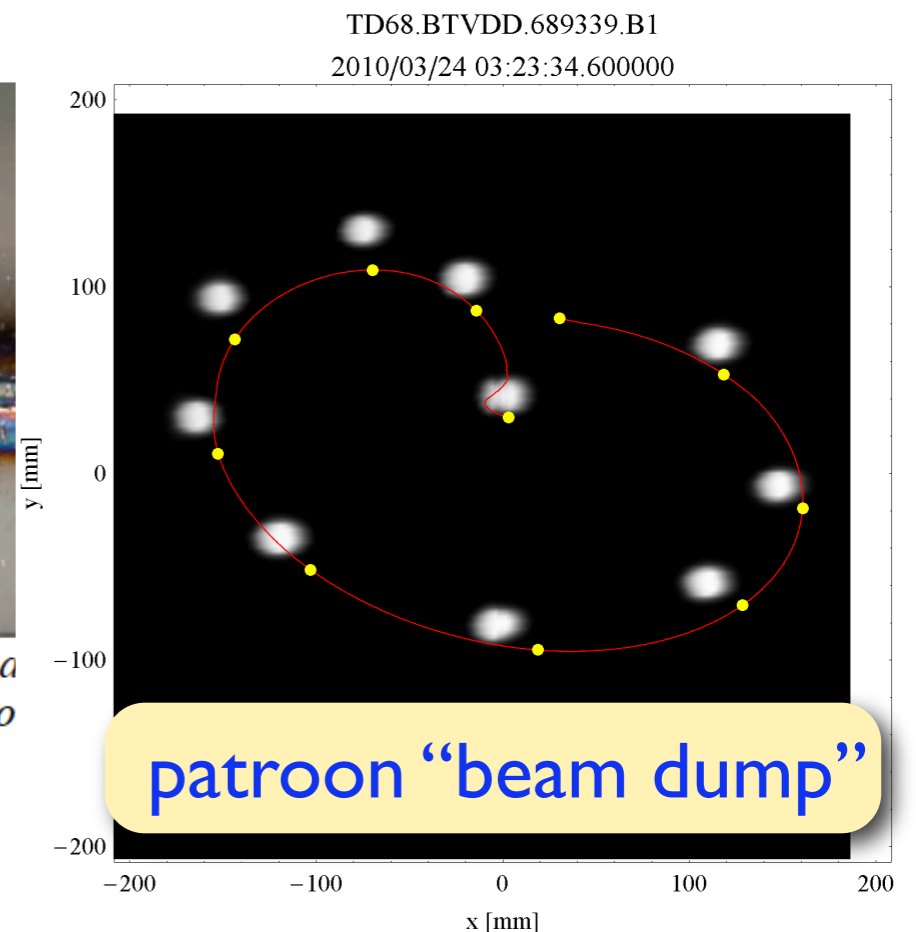
Figure 4. Damage observed on the inside of the vacuum chamber, on the beam impact side. A groove approximately 110 cm long due to removed material was clearly visible, starting at about 30 cm from the entrance.

De LHC: praktijk

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

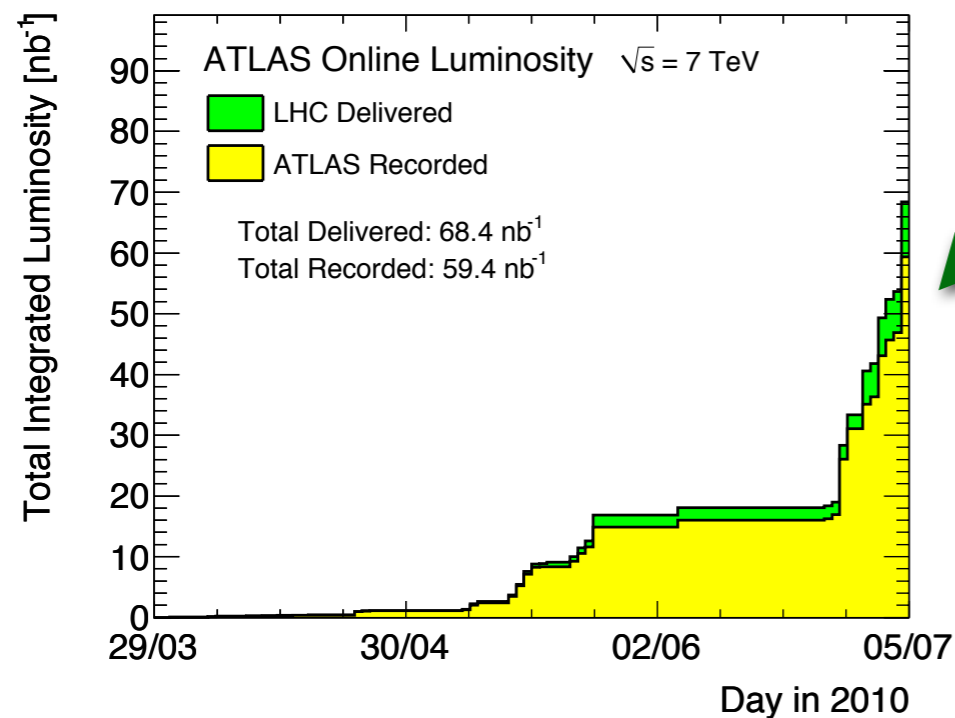


Figure 4. Damage observed on the inside of the vacuum chamber, on the beam impact approximately 110 cm long due to removed material was clearly visible, starting at the entrance.

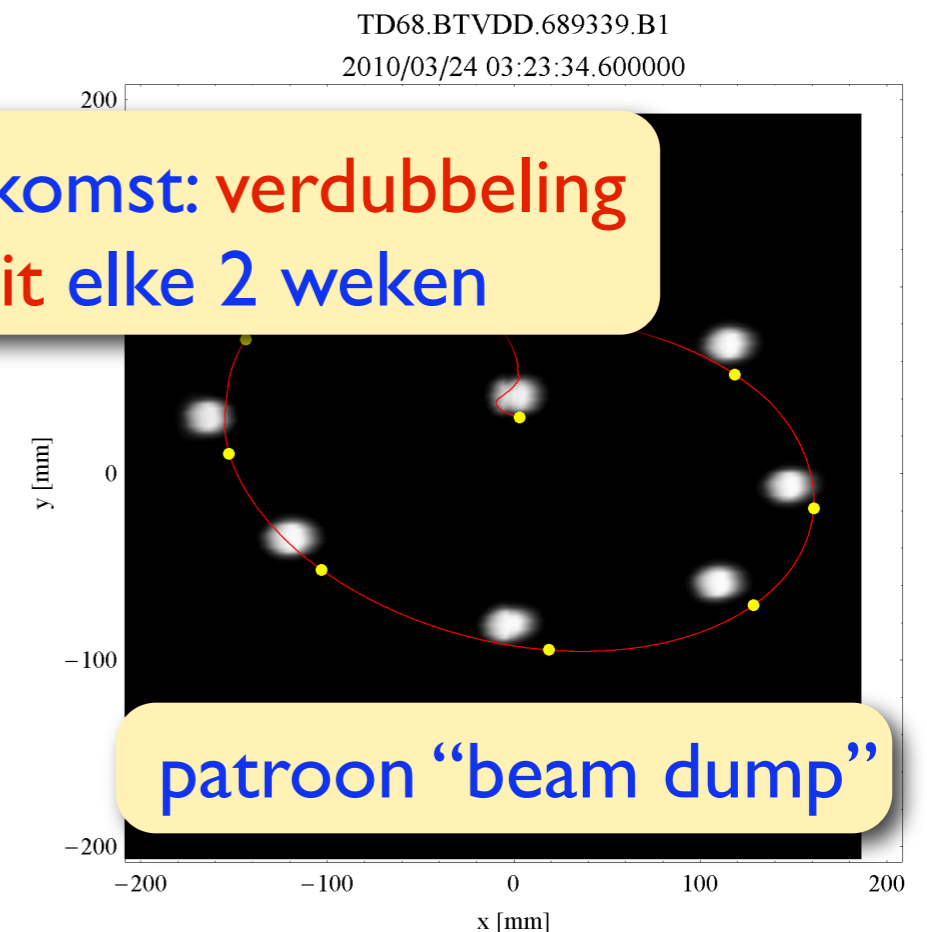


De LHC: praktijk

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

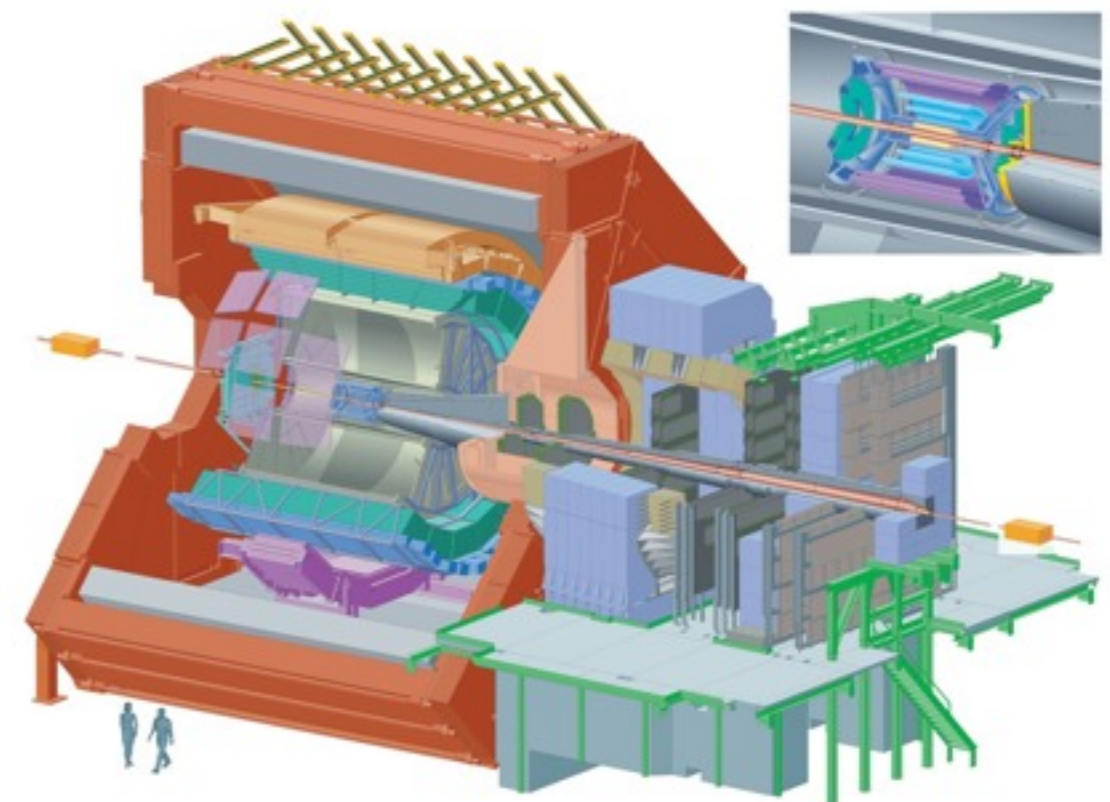
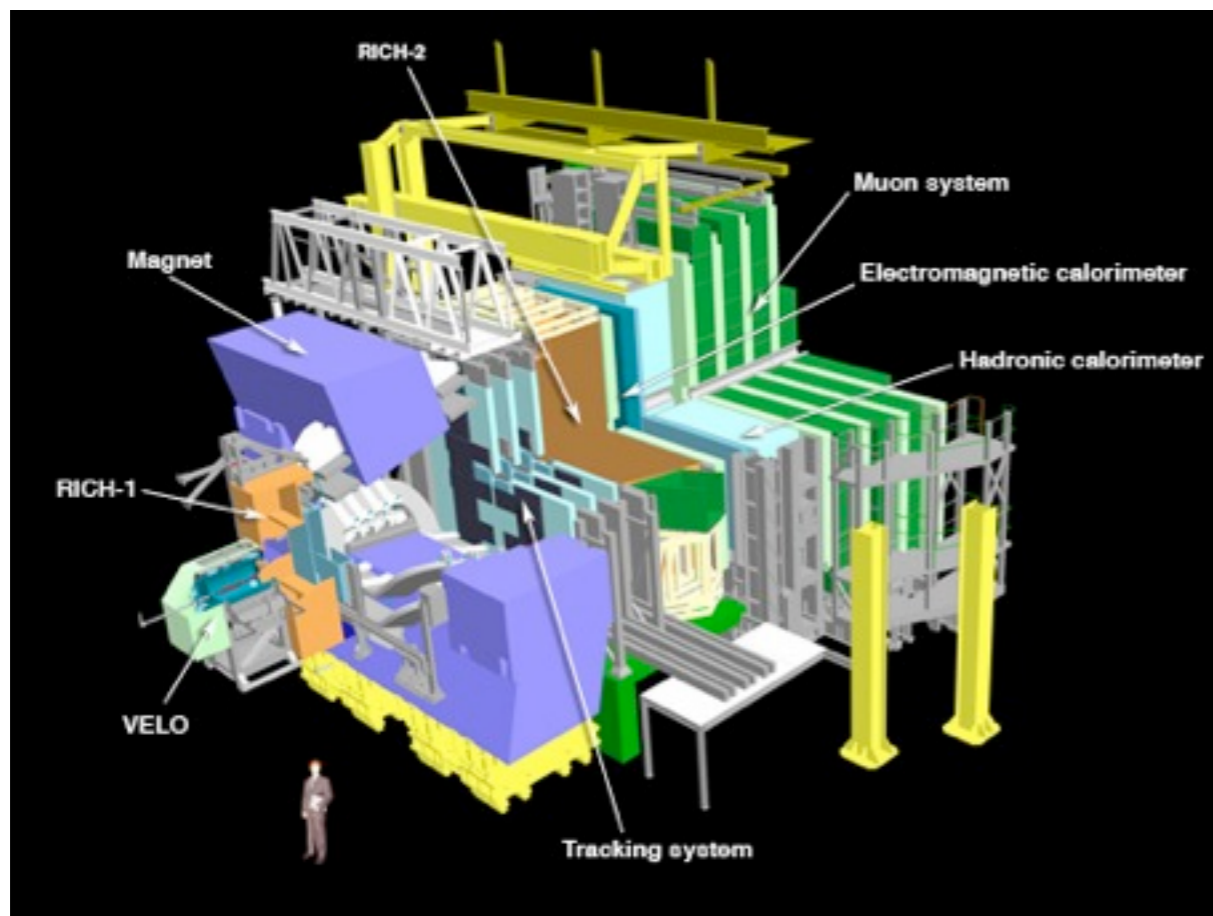


nabije toekomst: verdubbeling
luminositeit elke 2 weken

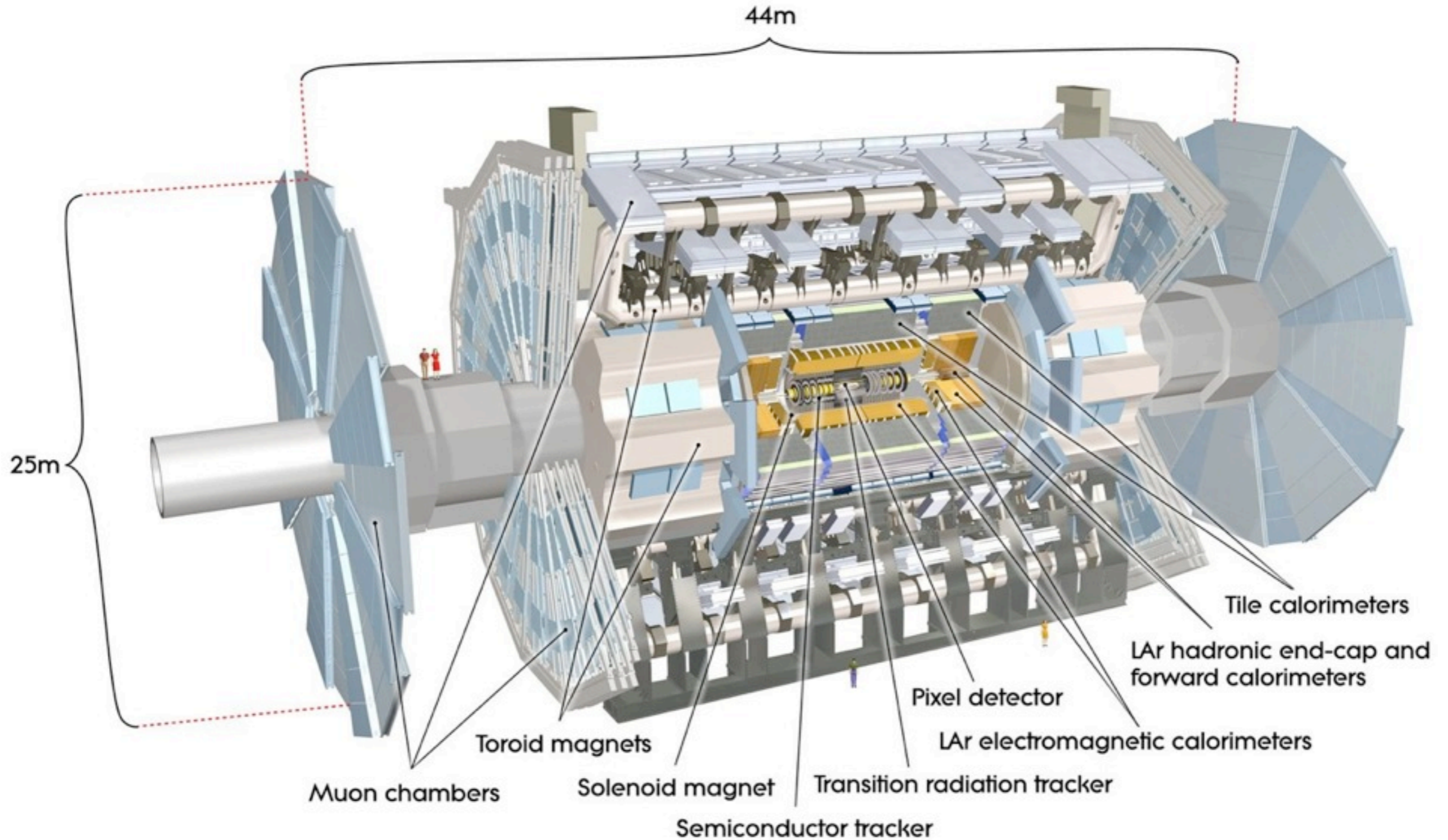


LHC-experimenten

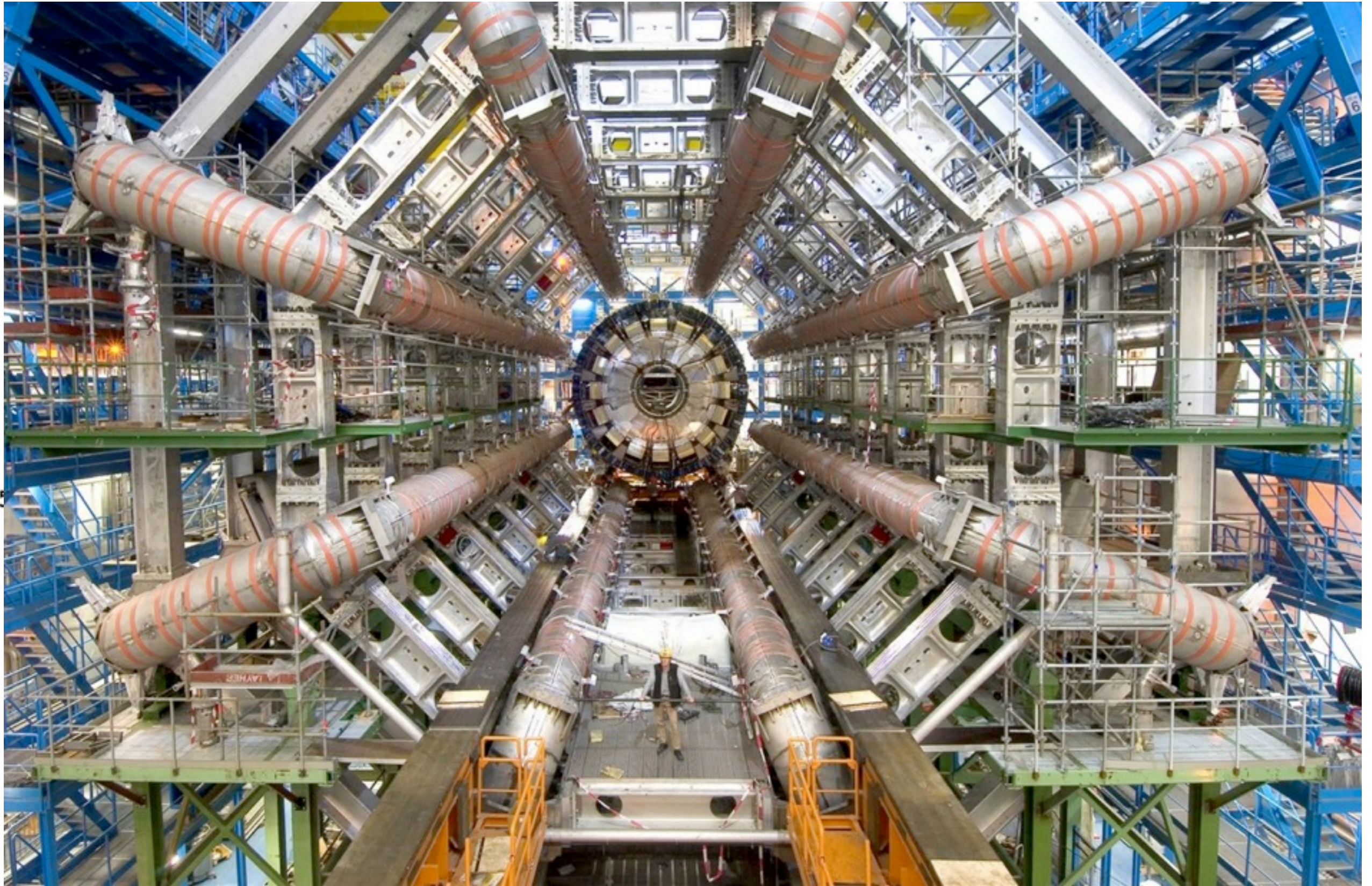
- **CMS & ATLAS**: 'general purpose' experimenten
- **LHCb**: gedetailleerde studies naar asymmetrie materie - antimaterie
- **ALICE**: zoektocht naar 'quark-gluon plasma' (vrije quarks & gluonen) in botsingen van zware ionen (lood + lood)



Het Atlas-experiment

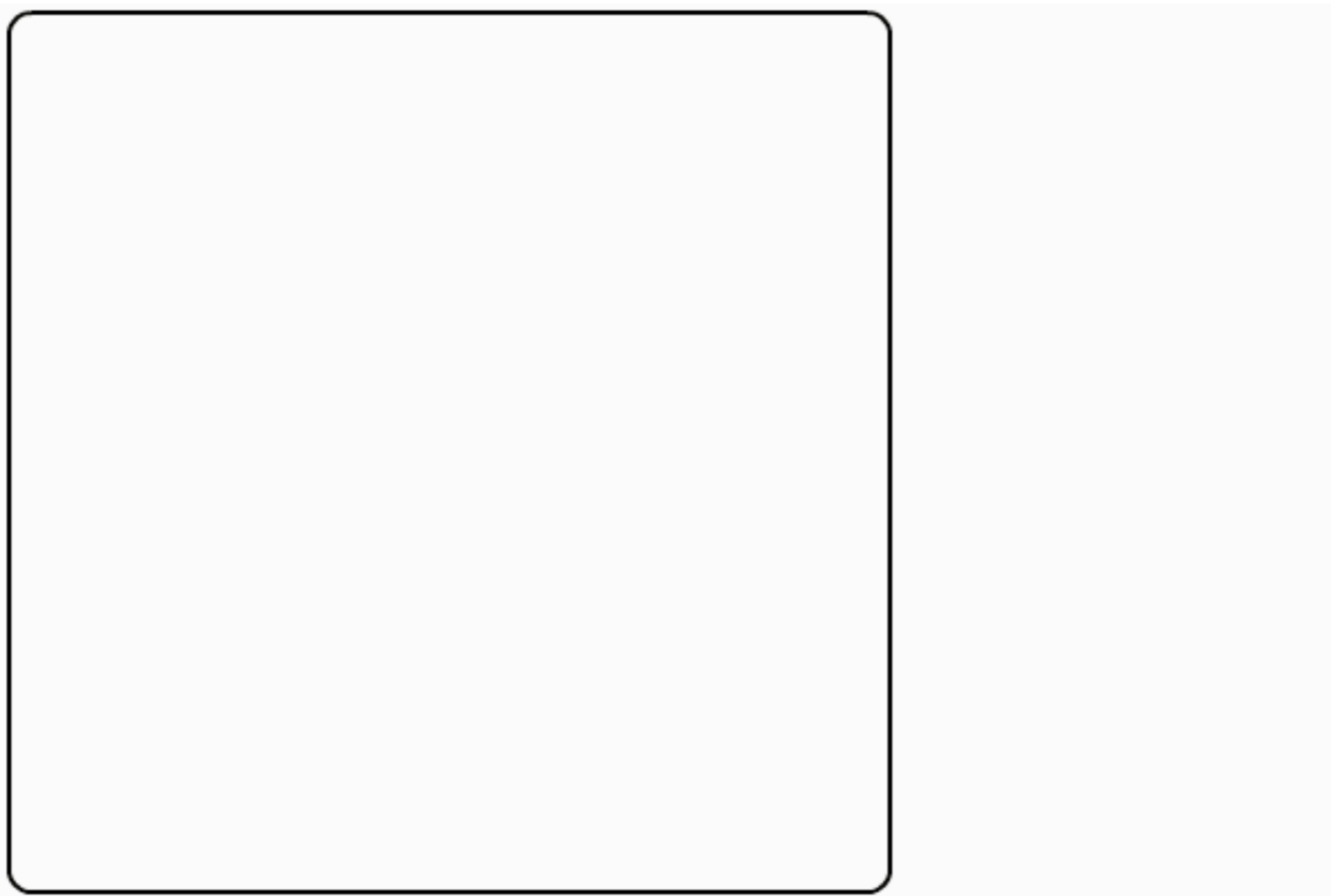


Het Atlas-experiment



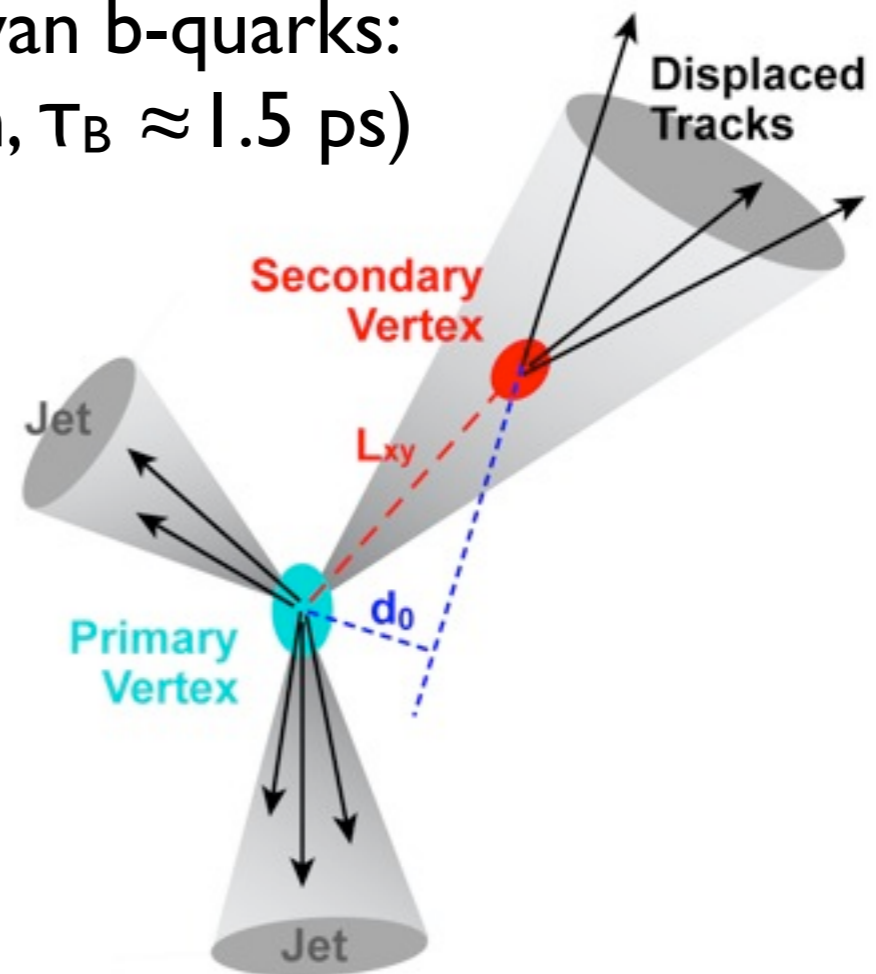
25

Deeltjesdetectie

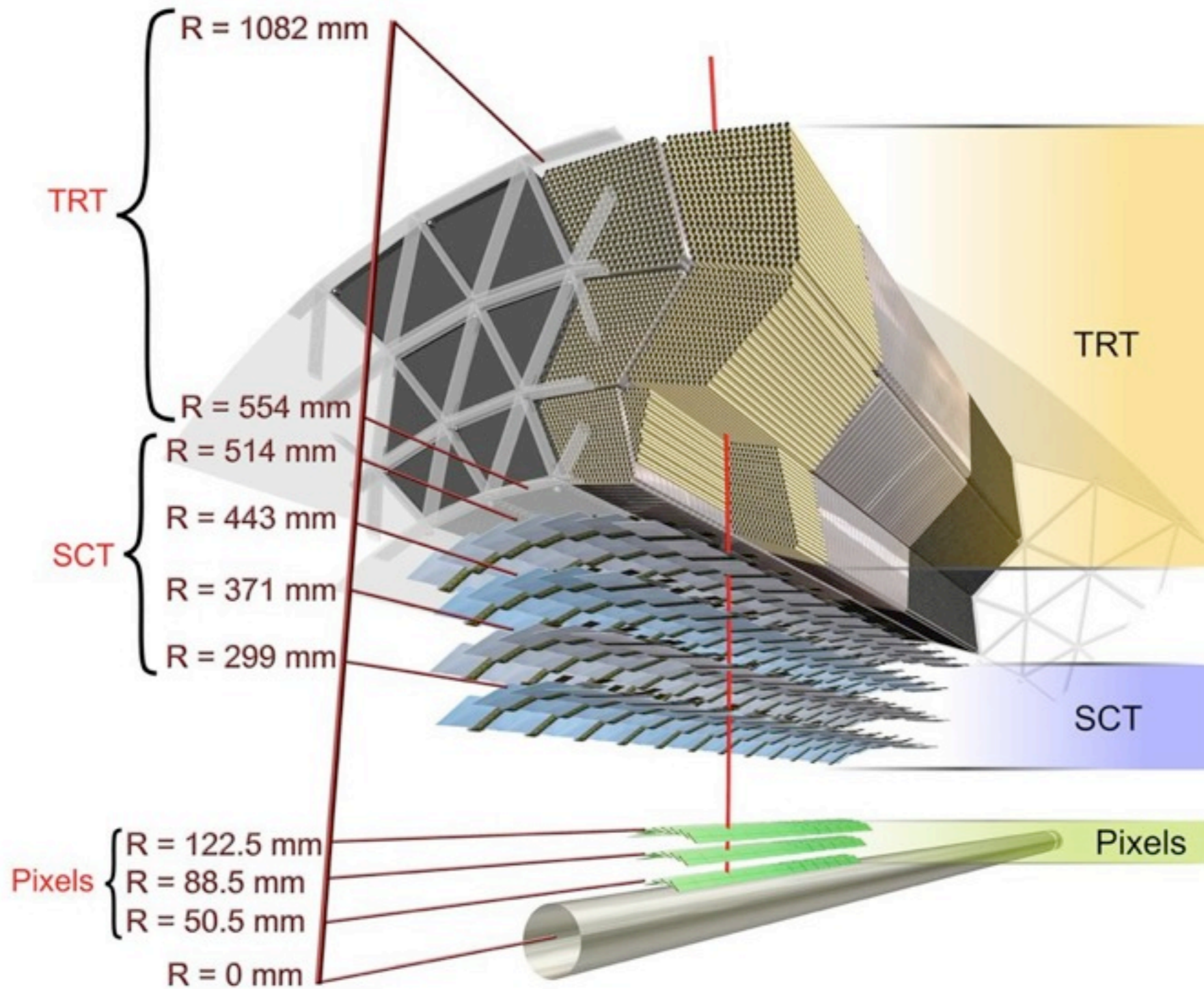


Deeltjesdetectie

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



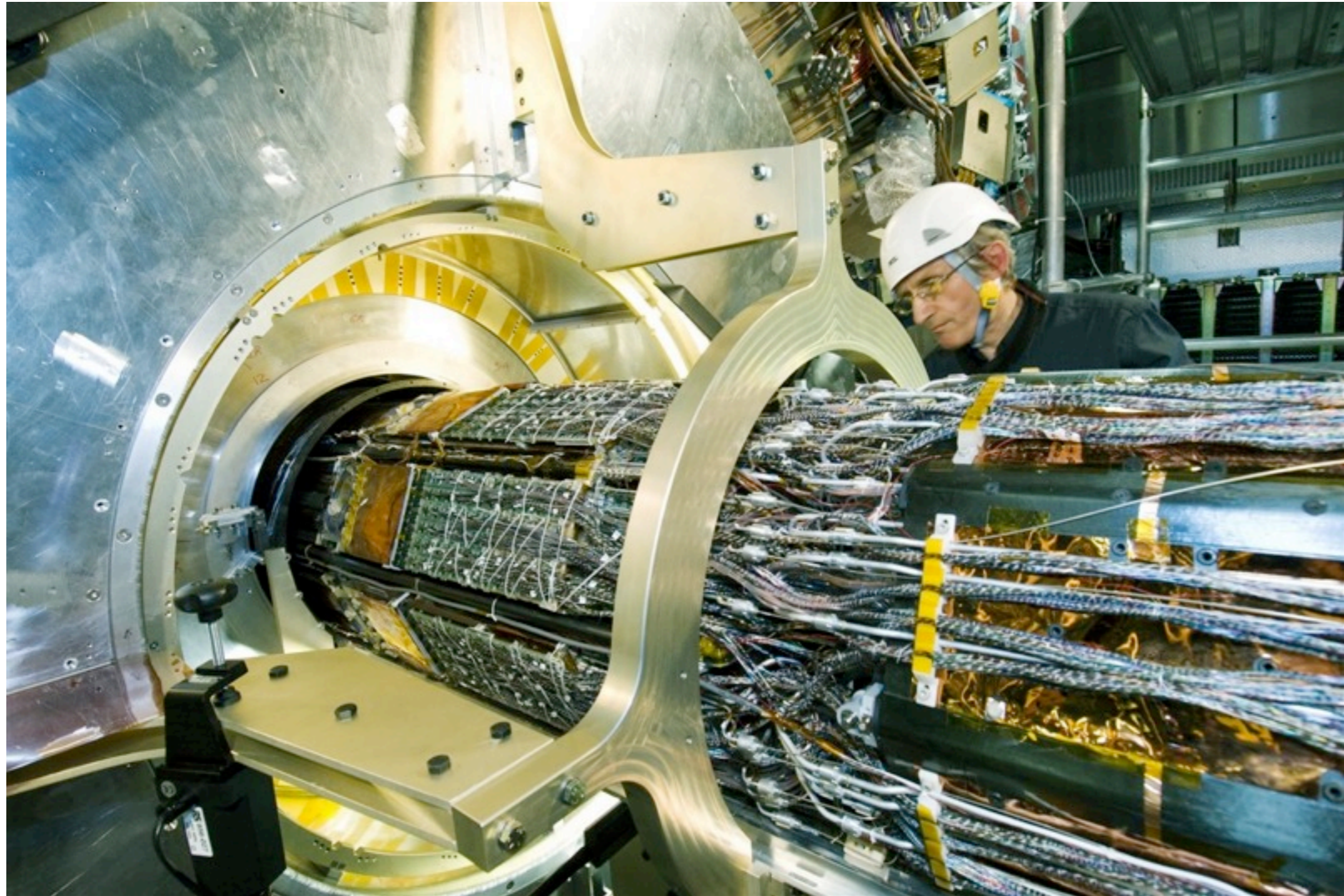
Inner Detector



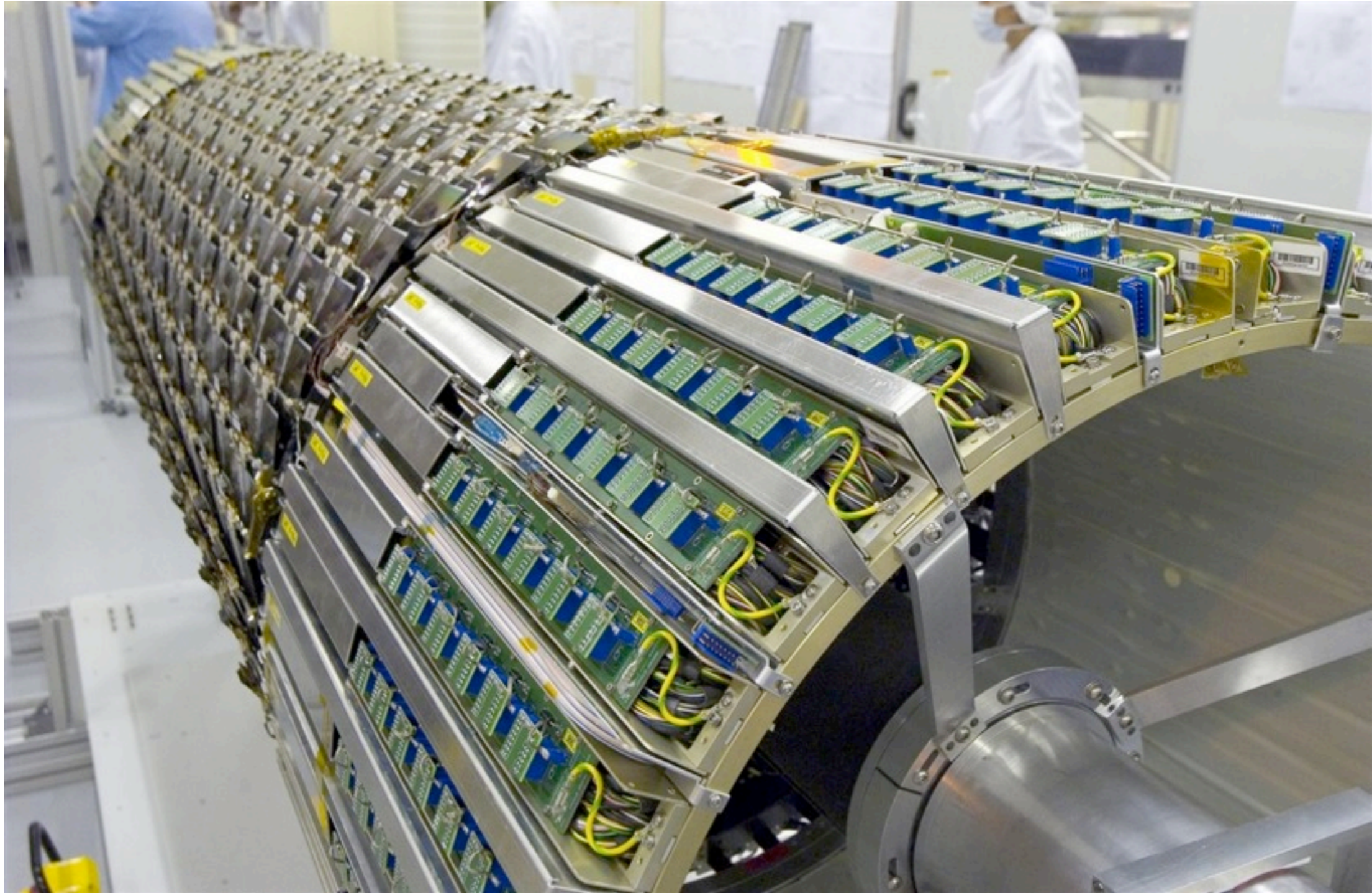
Inner Detector



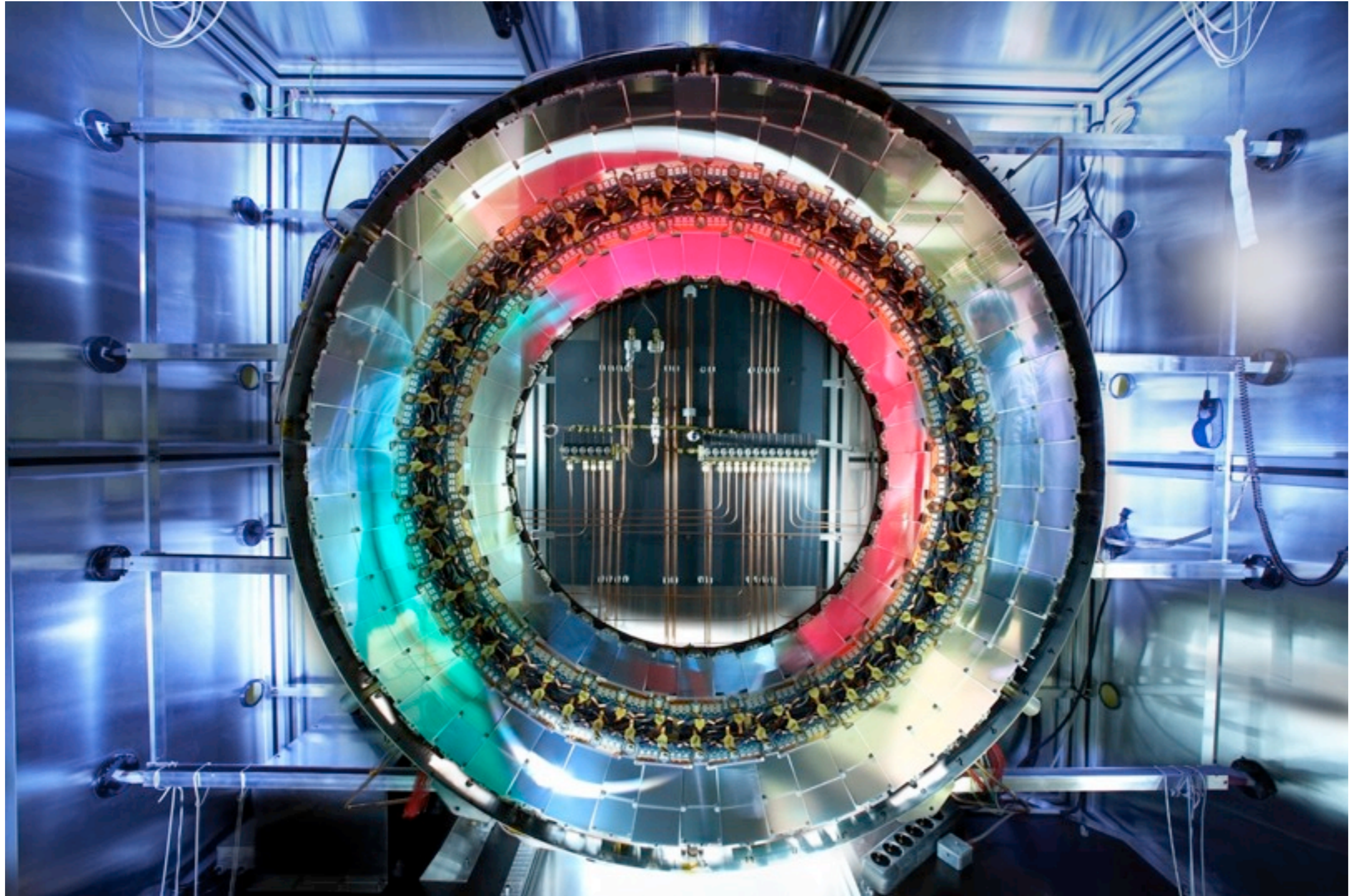
Inner Detector



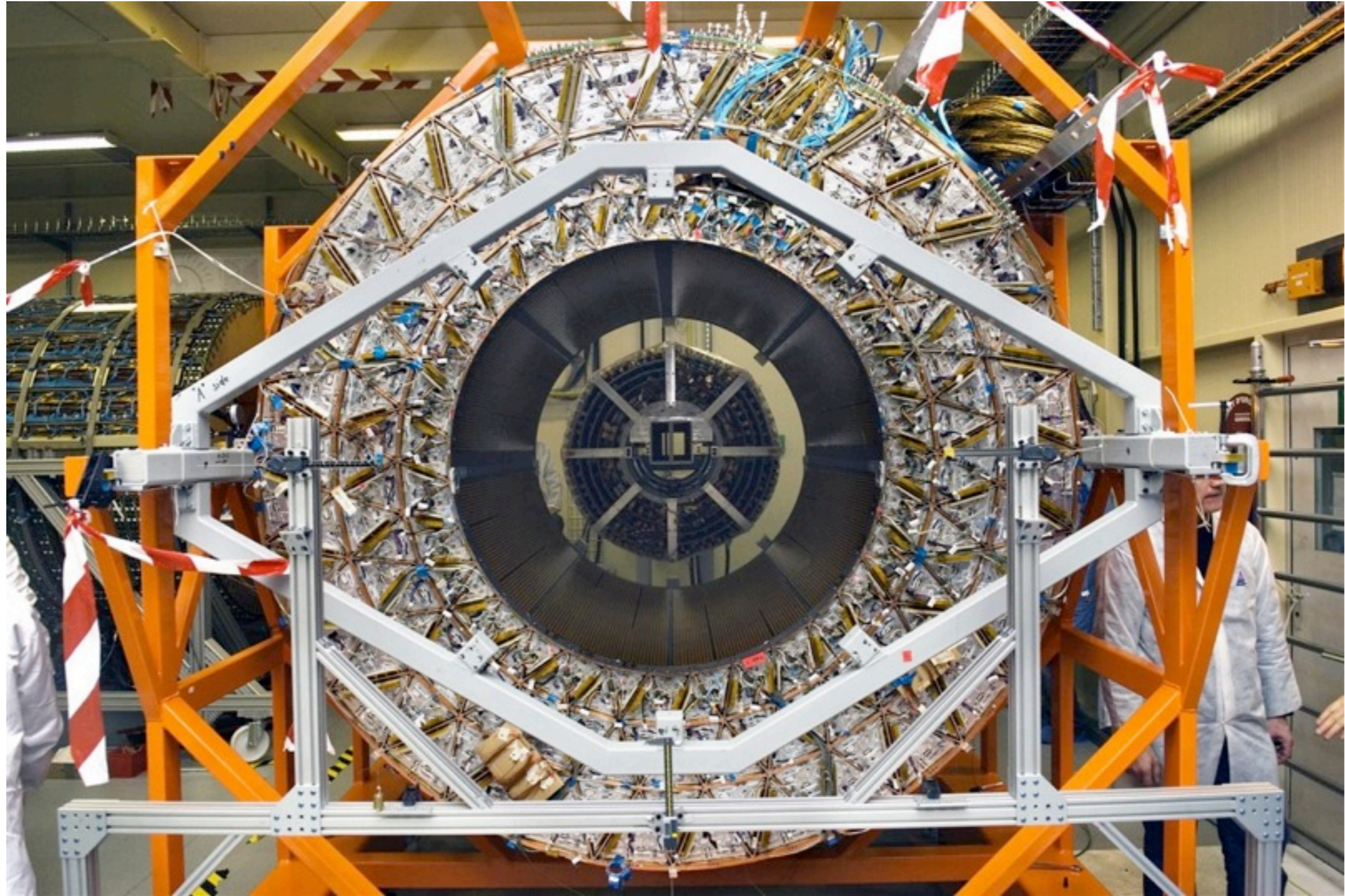
Inner Detector



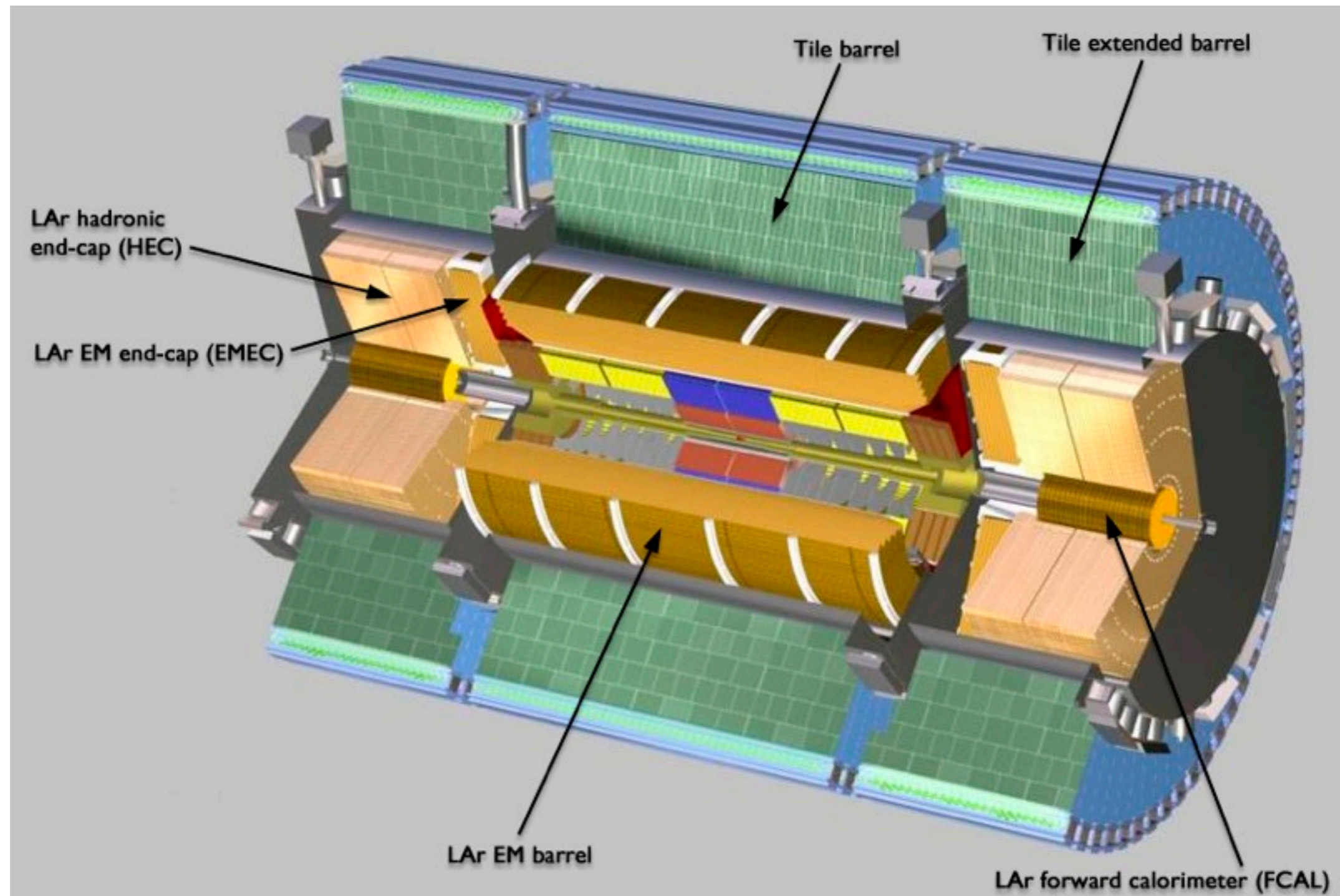
Inner Detector



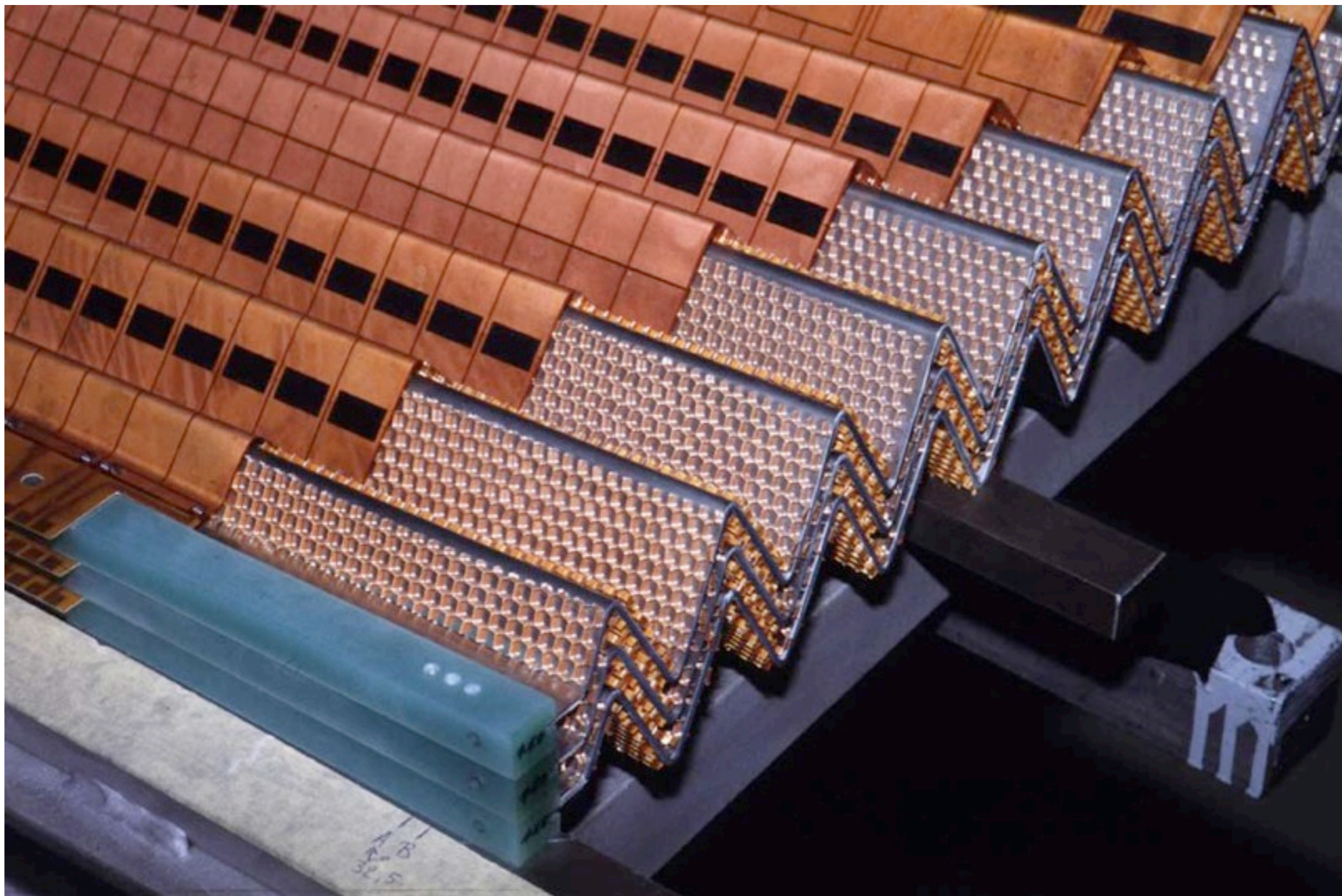
Inner Detector



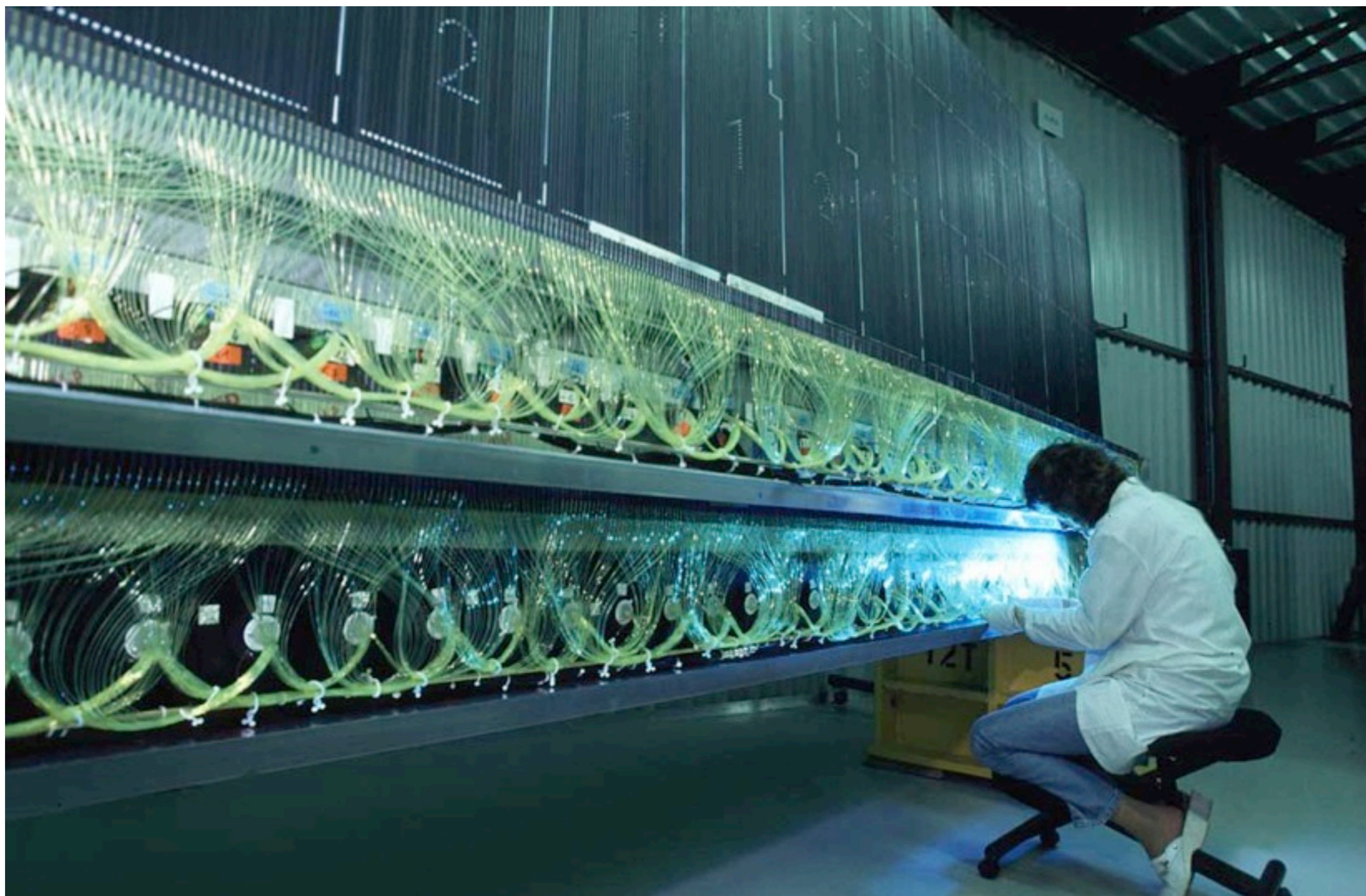
Calorimeters



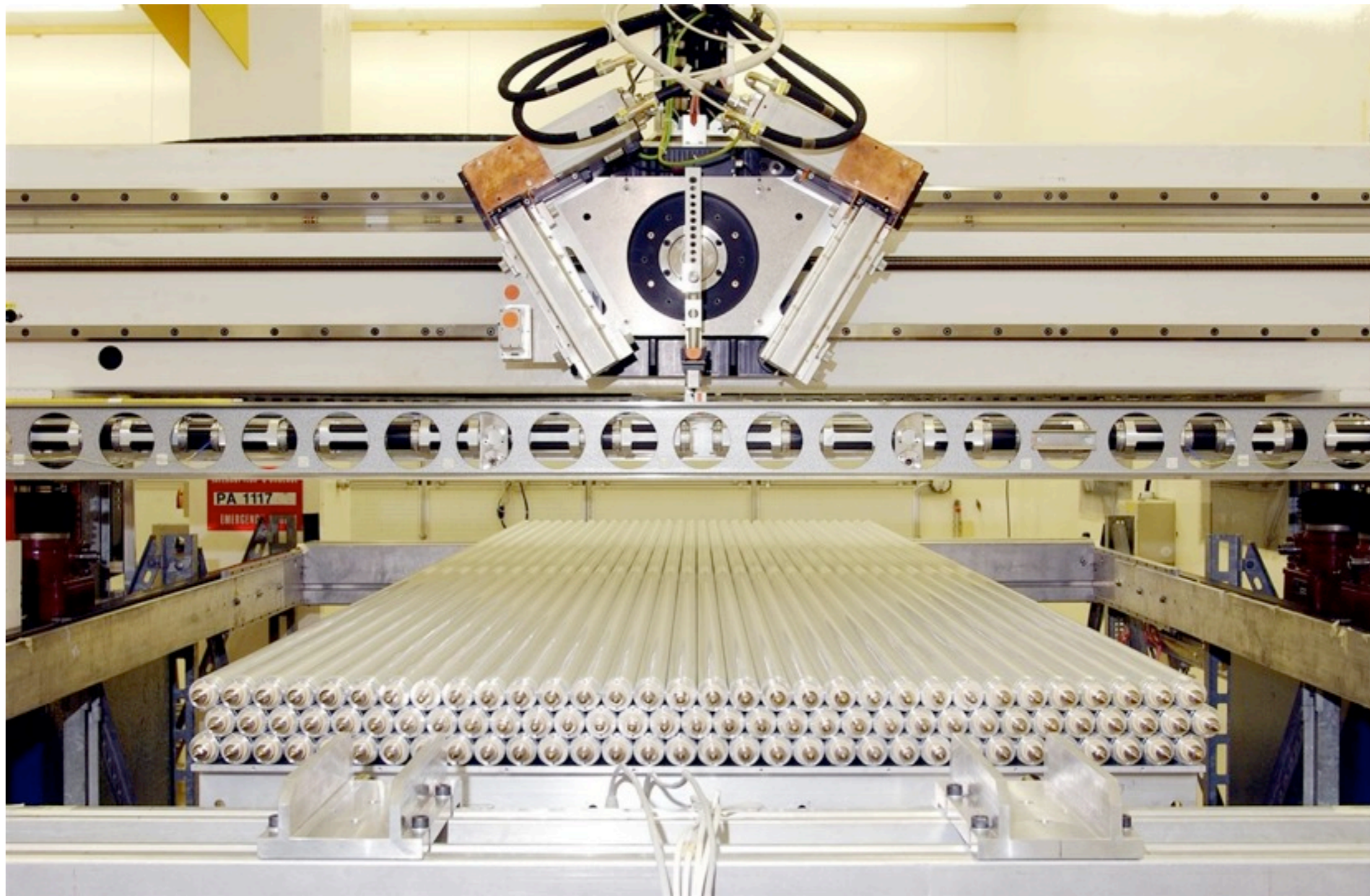
Calorimeters



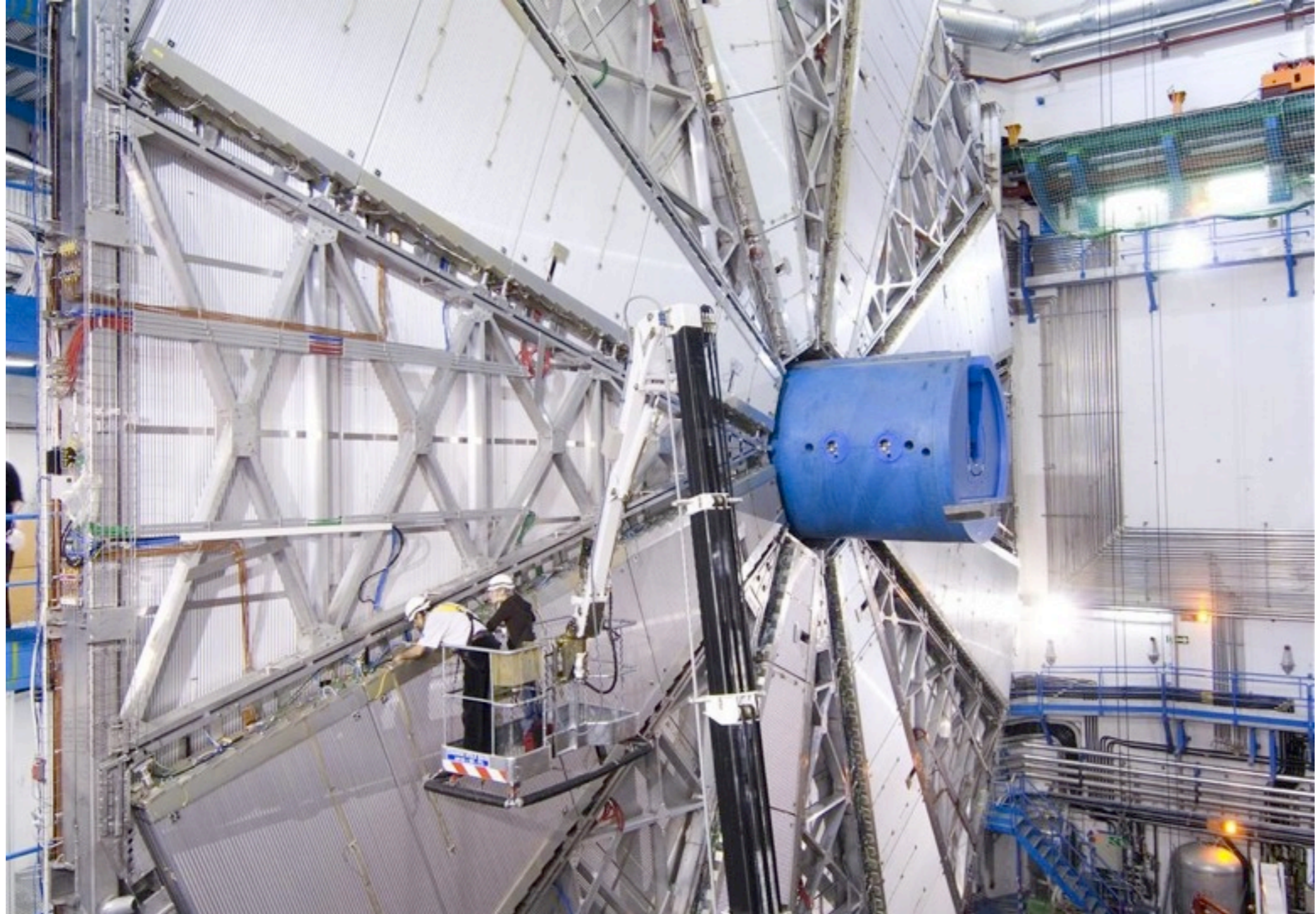
Calorimeters



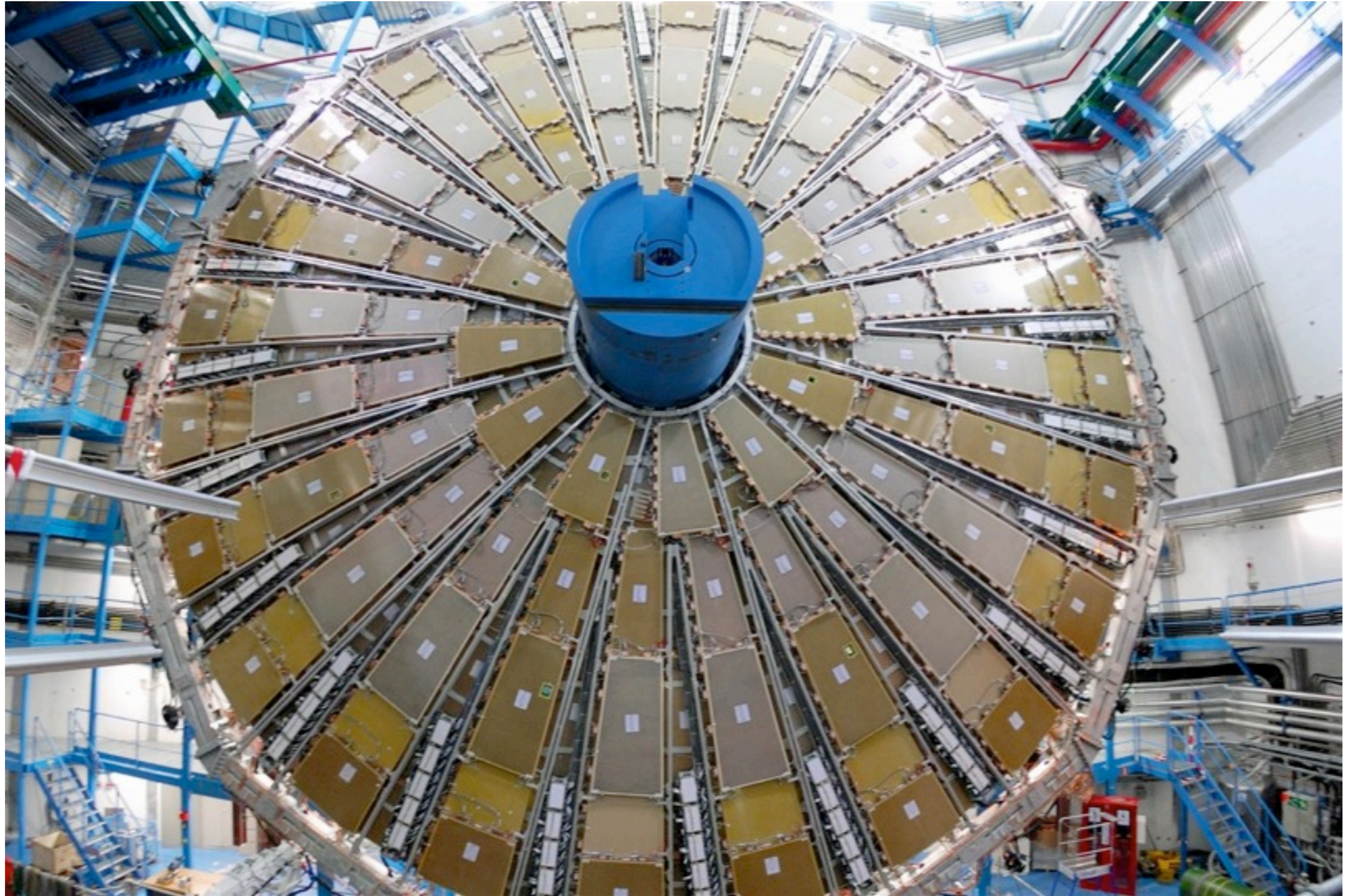
Muon-systemem



Muon-systemem

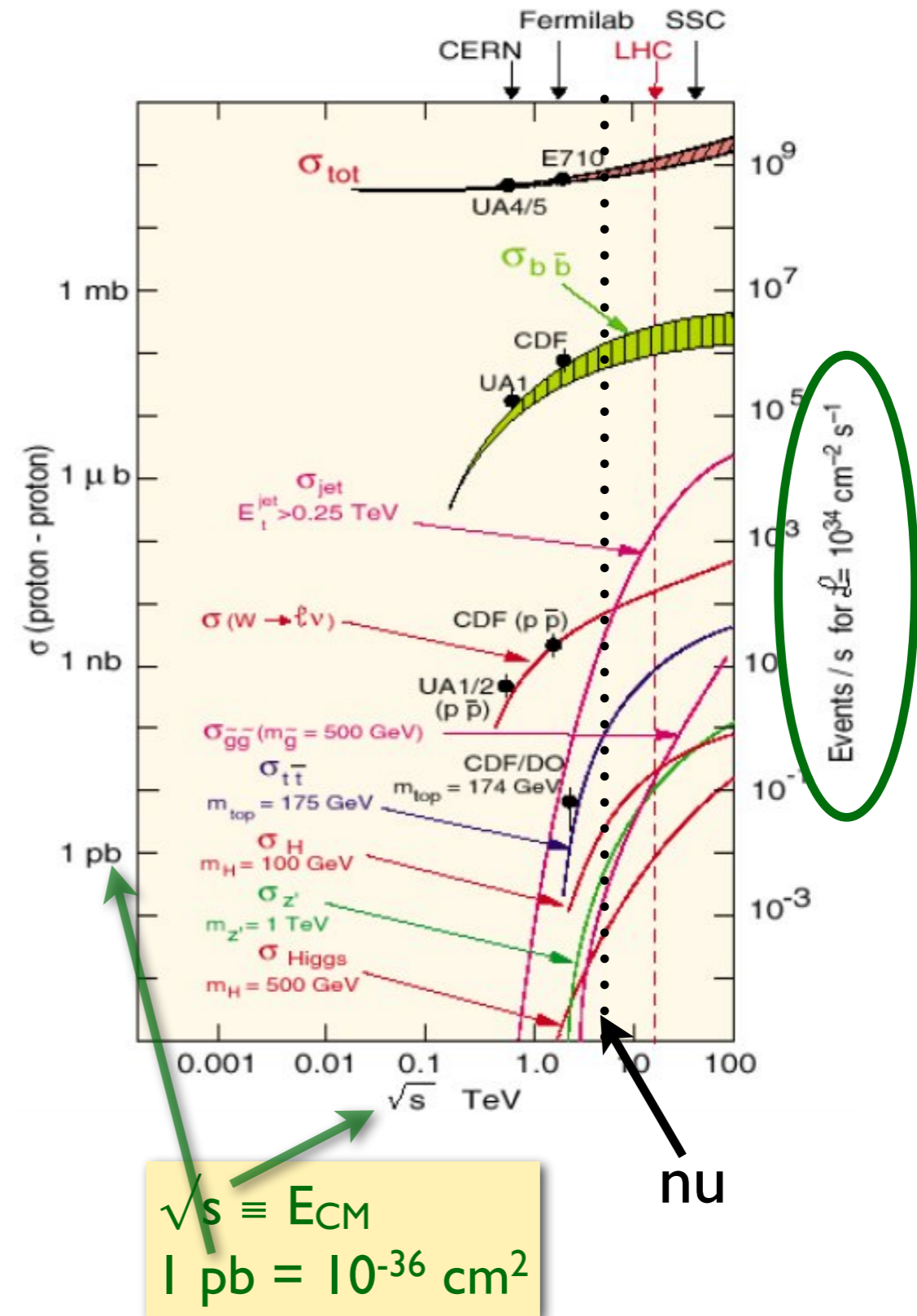


Muon-systemem



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
 - ~ 1 W-boson / s
 - $\sim 10^{-2}$ top-quarks / s
 - $\sim 10^{-4}$ Higgs-bosonen / s



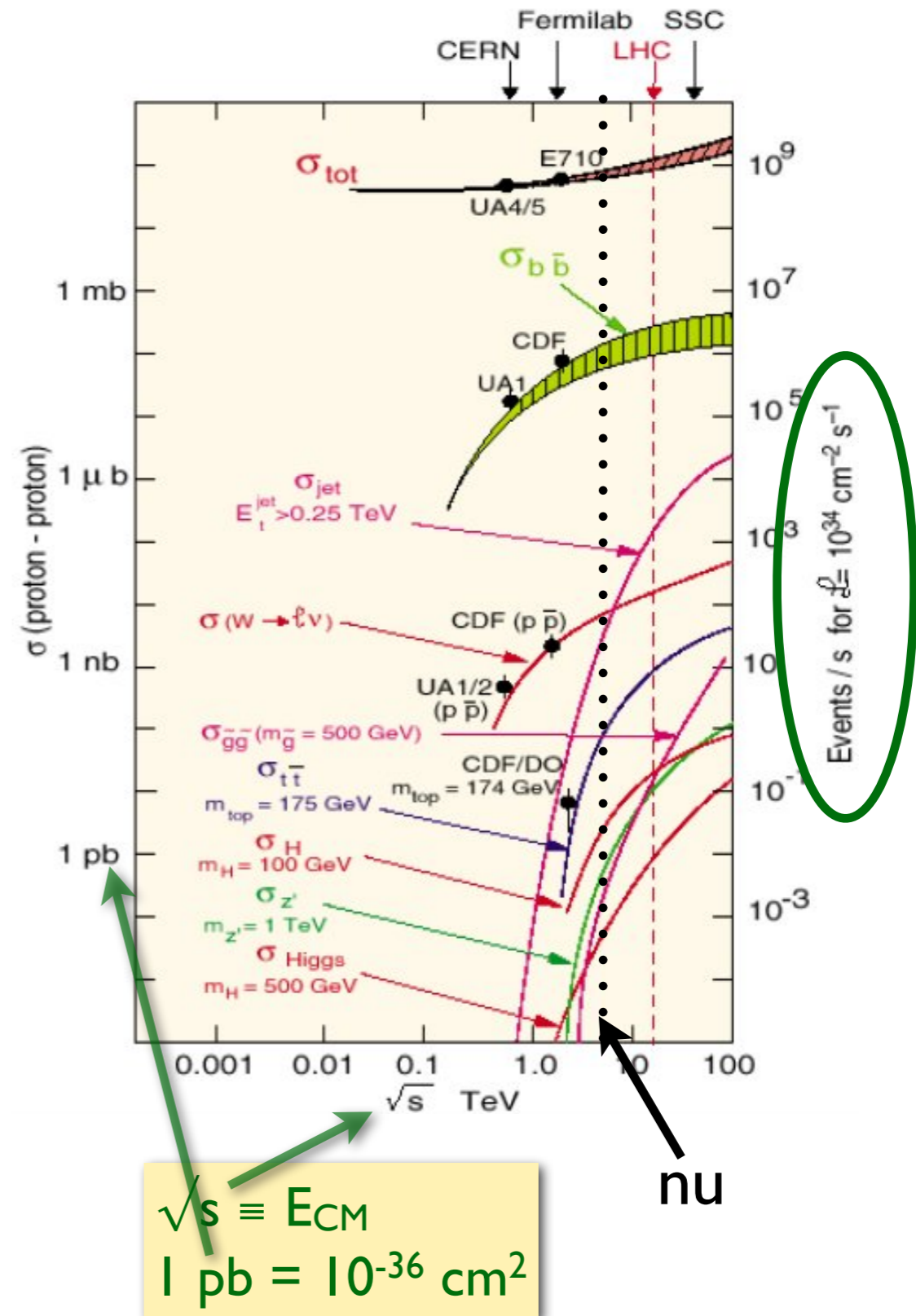
Experimentele condities

- 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
 - ~ 1 W-boson / s
 - $\sim 10^{-2}$ top-quarks / s
 - $\sim 10^{-4}$ Higgs-bosonen / s

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

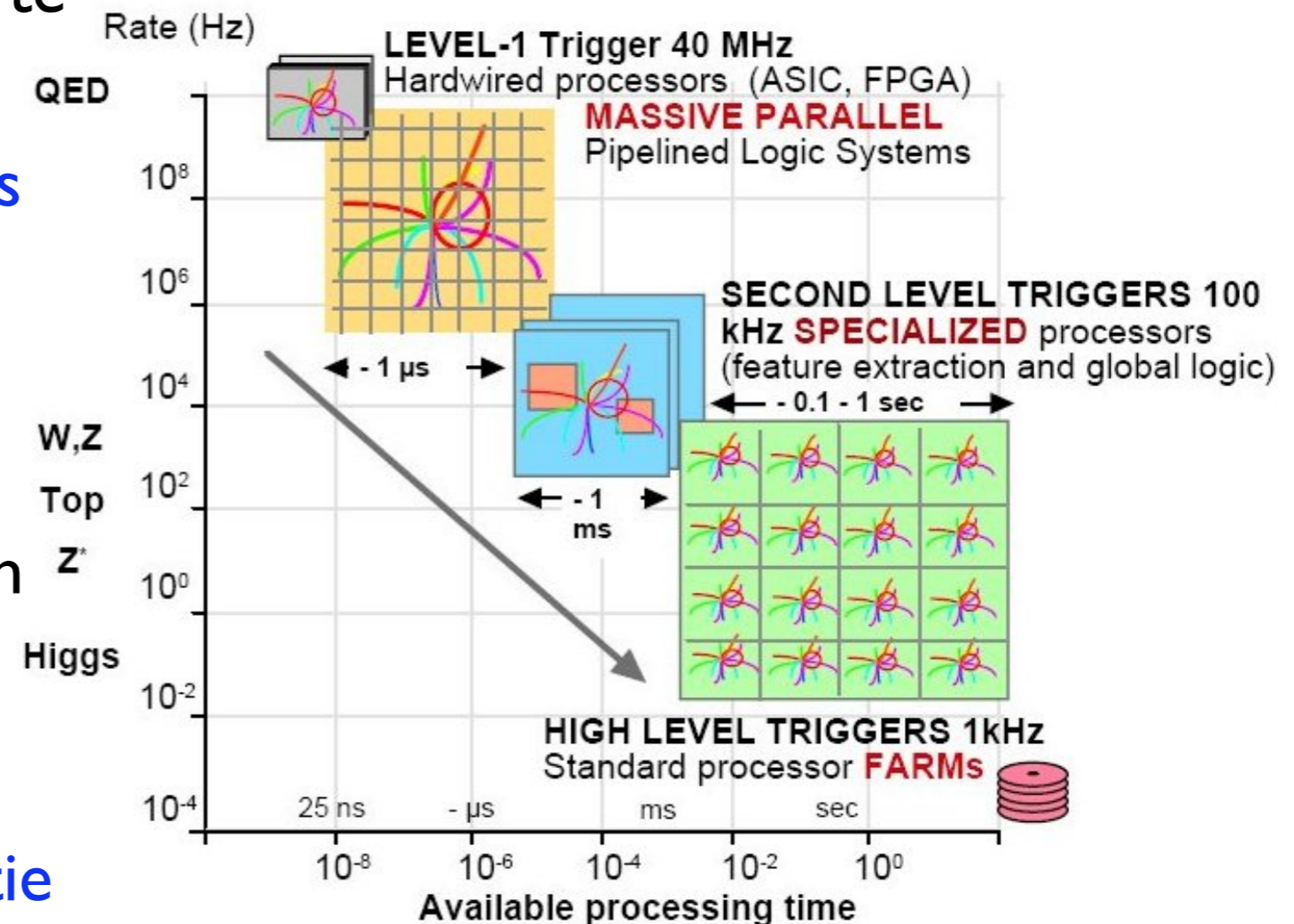
- bewaar $\sim 200 \text{ Hz}$
- vele interacties moeten “online” weggegooid worden

Trigger



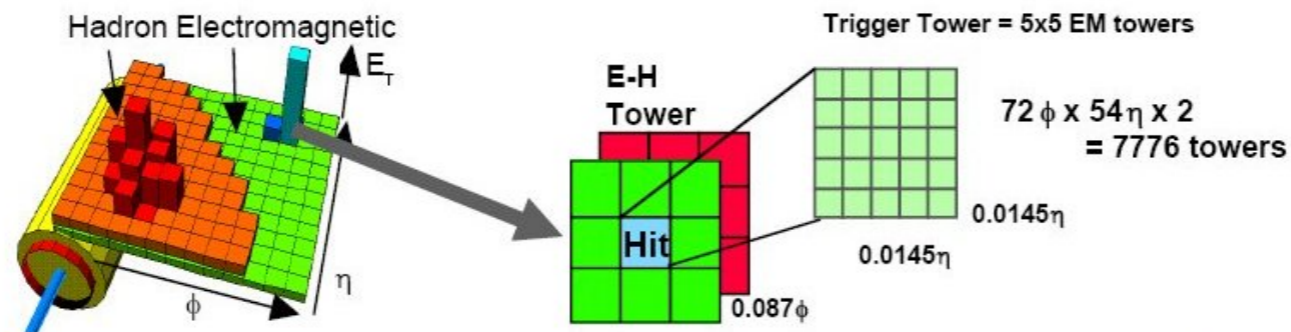
Trigger-strategie

- 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^e-niveau trigger



Een beslissing iedere 25 ns

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

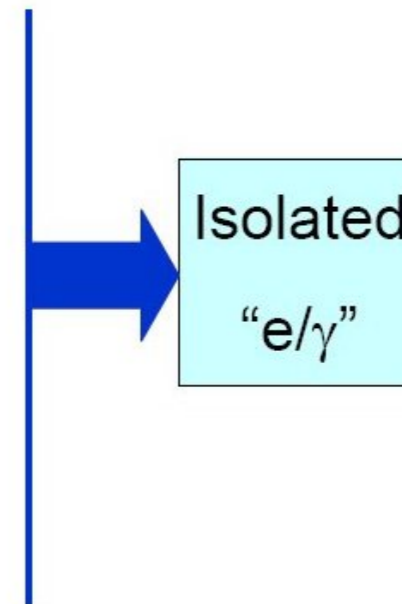


$$E_T(\text{Hit Tower}) + \max E_T(\text{Surrounding Towers}) > E_T^{\min}$$

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

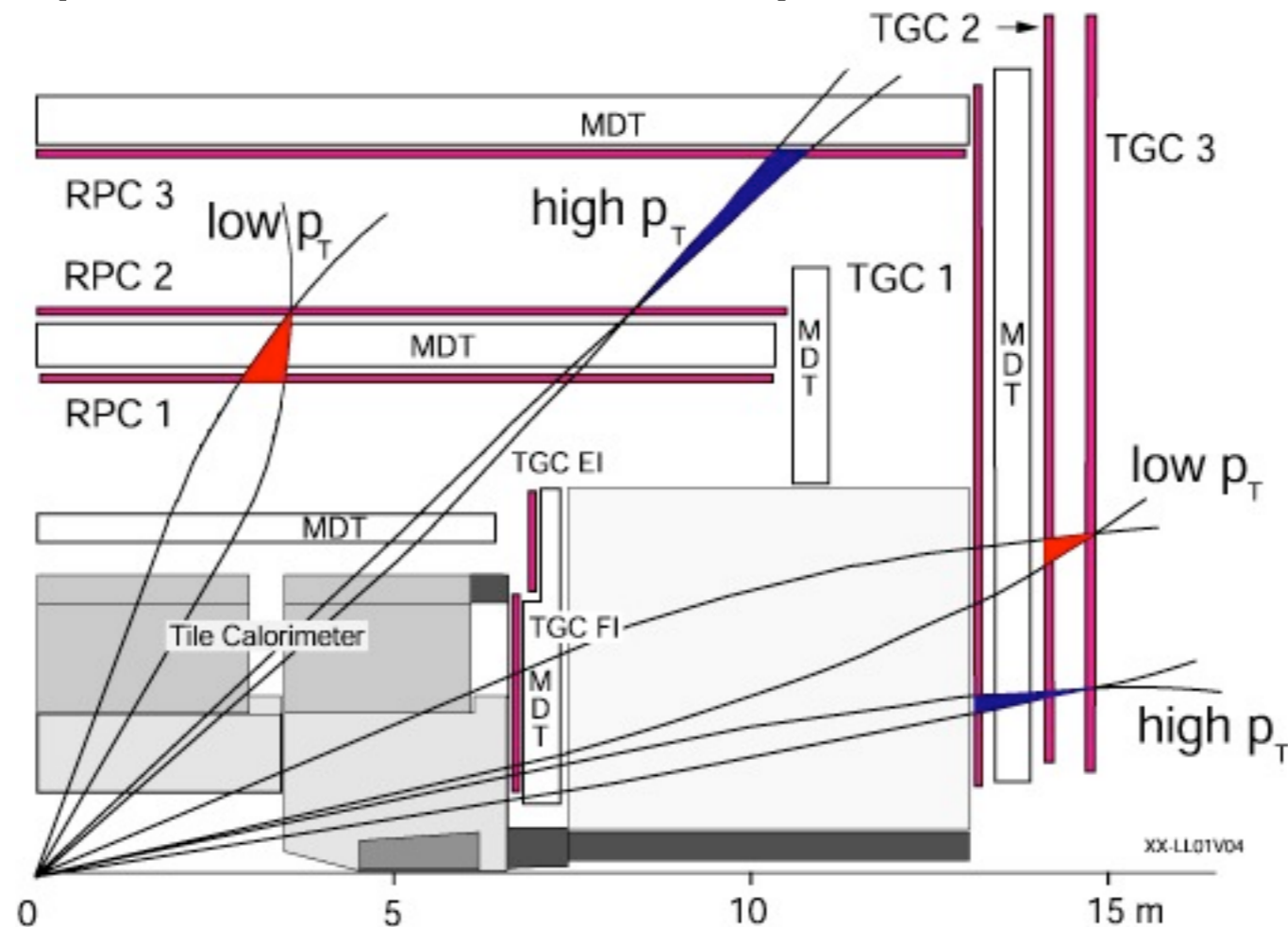
$$\text{At least 1 } E_T(\text{Surrounding Towers}) < E_{\text{iso}}^{\max}$$

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



Een beslissing iedere 25 ns

- 1^e niveau:
- patronen in calorimeters: e^\pm , γ , jets
- grofmazige patronen in het muon-systeem



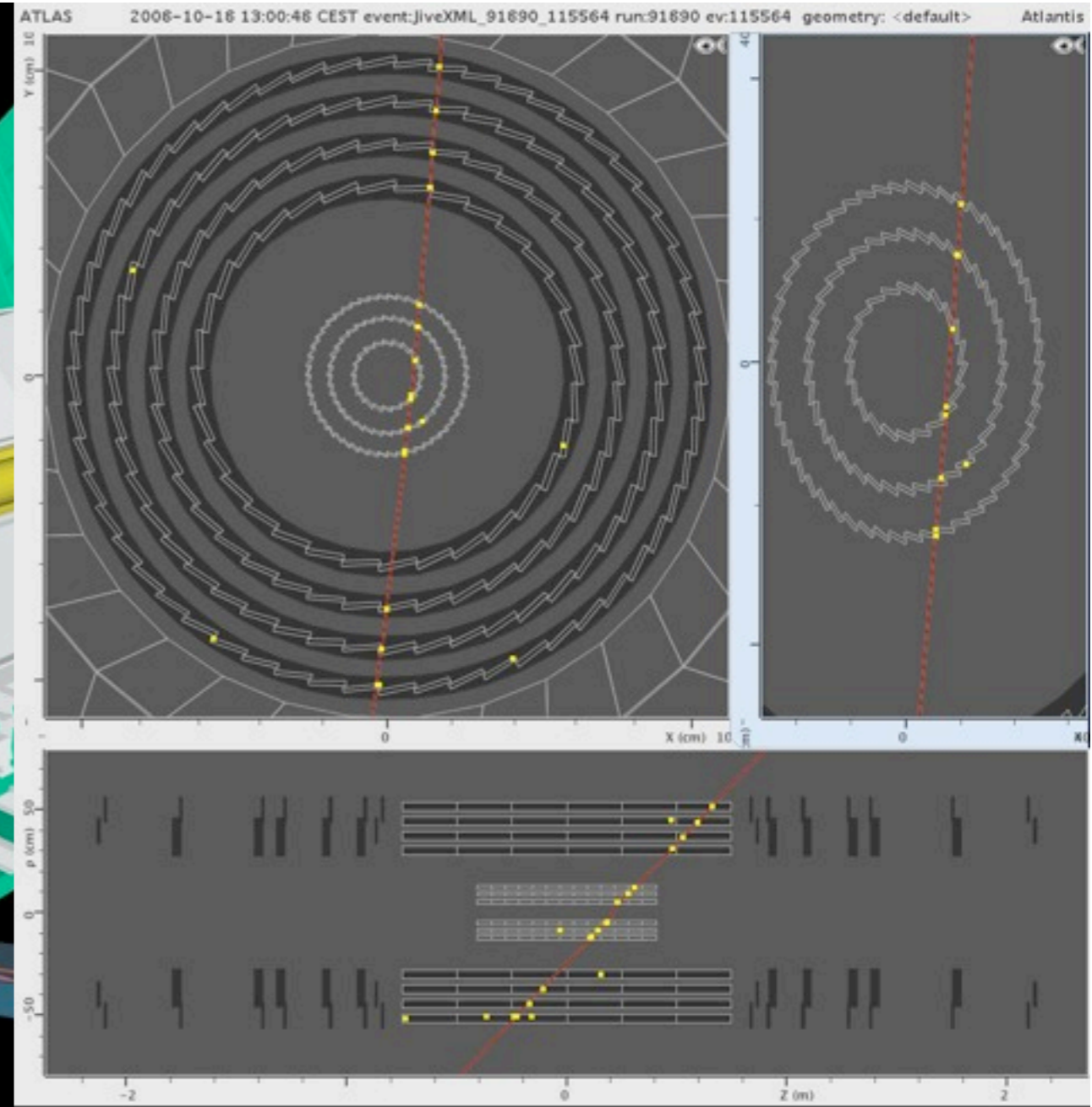
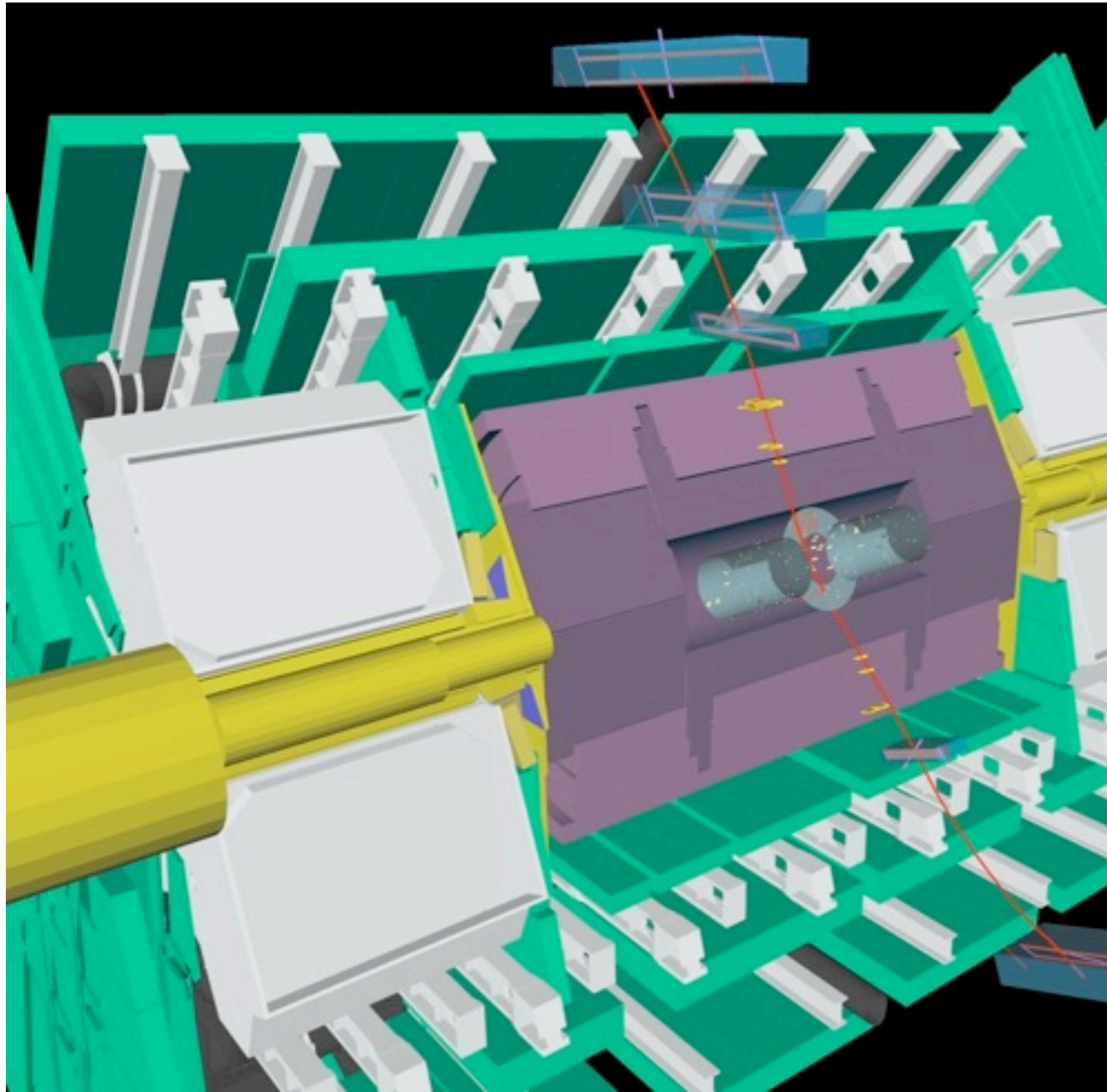
On-line data-reconstructie

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



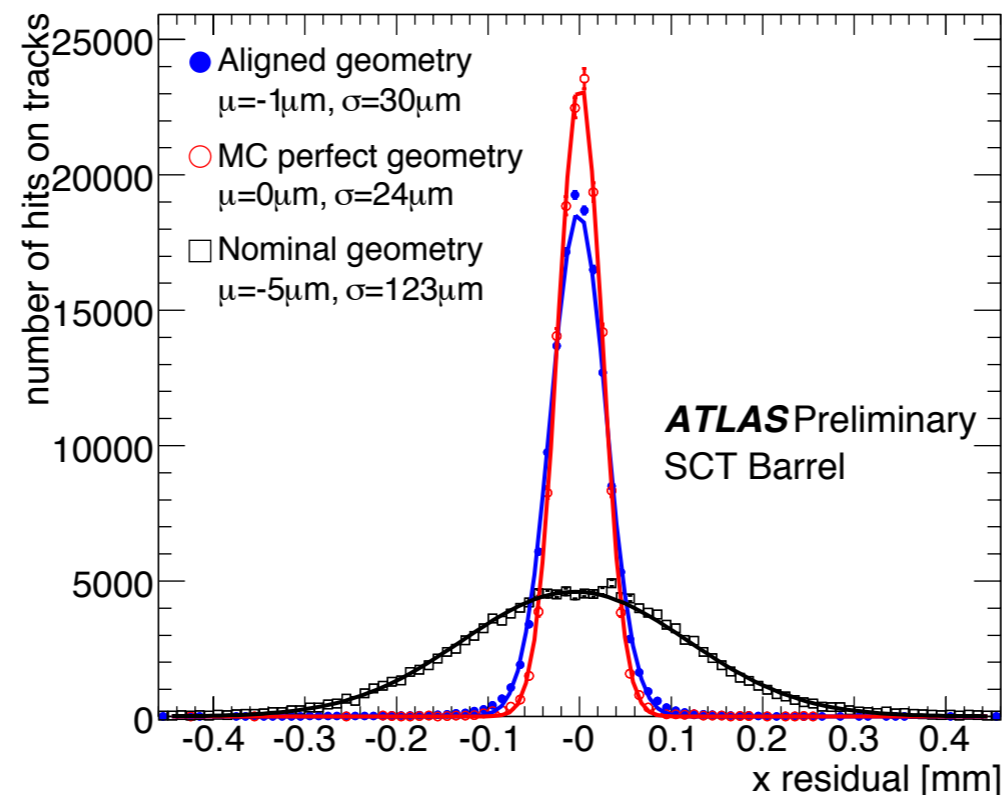
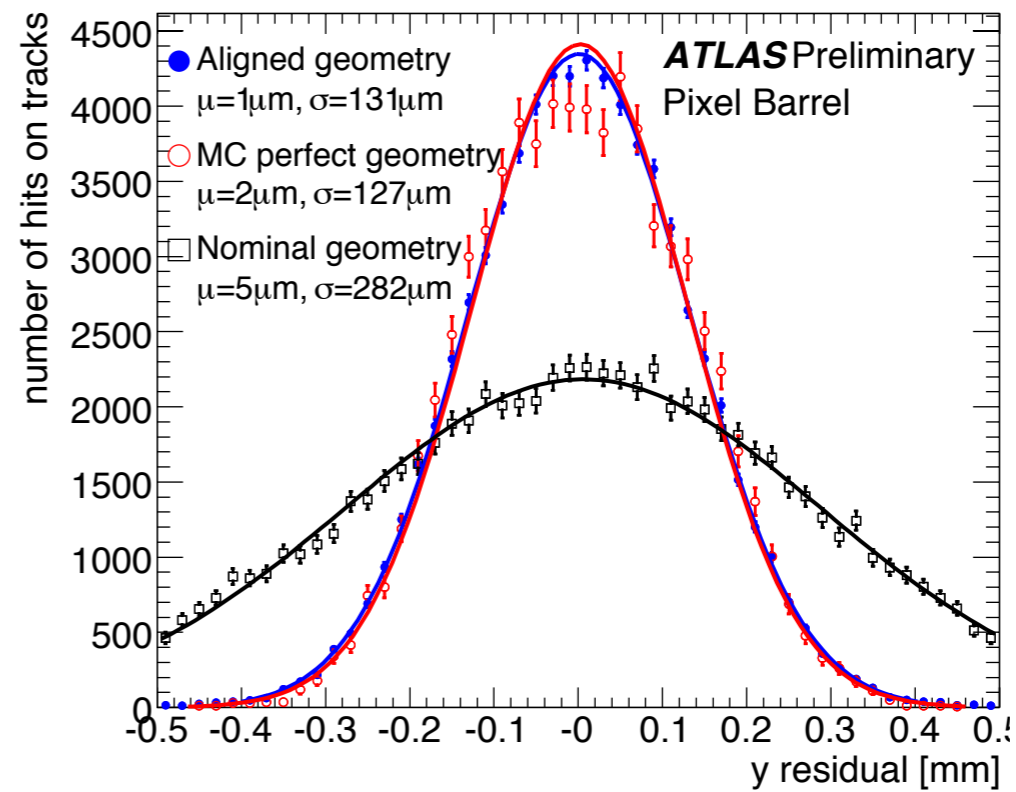
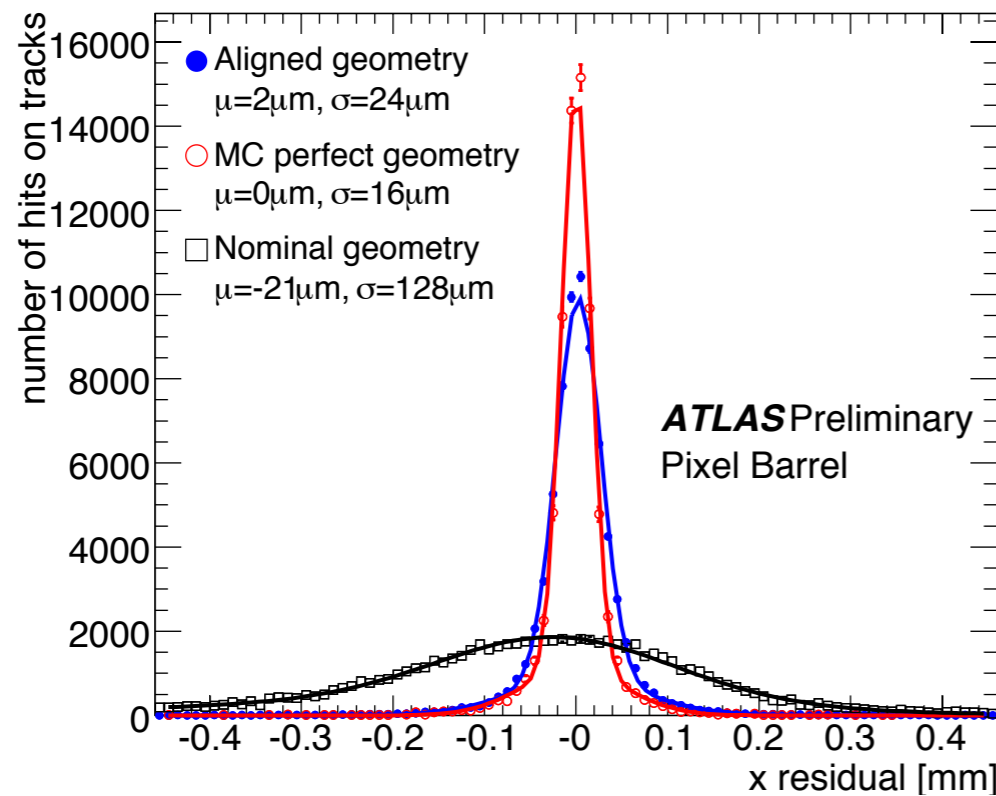
Kosmische en aardse botsingen

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



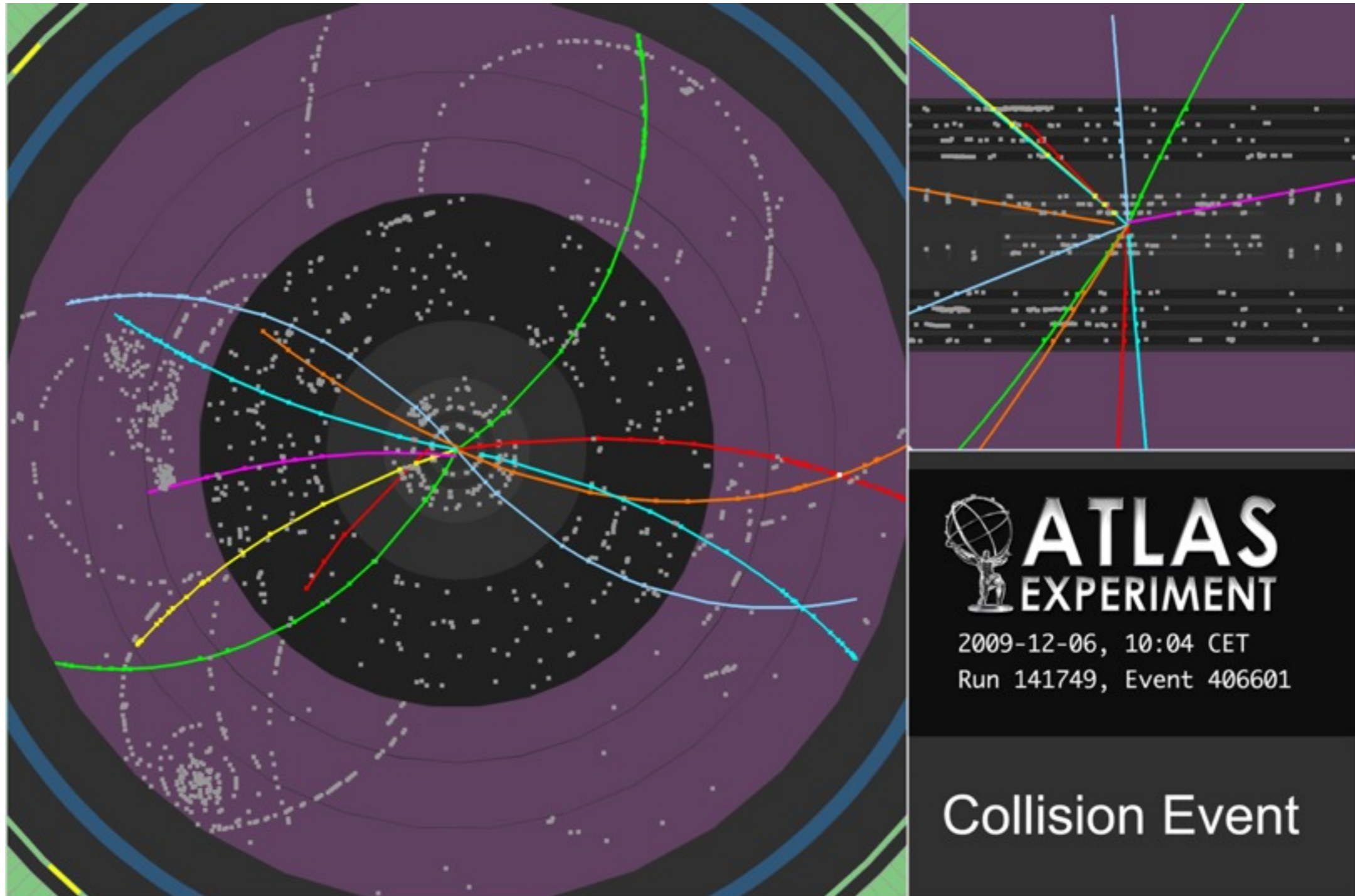
Kosmische en aardse botsingen

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



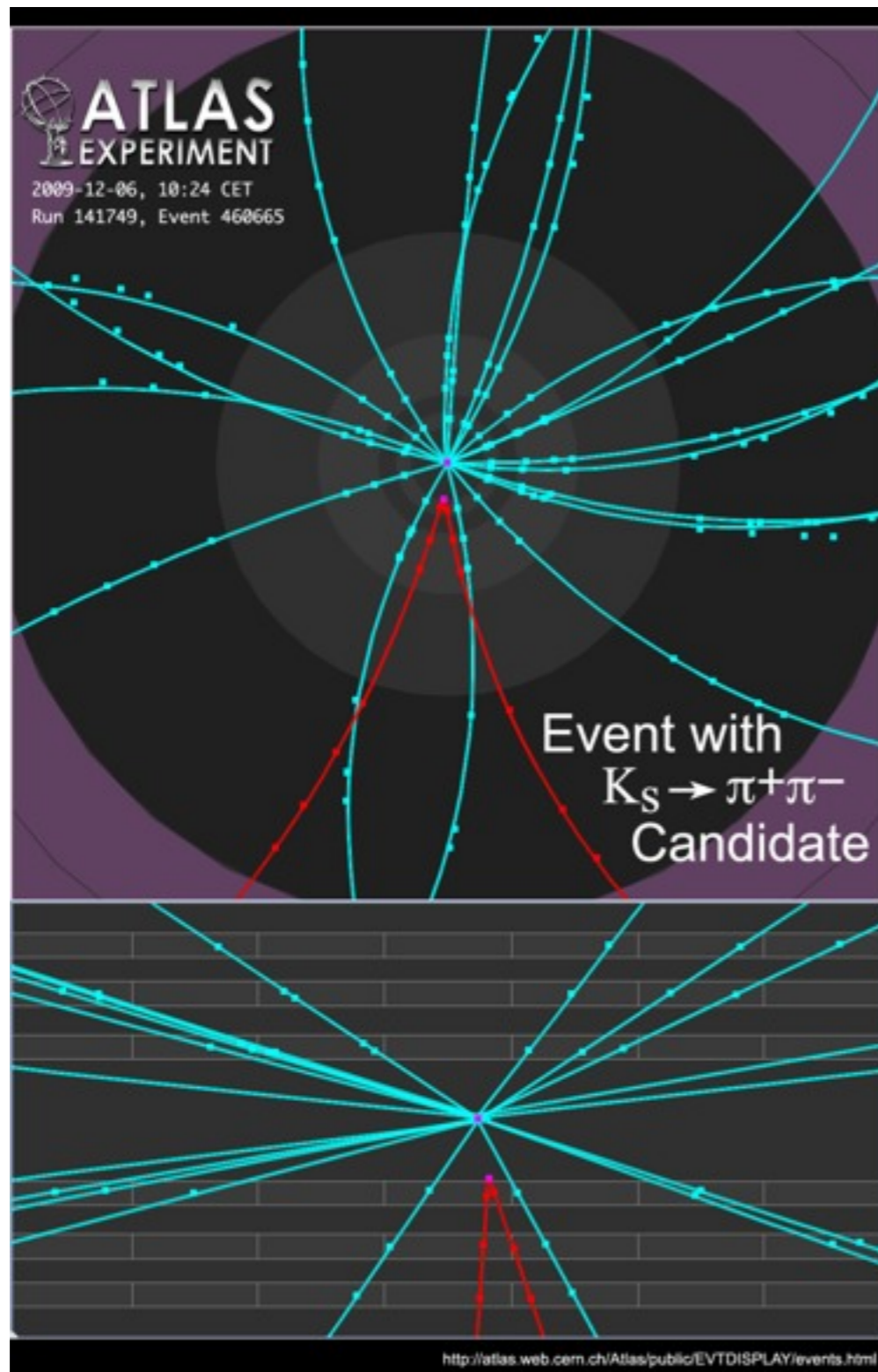
Kosmische en aardse botsingen

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



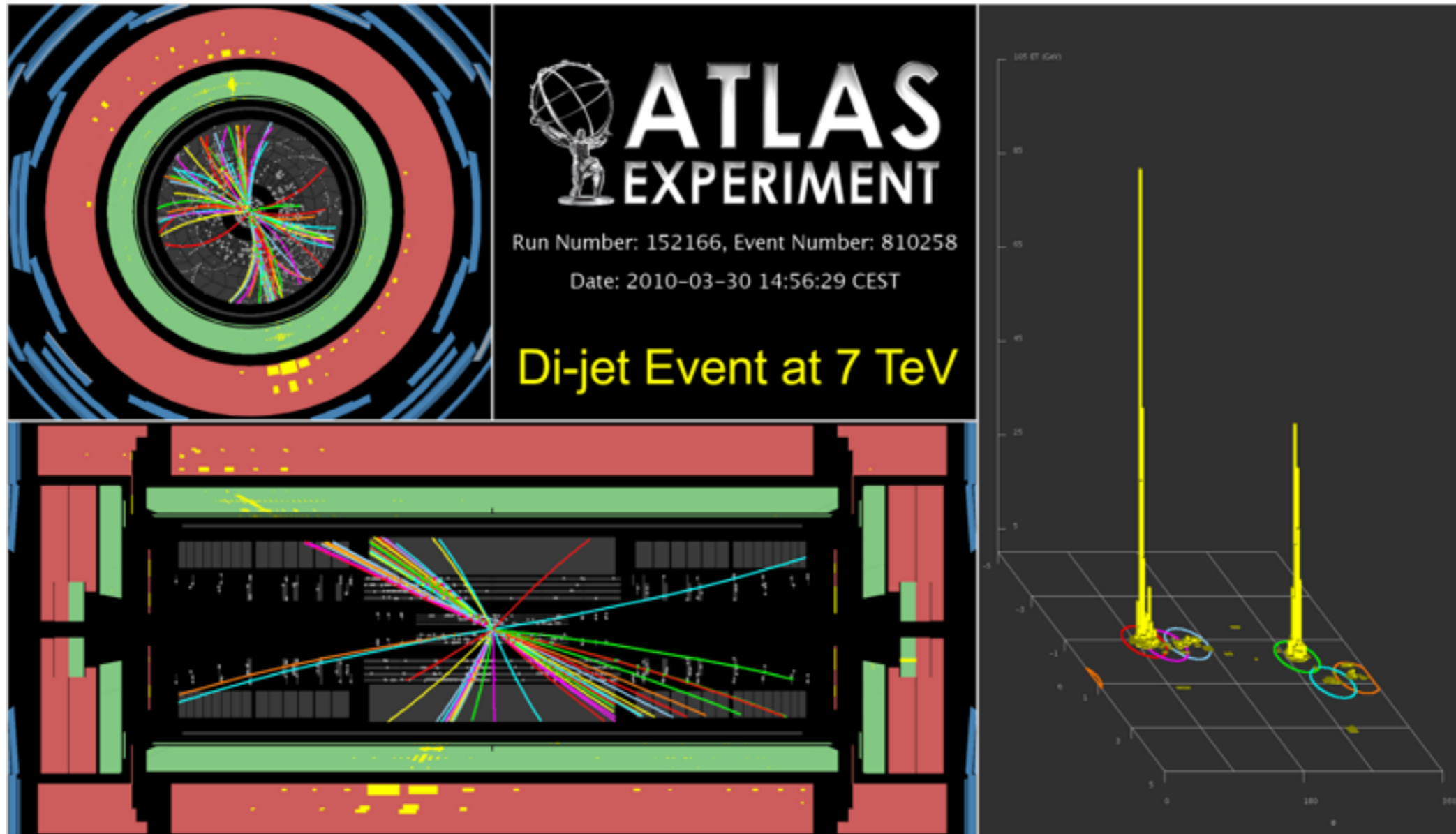
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

Het begin van fysica-analyse



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

Het begin van fysica-analyse

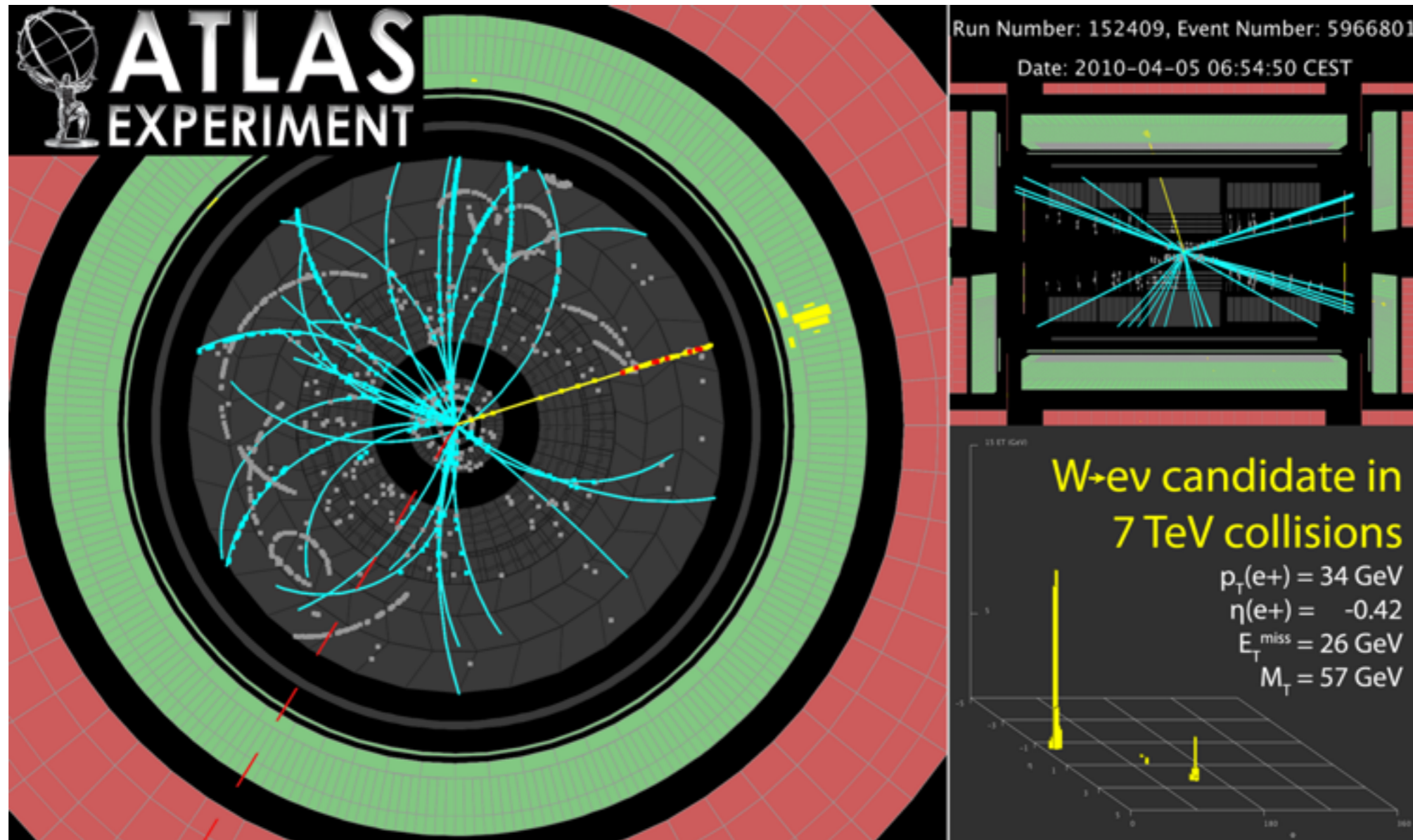


maart 2010: $E_{CM} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge p_T
- W- en Z-bosonen
- gedetailleerde calibraties

We zijn écht begonnen!

Het begin van fysica-analyse

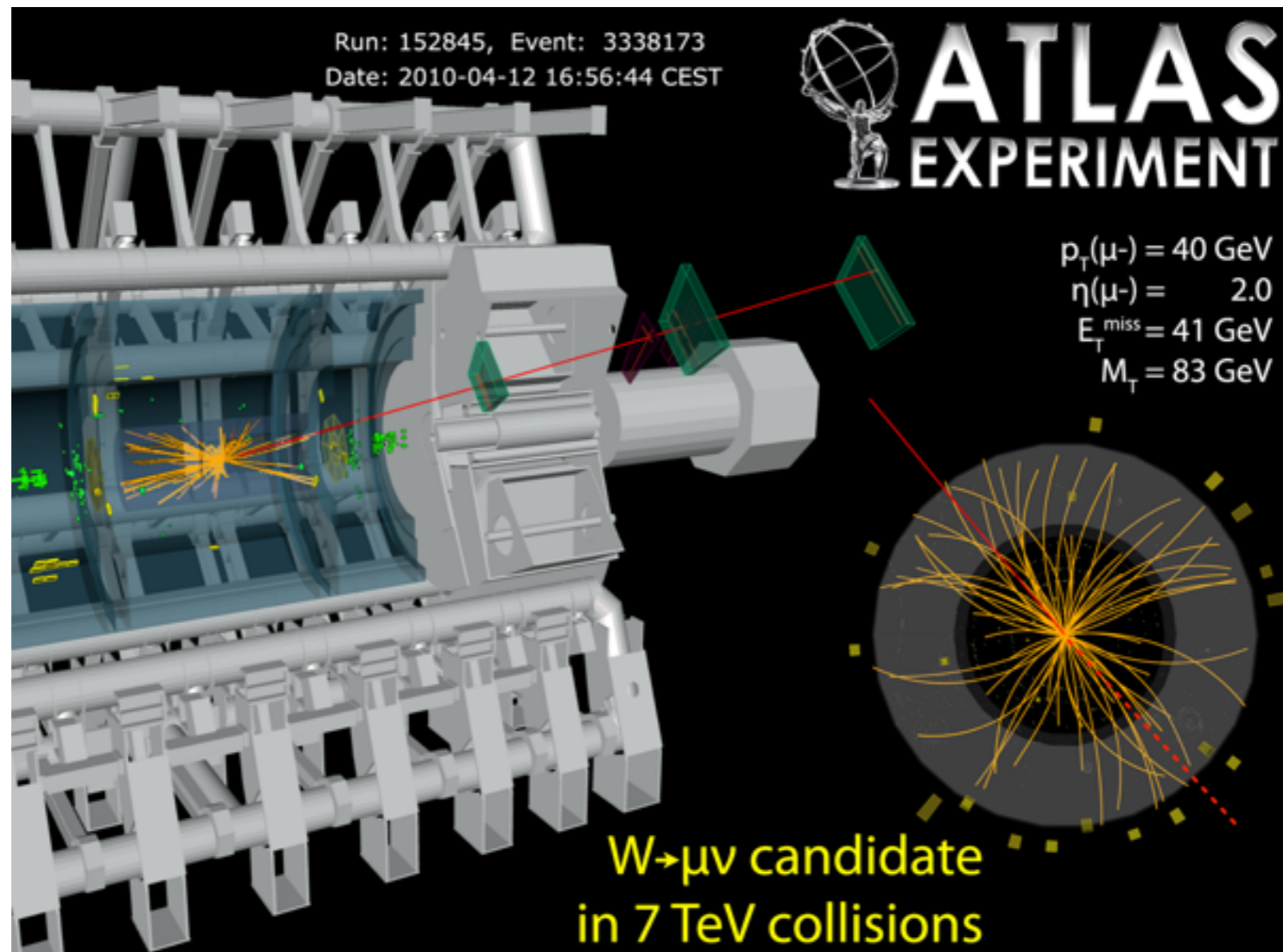


maart 2010: $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge p_T
- W- en Z-bosonen
- gedetailleerde calibraties

We zijn écht begonnen!

Het begin van fysica-analyse

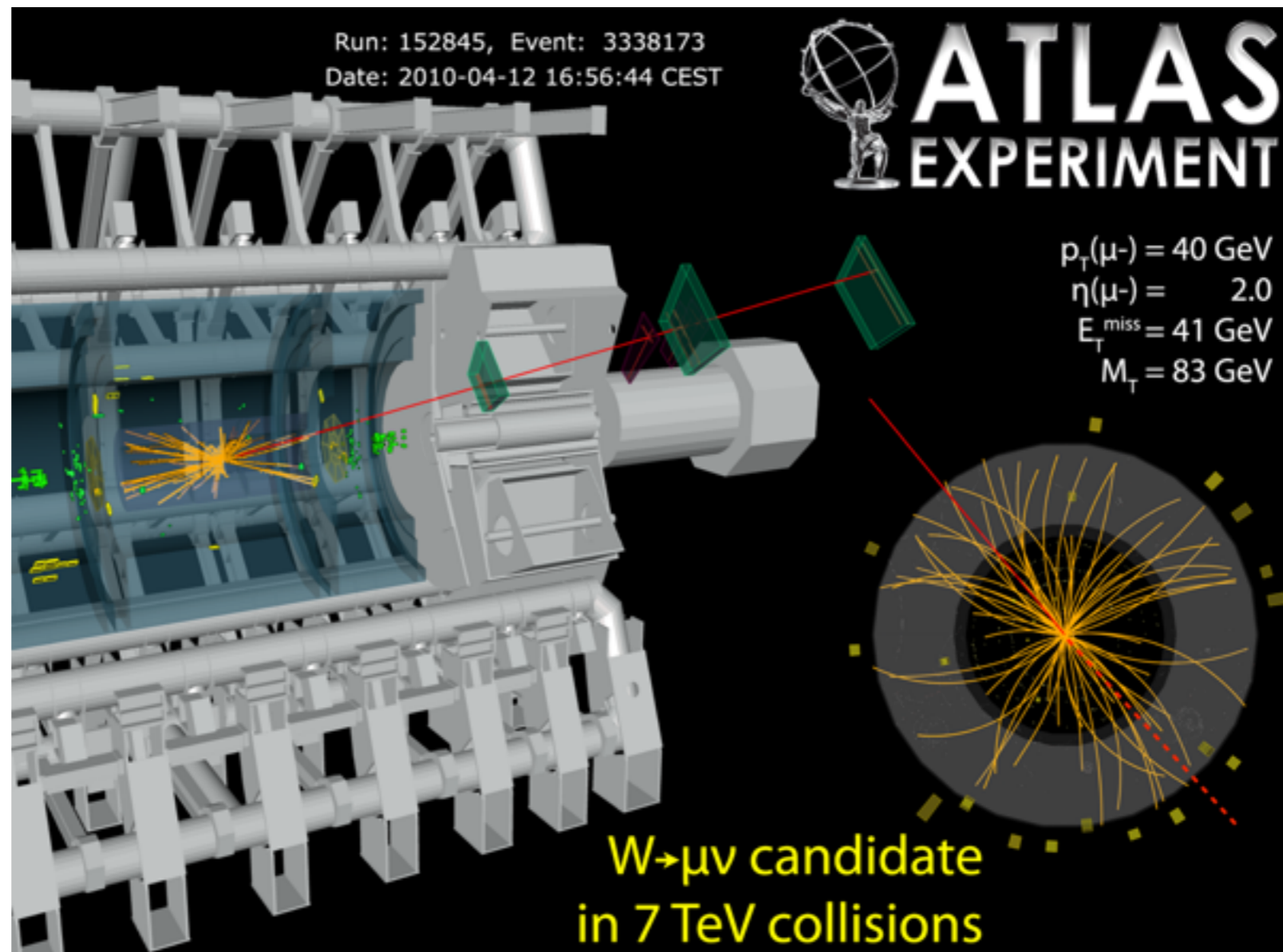


maart 2010: $E_{\text{CM}} = 7 \text{ TeV}$

- jets met hoge p_T
- W- en Z-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- en Z-bosonen
- gedetailleerde calibraties

We zijn écht begonnen!

Planning:

- 2010 – 2011: $E_{\text{bundel}} = 3.5 \text{ TeV}$
- 2012: LHC-”upgrade”
- 2013 – 20xx: $E_{\text{bundel}} = 7 \text{ TeV}$

De toekomst



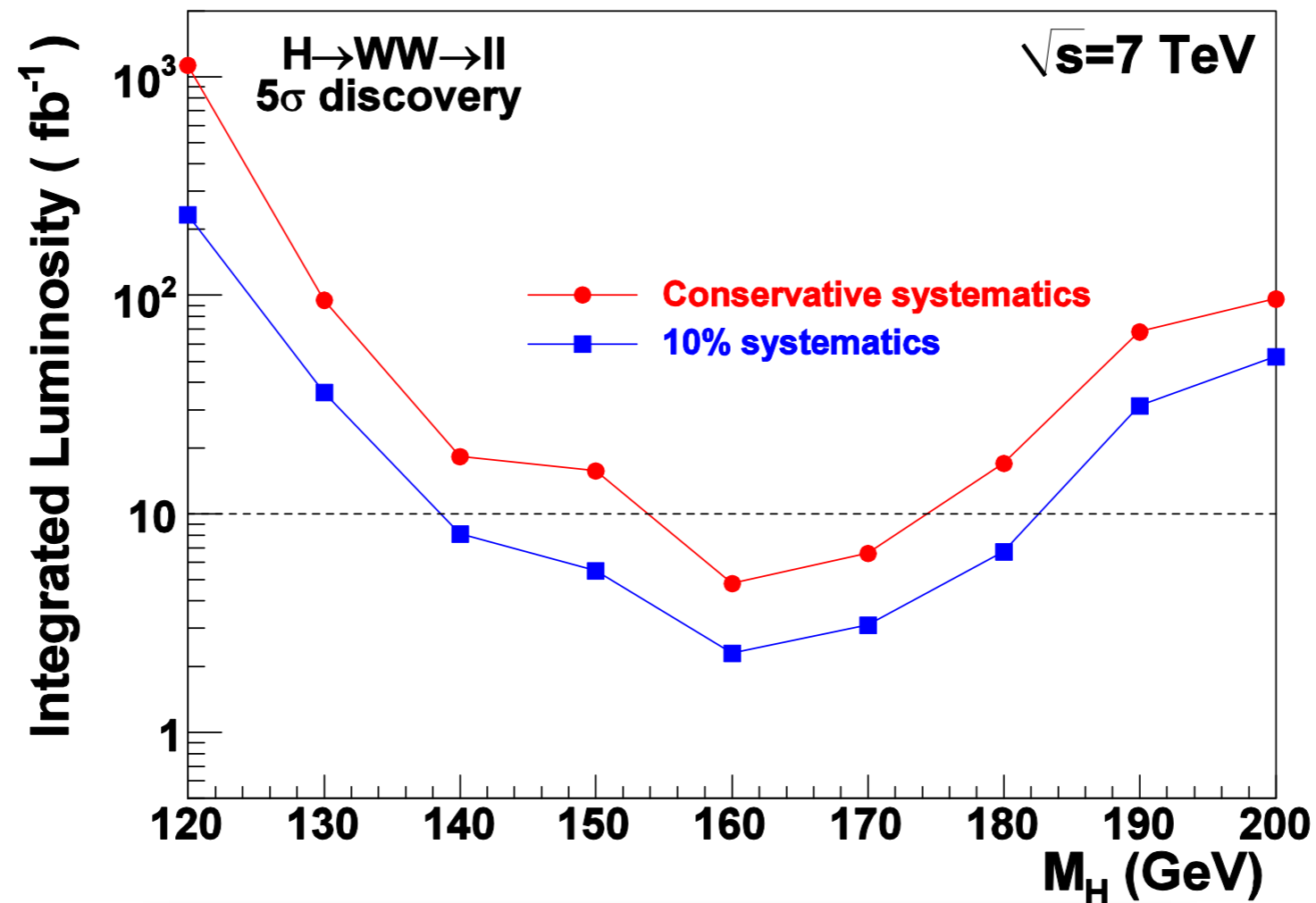
gaspirtz.com

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

De toekomst

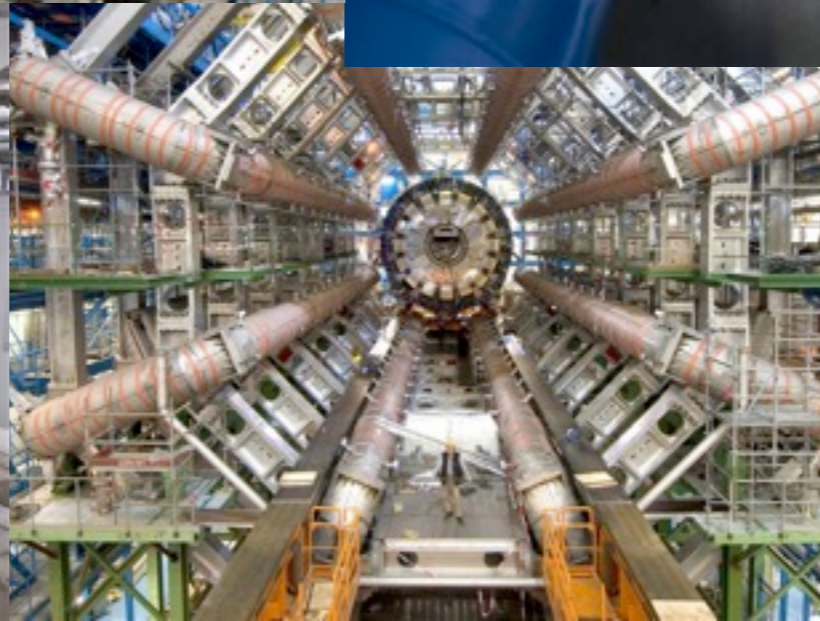
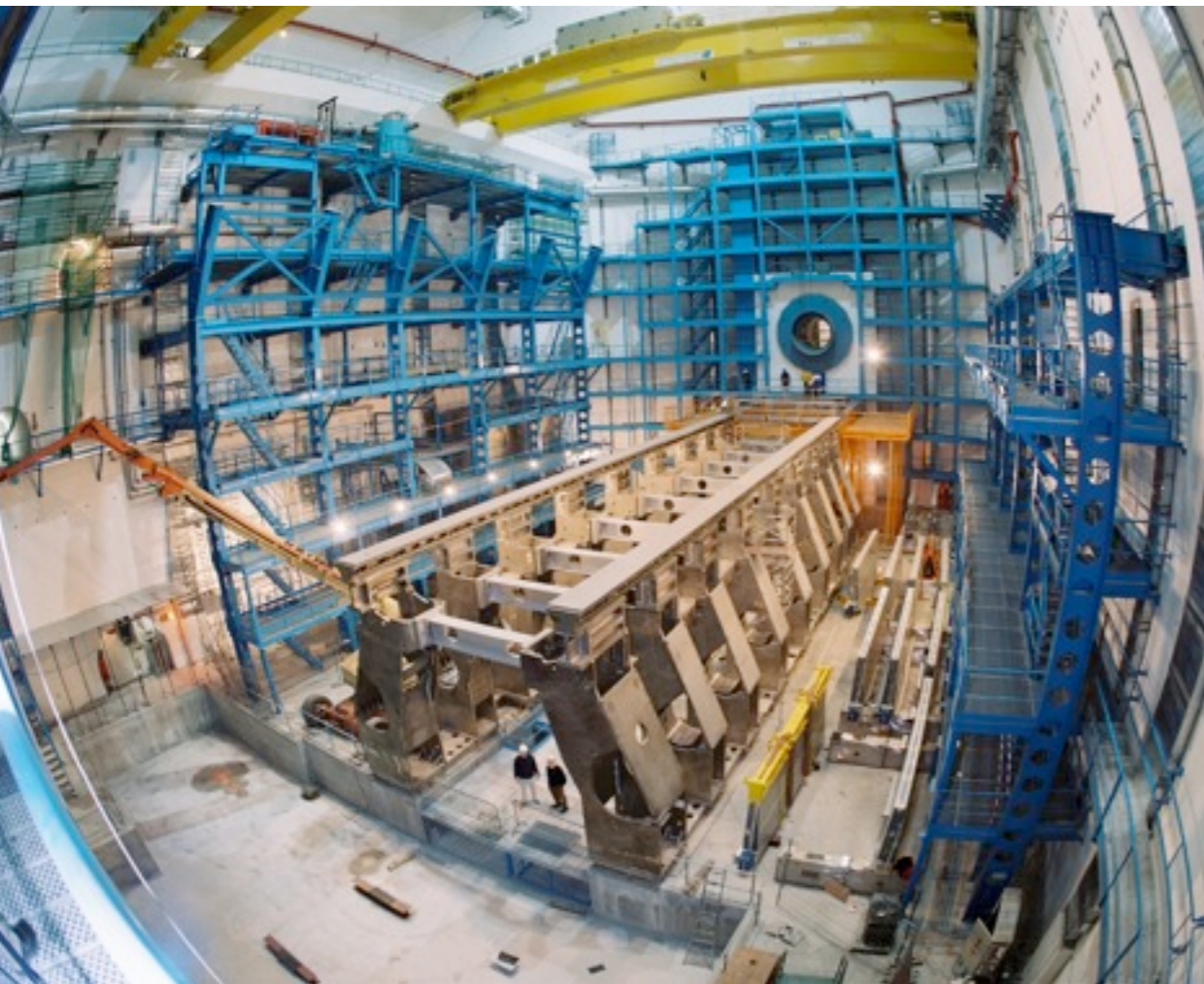
- De eerste fysica-publicatie is de deur uit
- Op naar vele andere!

LHC sensitivity ($H \rightarrow WW$ mode only)



Zicht op het Higgs-boson in 2011??

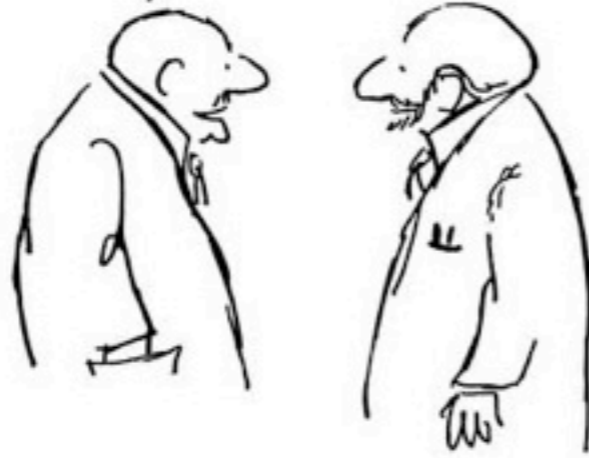
Goede reis!



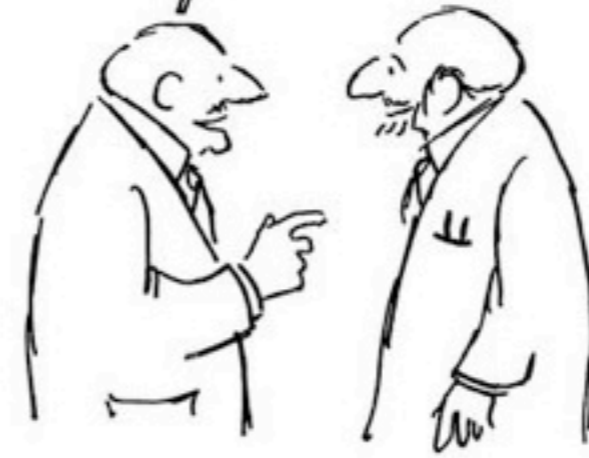
Bedankt voor jullie aandacht!

© Cartoonbank.com

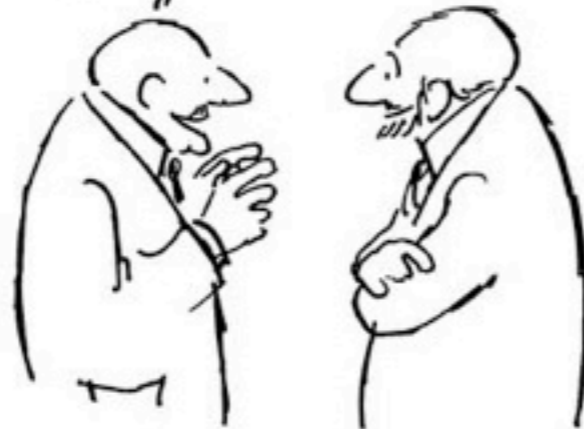
$$K_{\sqrt{1+\frac{3}{4}N}} \cdot \sum_{q=1}^{\infty} \frac{1}{q-c} 2$$



$$3.6 \pi \frac{\hat{\Delta} R}{b \frac{c}{8}} \rightarrow 7.3 \left(\frac{z n_i}{\tau} \right) R$$

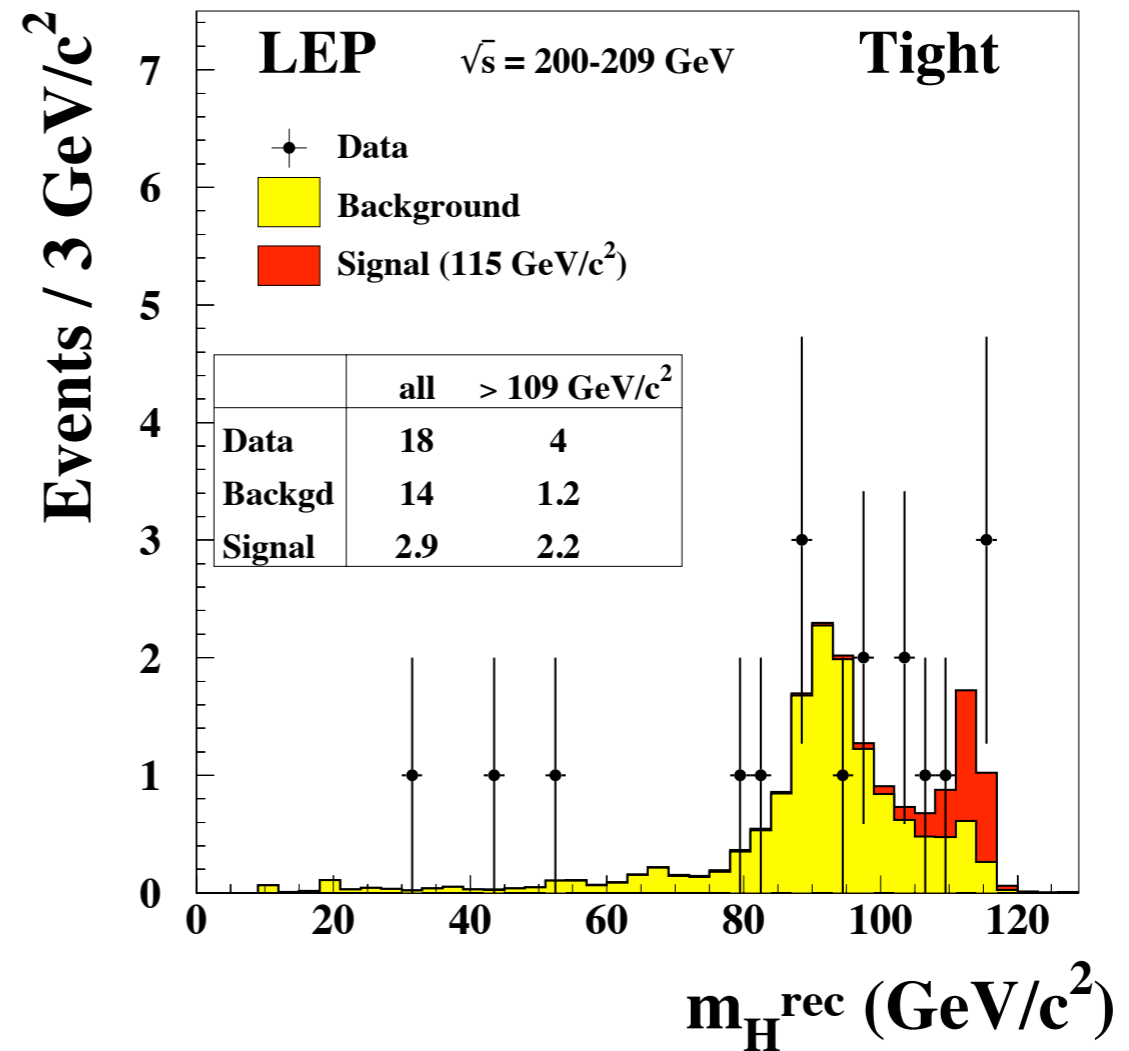
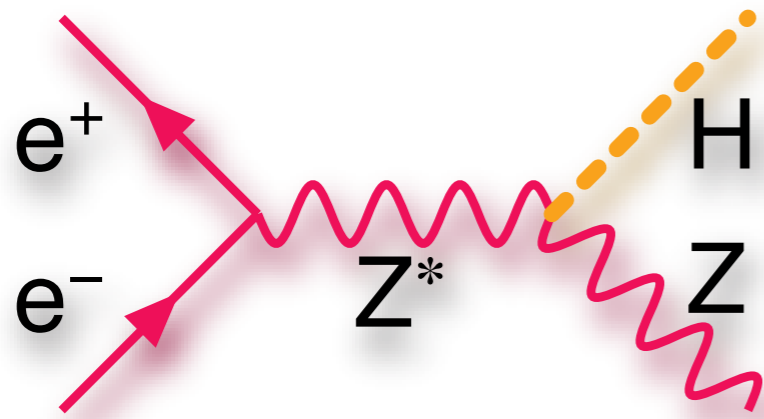


$$\frac{\lambda^3}{6N} \leq B + \sqrt{5}e = 2 \cdot \frac{6R^3}{\pi^4}$$



LEP Higgs Boson Search

- Searches at LEP dominated by ZH associated production (“Higgsstrahlung”)



- Example distribution (also other variables used)

H → W⁺W⁻ Selection

Final state	eμ	ee	μμ
Preselection	2 opposite-charge leptons, $p_T^\ell > 10\text{--}15$ GeV, $M_{\ell\ell} > 30$ GeV; μμ: $\Delta R(\mu, \text{jet}) > 0.1$, $p_T^{\mu 1} > 20$ GeV		
$\Delta\phi(\ell, \ell)$ (rad)	< 2	< 2	< 2
E_T (GeV)	> 20	> 20	> 25
E_T^{scaled}	> 6	> 6	—
$M_T^{\text{min}}(\ell, \vec{E}_T)$ (GeV)	> 20	> 30	> 20

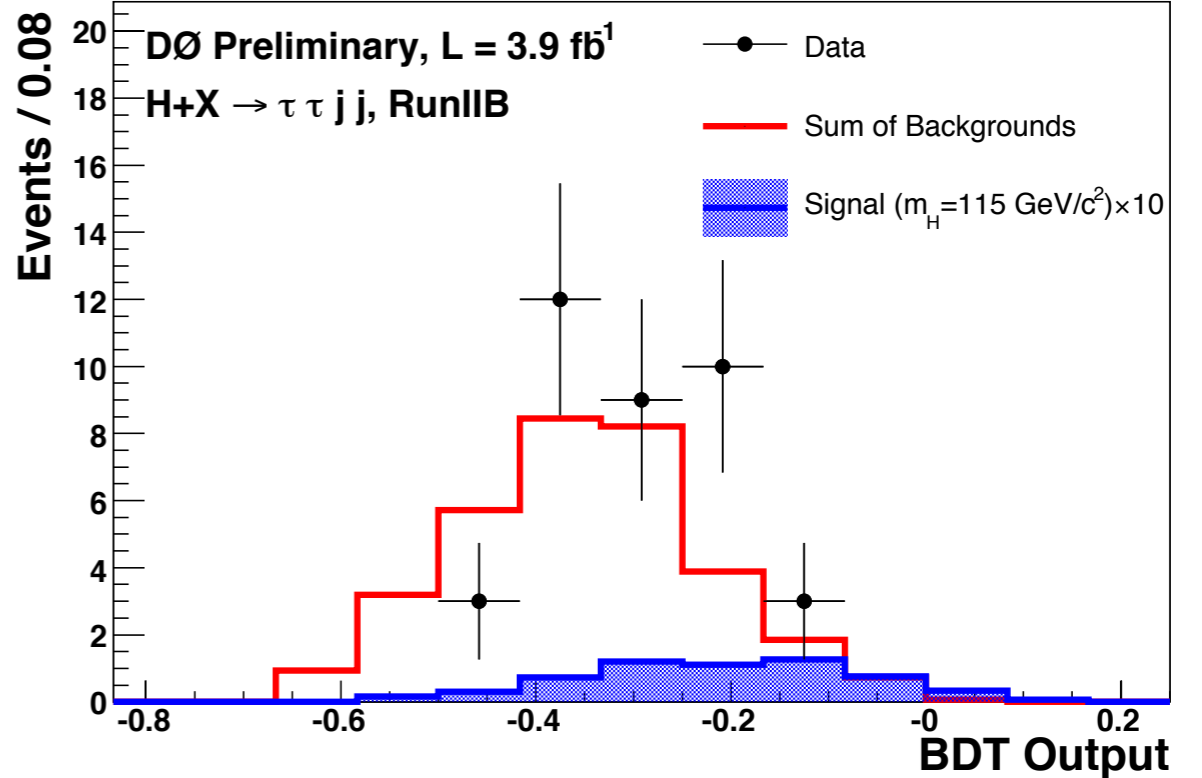
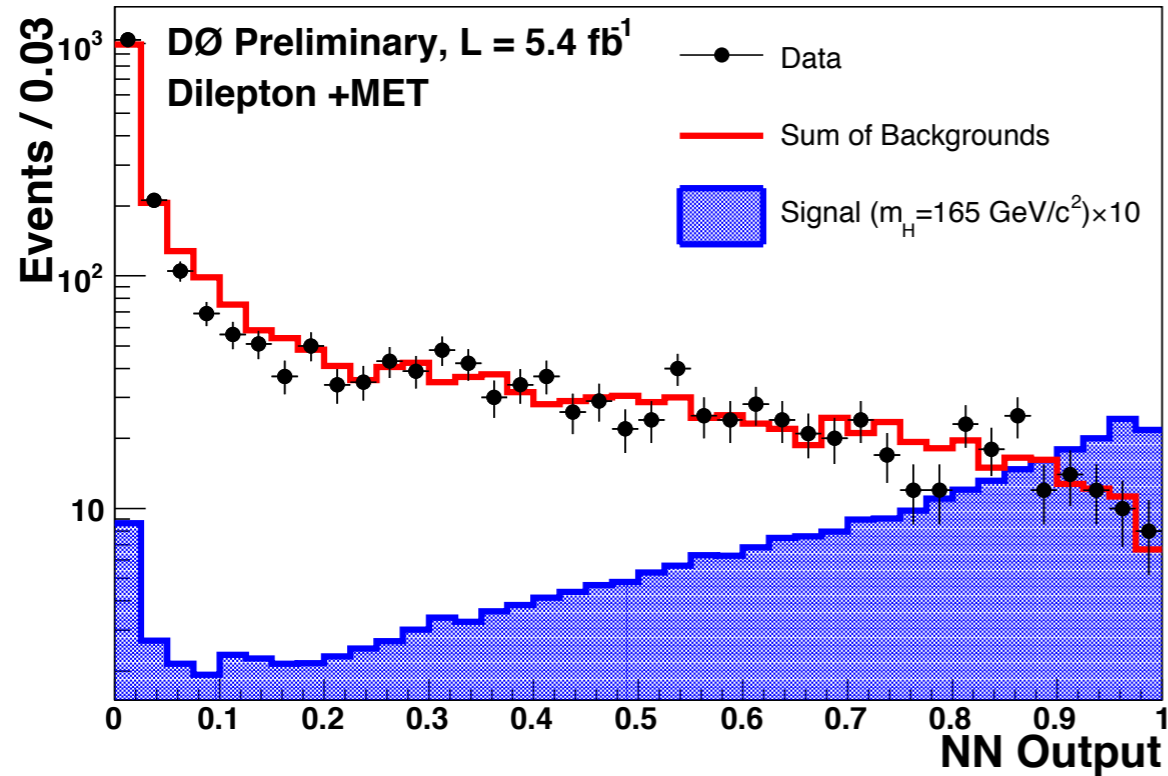
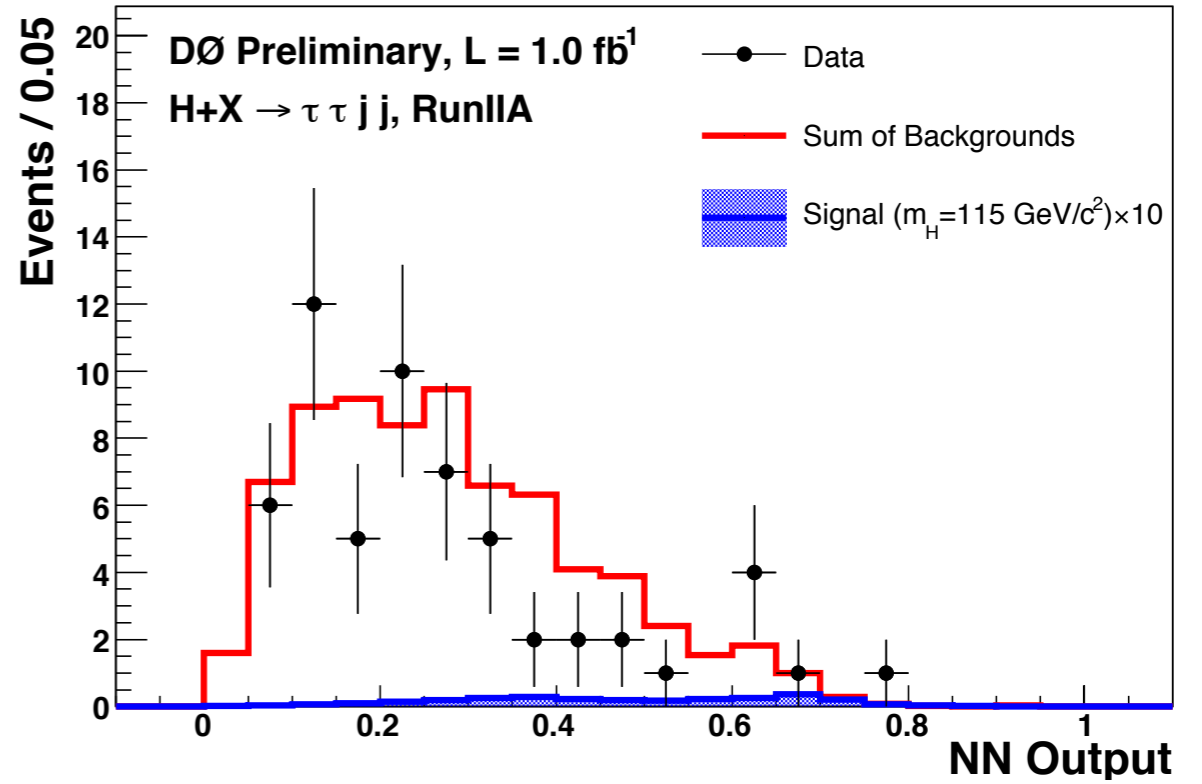
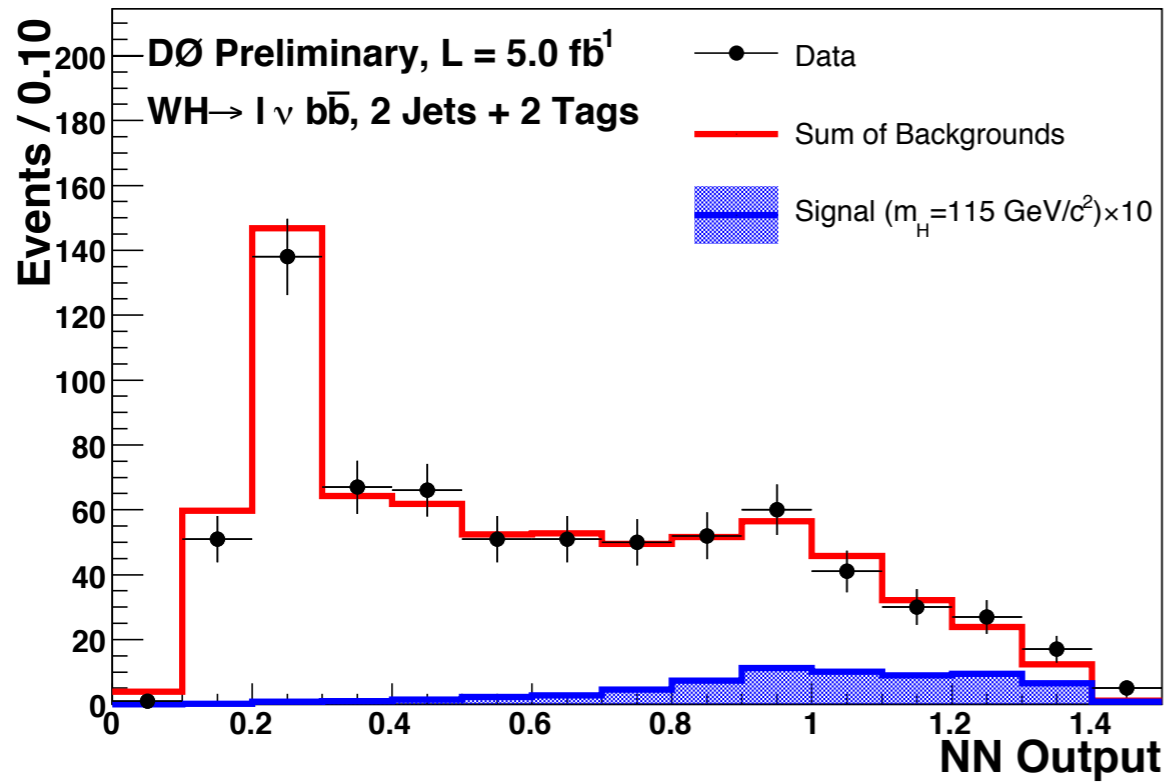
$$E_T^{\text{scaled}} = \frac{E_T}{\sqrt{\sum_{j \in \text{jets}} \Delta E_j \sin \theta_j \cos \Delta\phi(j, E_T)}}$$

ZH \rightarrow $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ Selection

Sample	Cuts
Preselection	$p_T^{\text{jet}} > 20 \text{ GeV}, \Delta\phi(j_1, j_2) < 165^\circ$
Analysis	$\mathcal{D} < \pi/2, E_T > 40 \text{ GeV}, \mathcal{S}(E_T) > 5$
EW Control	as Analysis; require isolated μ with $p_T^\mu > 15 \text{ GeV}$
MJ Model	as Analysis; $\mathcal{D} > \pi/2$
MC Control	as Analysis; $E_T > 30 \text{ GeV}, \mathcal{S}(E_T) > 0$

$$\mathcal{D} \equiv \Delta\phi(\vec{E}_T, \vec{p}_T)$$

DØ's Signal-like Channels

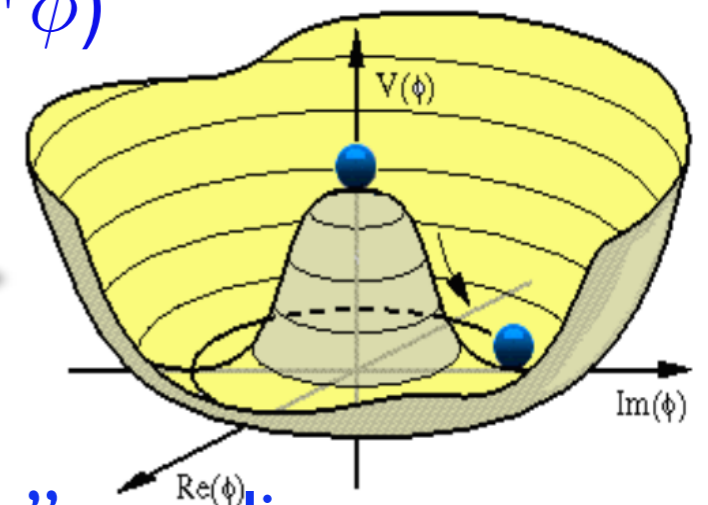


The Higgs Mechanism to the Rescue

- Required: a mechanism to break the EW symmetry **spontaneously**
- Lagrangian** maintains full EW symmetry $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
- but **the ground state does not!**
- Achieved through the introduction of the (complex scalar) **Higgs field**

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad V_\phi = \mu(\phi^\dagger \phi) + \lambda(\phi^\dagger \phi)^2$$

- With $\mu < 0$: minimum at $\phi \neq 0$ \longrightarrow



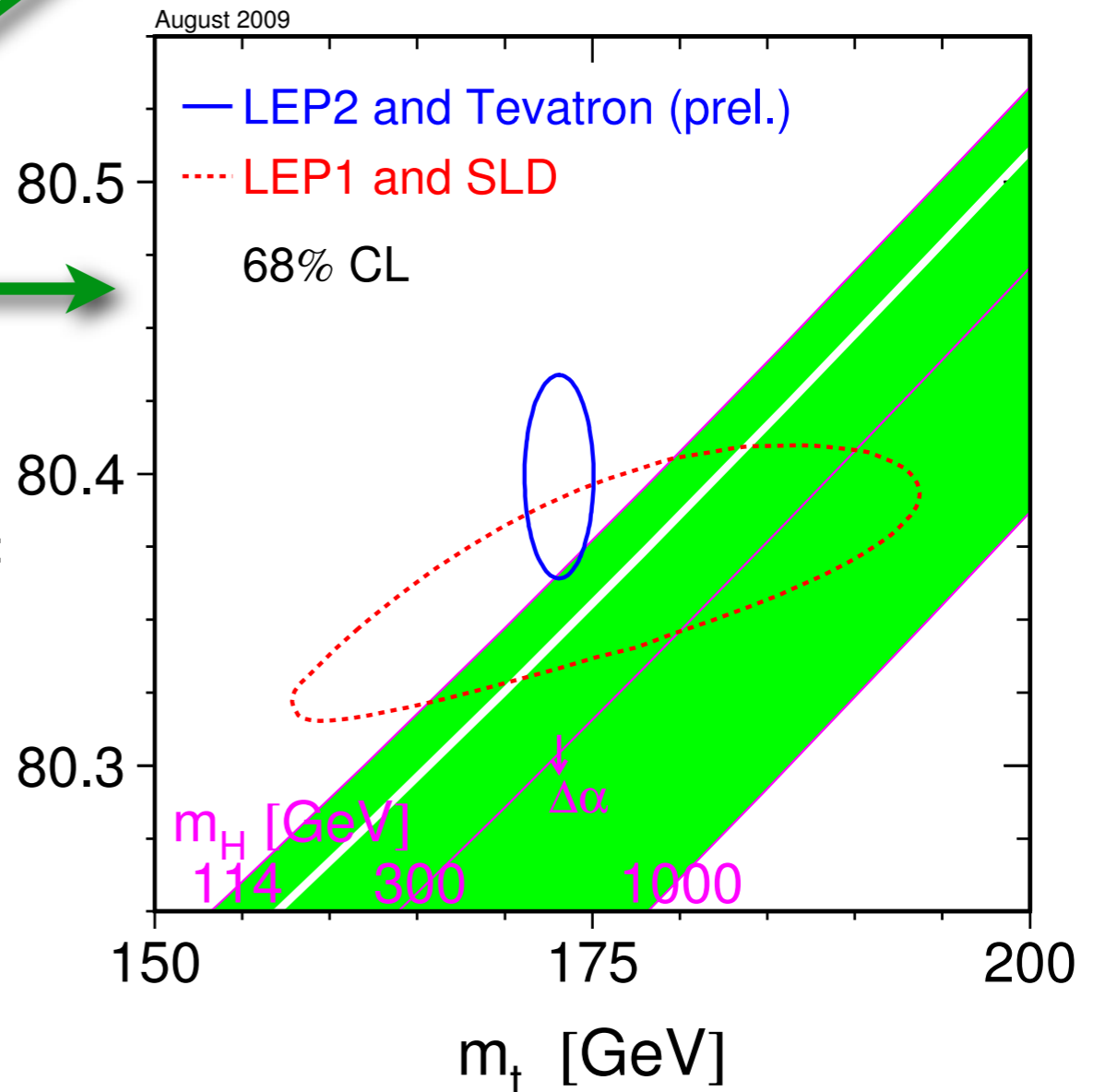
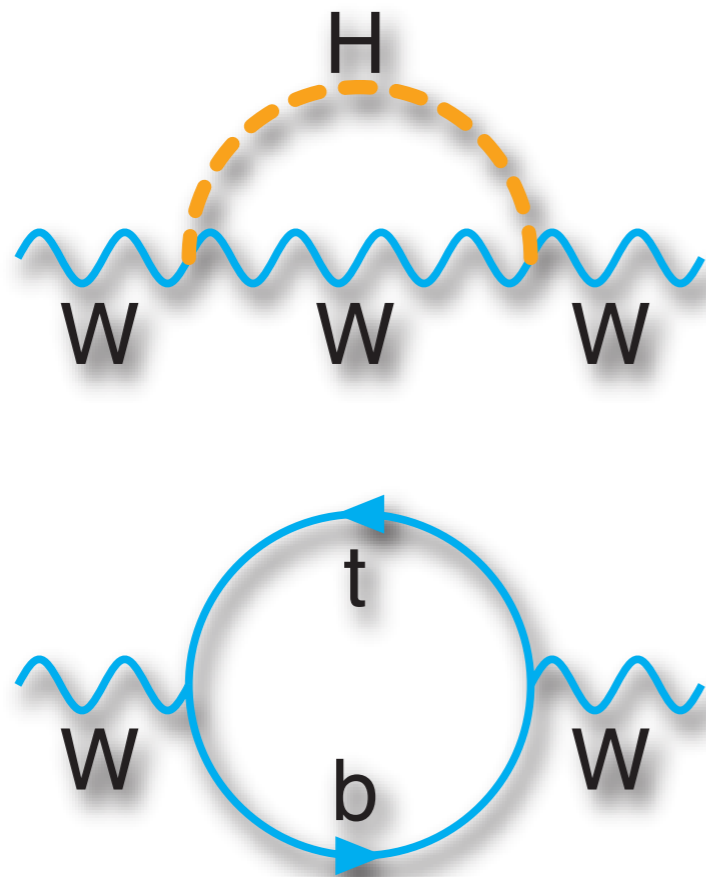
- Generation of fermion masses through “Yukawa” couplings:

$$\mathcal{L}_Y = -g_e (\bar{e}_R \phi^\dagger \psi_L + \bar{\psi}_L \phi e_R)$$

$$(\langle \phi \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v/\sqrt{2} \end{pmatrix}) \longrightarrow -\frac{g_e v}{\sqrt{2}} (\bar{e}_R e_L + \bar{e}_L e_R) = -\frac{g_e v}{\sqrt{2}} \bar{e} e$$

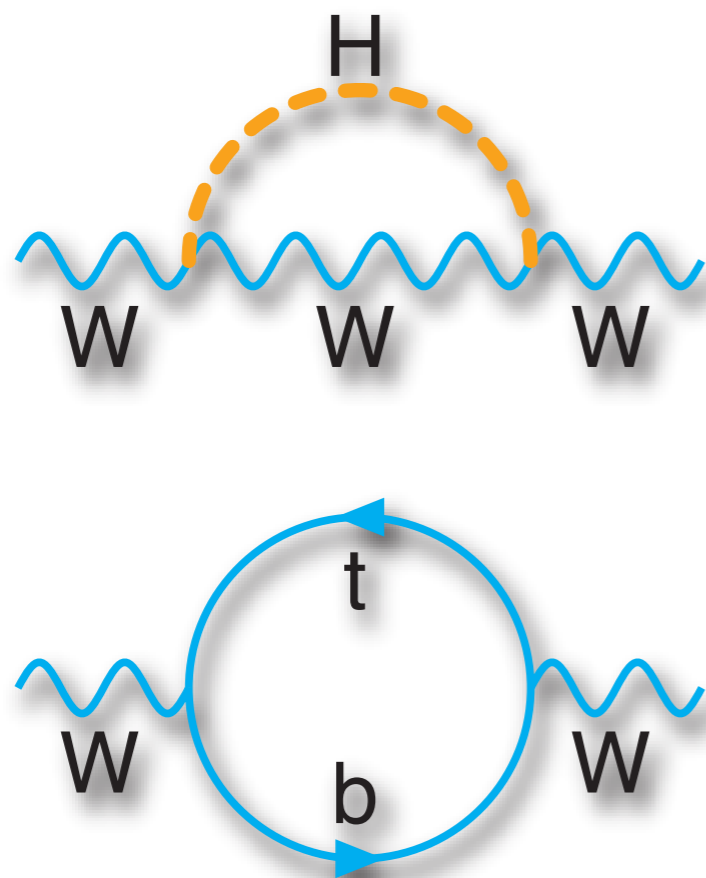
LEP Heritage & Electroweak Constraints

- M_H unknown, but for given M_H all Higgs boson properties fixed
 ↳ know exactly what to look for
- LEP: **$m_H > 114.4 \text{ GeV}$** + a wealth of EW constraints...
 now dominated by Tevatron

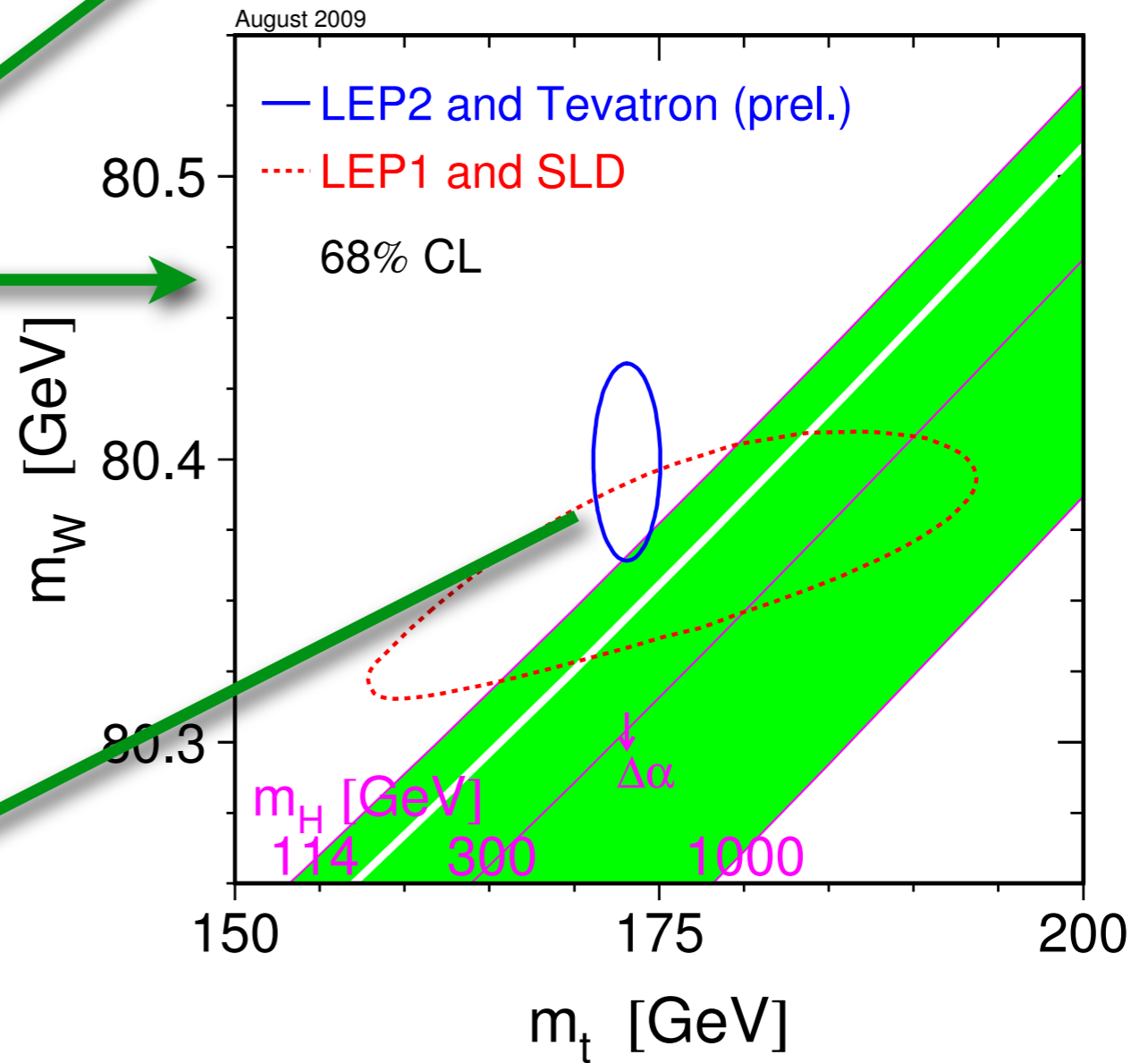


LEP Heritage & Electroweak Constraints

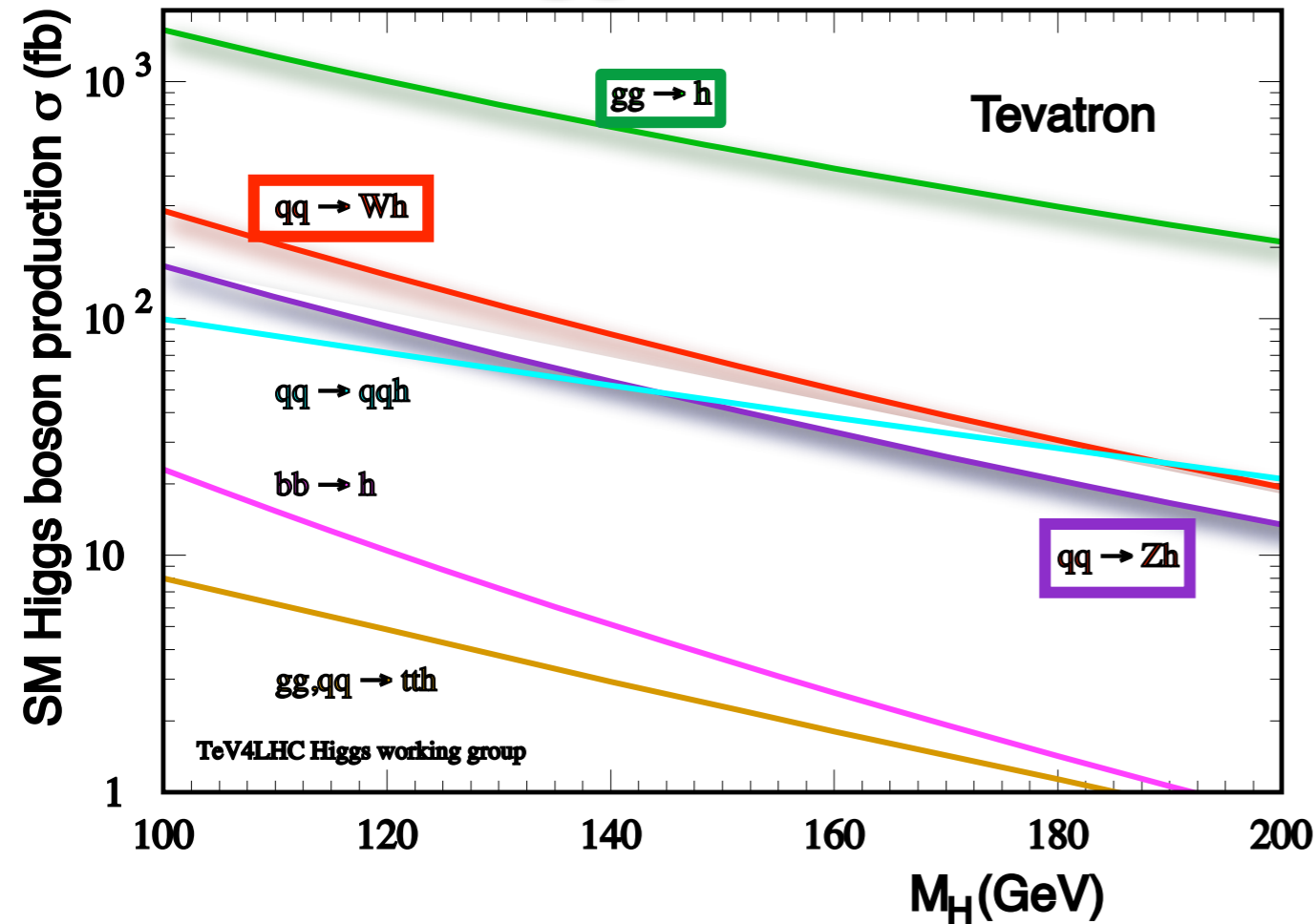
- M_H unknown, but for given M_H all Higgs boson properties fixed
 ↳ know exactly what to look for
- LEP: **$m_H > 114.4 \text{ GeV}$** + a wealth of EW constraints...
 now dominated by Tevatron



Focus on a (relatively) light Higgs boson!



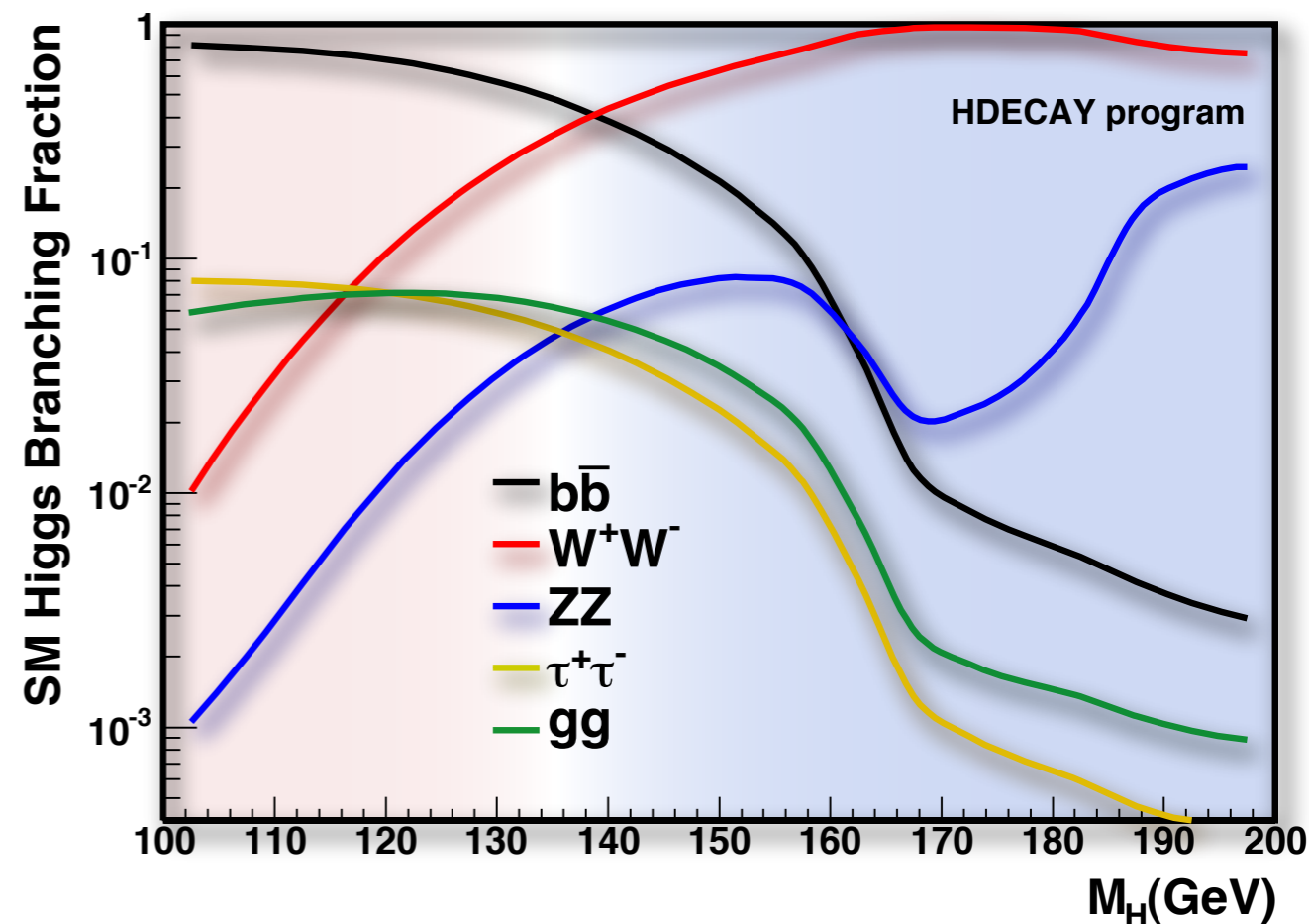
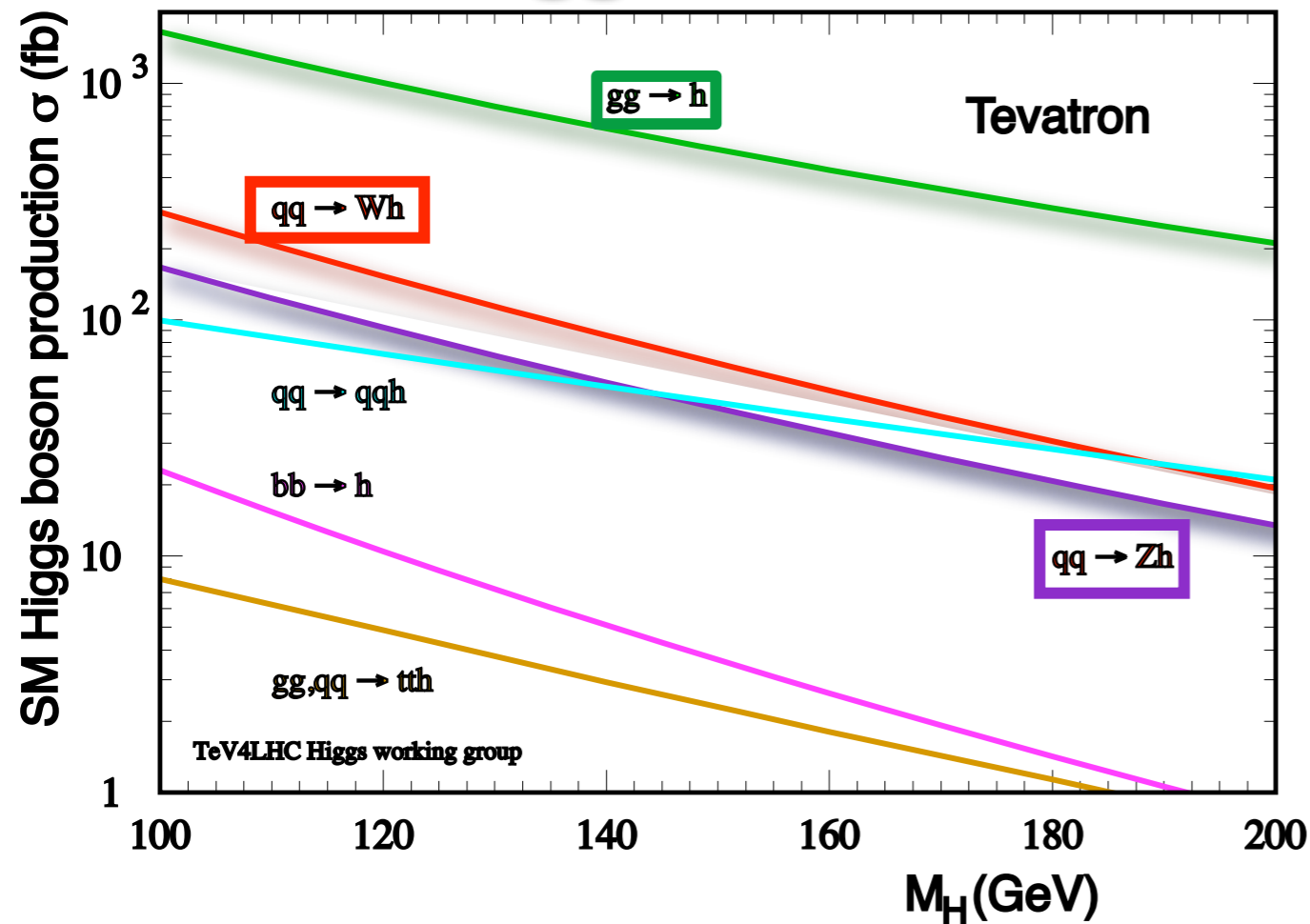
Higgs Boson Production and Decay



Total inelastic scattering cross section (strong interaction) ~ 60 mb:

- background suppression by 10-11 orders of magnitude required
- use signatures not overwhelmed by the strong interaction

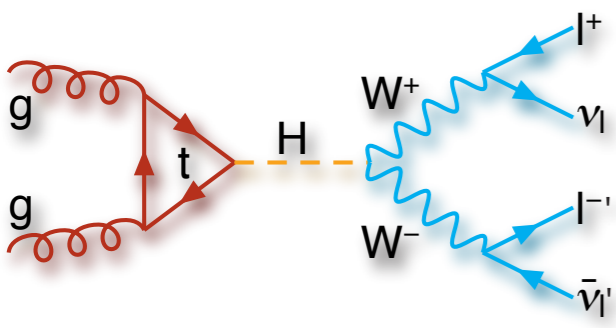
Higgs Boson Production and Decay



Strategy: use leptons!

- low M_H (≈ 135 GeV): VH associated production, leptonic V decay ($V=W, Z$)
- high M_H ($\gtrsim 135$ GeV): $H \rightarrow W^+W^-$, both W bosons decaying leptonically

A straightforward strategy, but leading to a large number of final states



Analysis Flow: $H \rightarrow W^+W^-$

The high- M_H workhorse
 → especially clean for e, μ

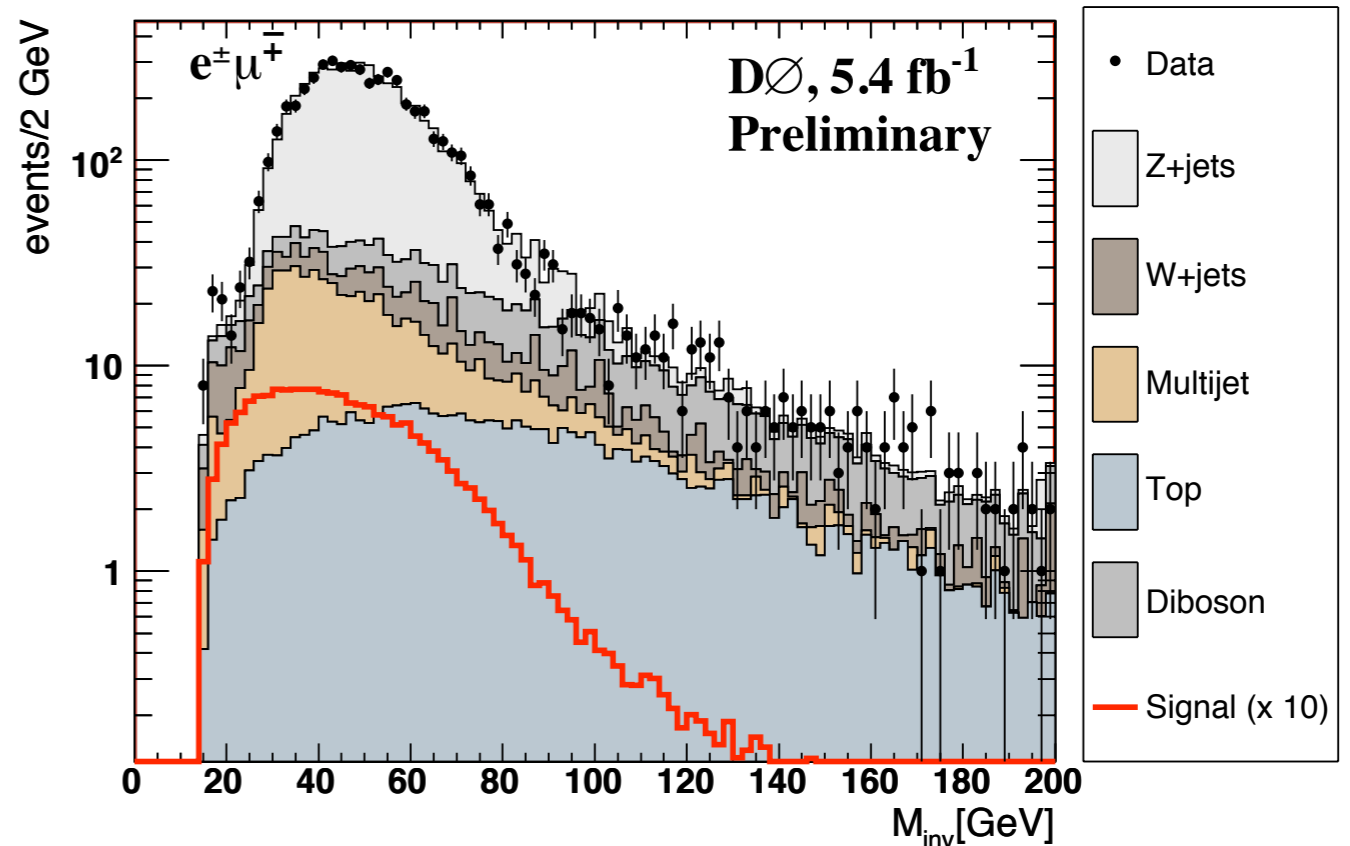
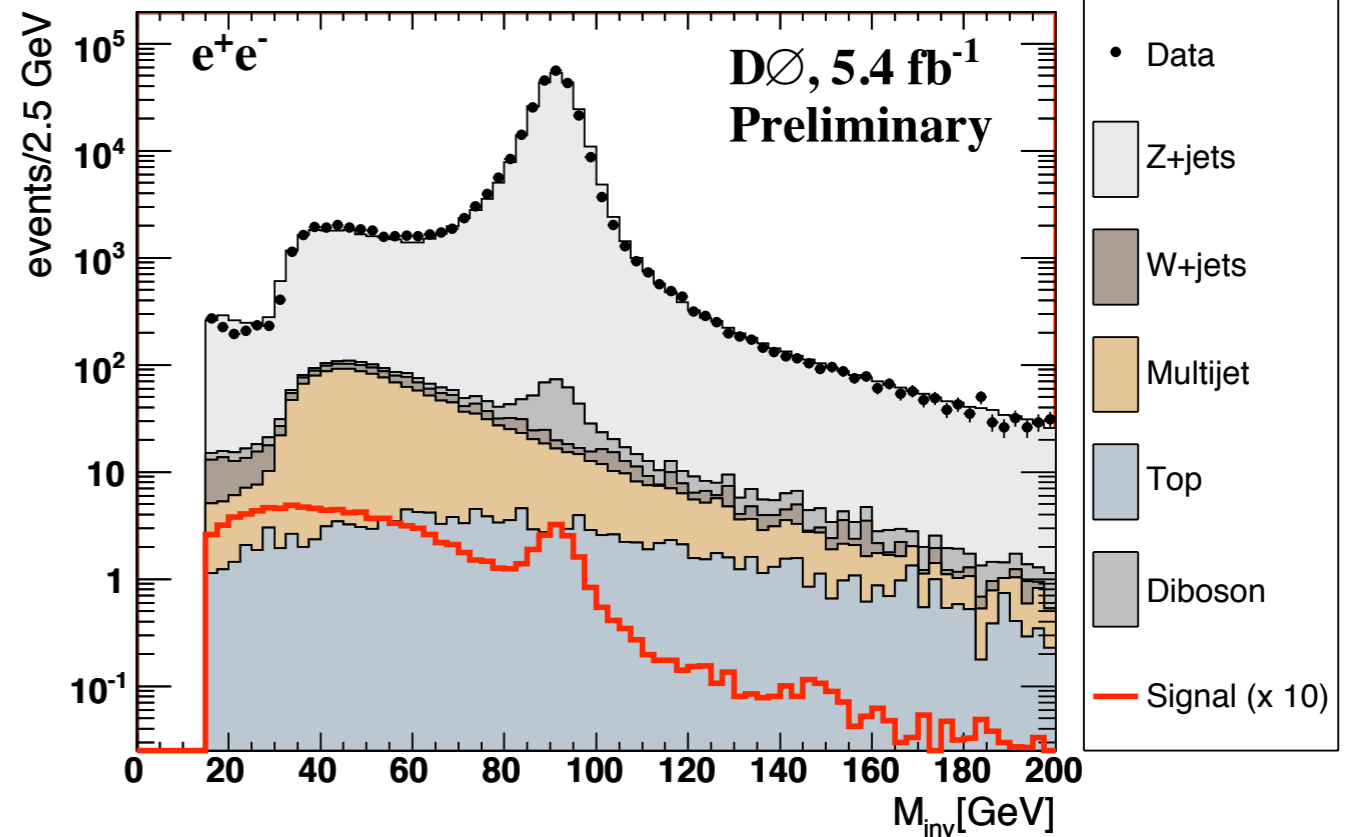
1. Di-lepton preselection

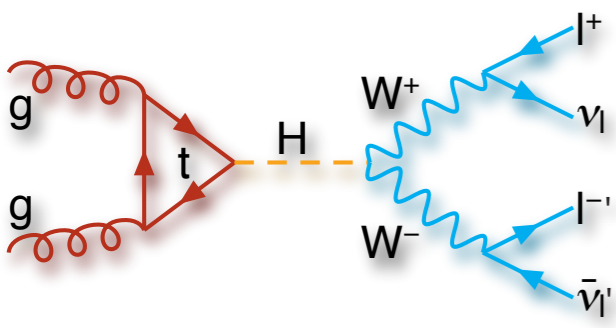
2. Kinematic selection

- exploit W -pair spin correlations

- reduce backgrounds from \cancel{E}_T (escaping ν ?) mismeasurements

3. Multivariate analysis (Neural Network) for optimum performance





Analysis Flow: $H \rightarrow W^+W^-$

The high- M_H workhorse
 → especially clean for e, μ

1. Di-lepton preselection

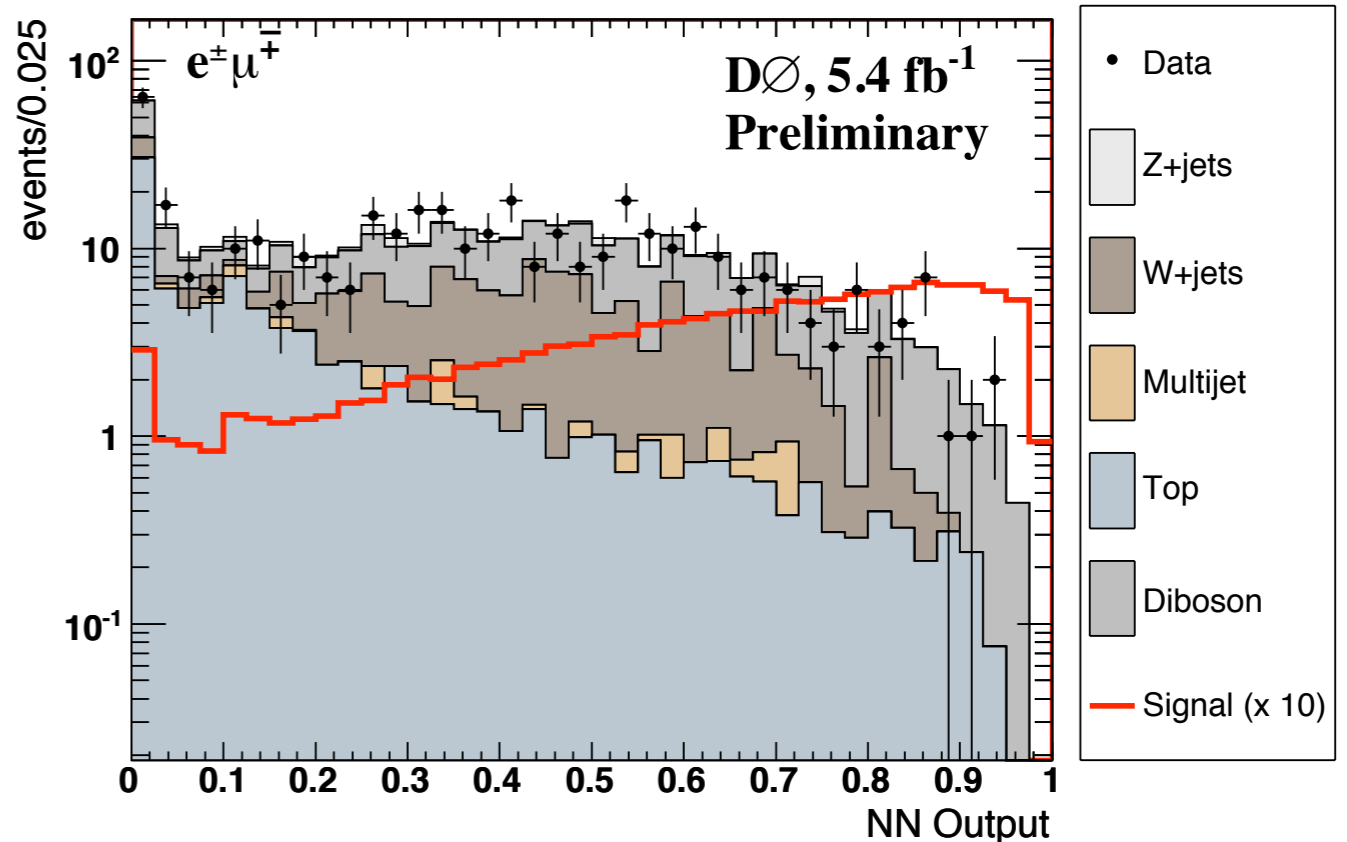
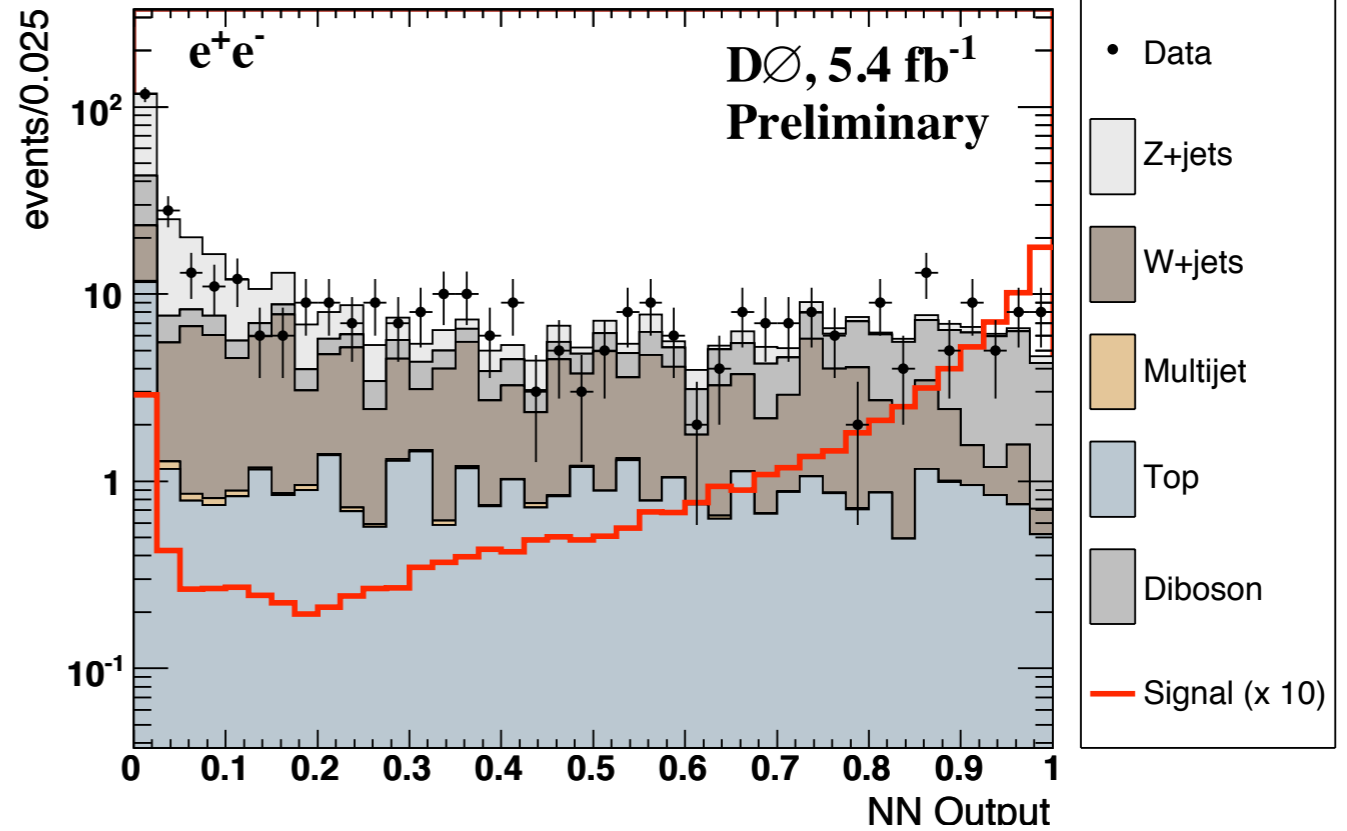
2. Kinematic selection

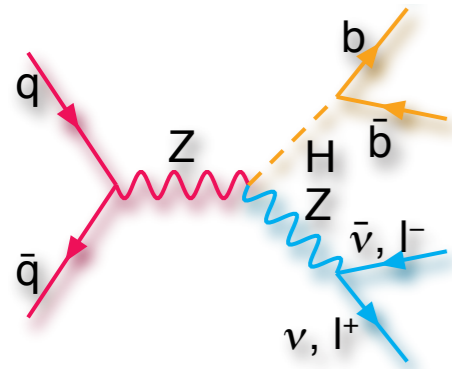
- exploit W -pair spin correlations

- reduce backgrounds from \cancel{E}_T (escaping ν ?) mismeasurements

3. Multivariate analysis (Neural Network) for optimum performance

no significant excess

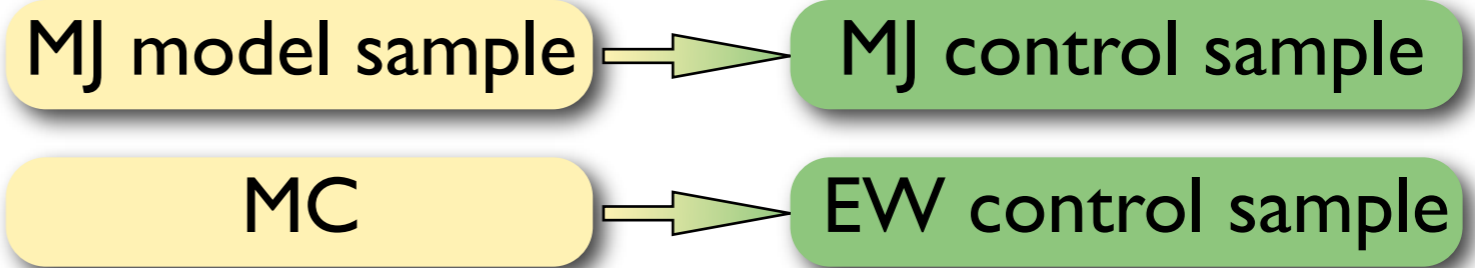




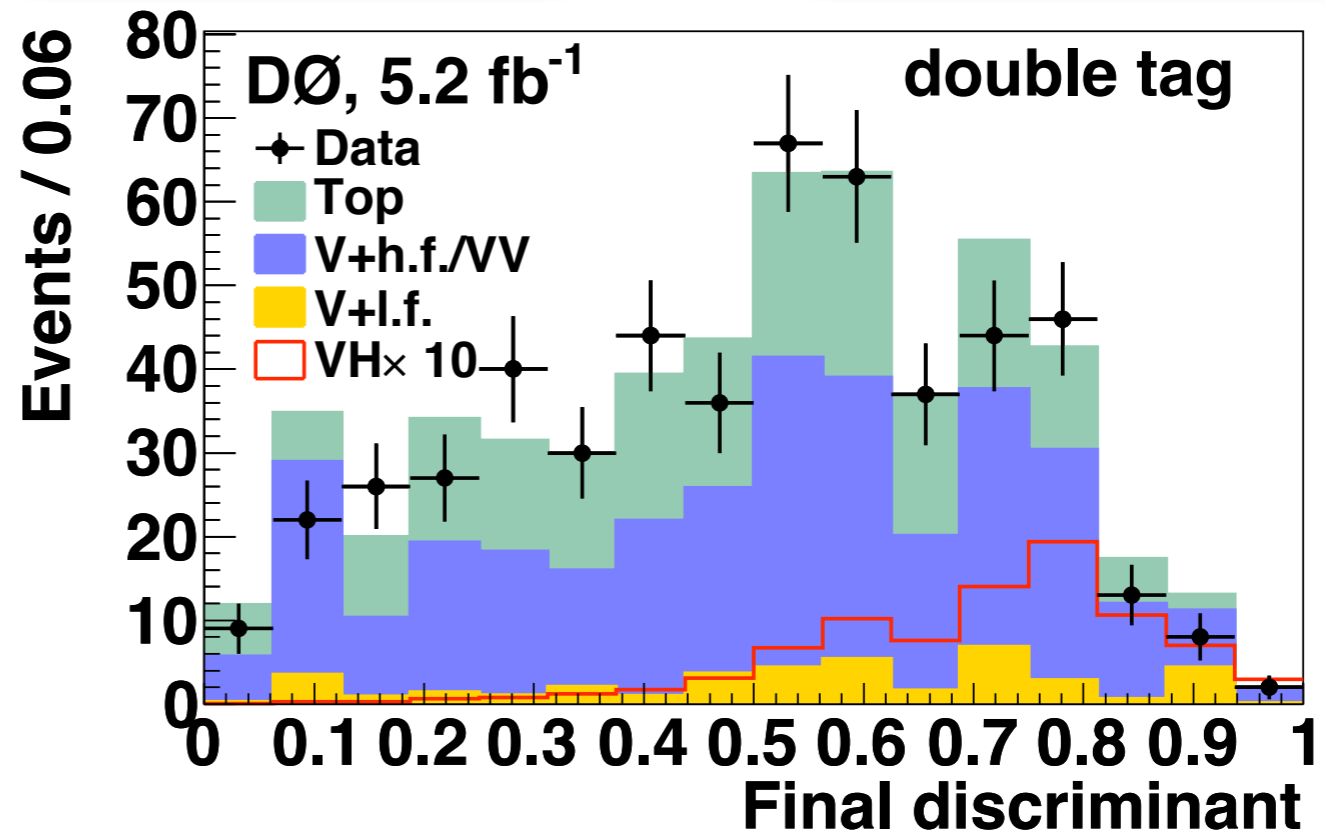
Analysis Flow: $ZH \rightarrow \nu\bar{\nu}b\bar{b}$

- Conceptually, very similar strategy. But more challenging!
- Signal containing (b) jets: need to deal with QCD (common)
- No charged leptons: requires exquisite understanding of \cancel{E}_T

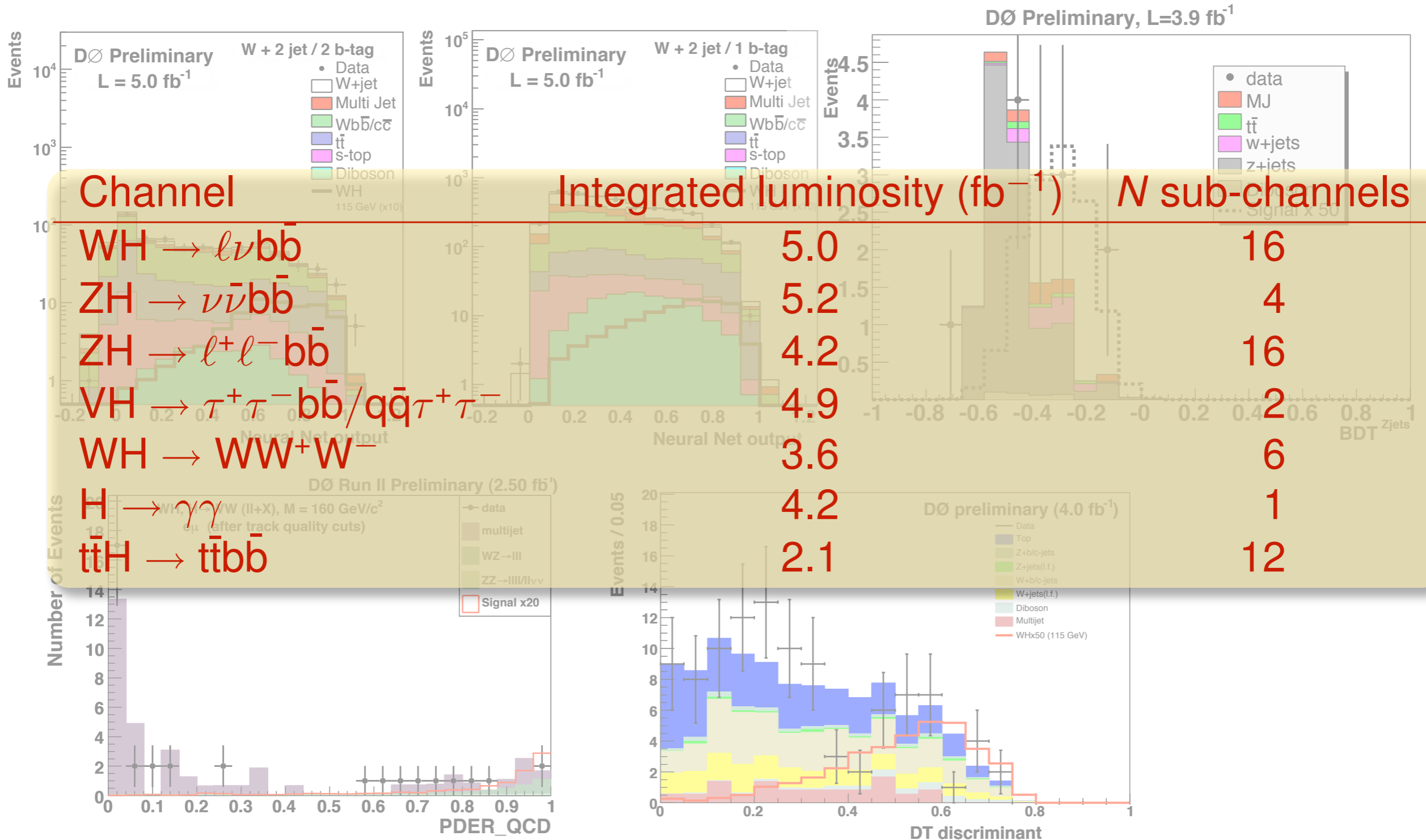
- Beautiful analysis:
 1. Control samples
 2. Multivariate analyses (QCD, EW)
 3. b-tagging: DT + ST samples



Excellent data/MC agreement at all levels!



Analysis Summary





Limits

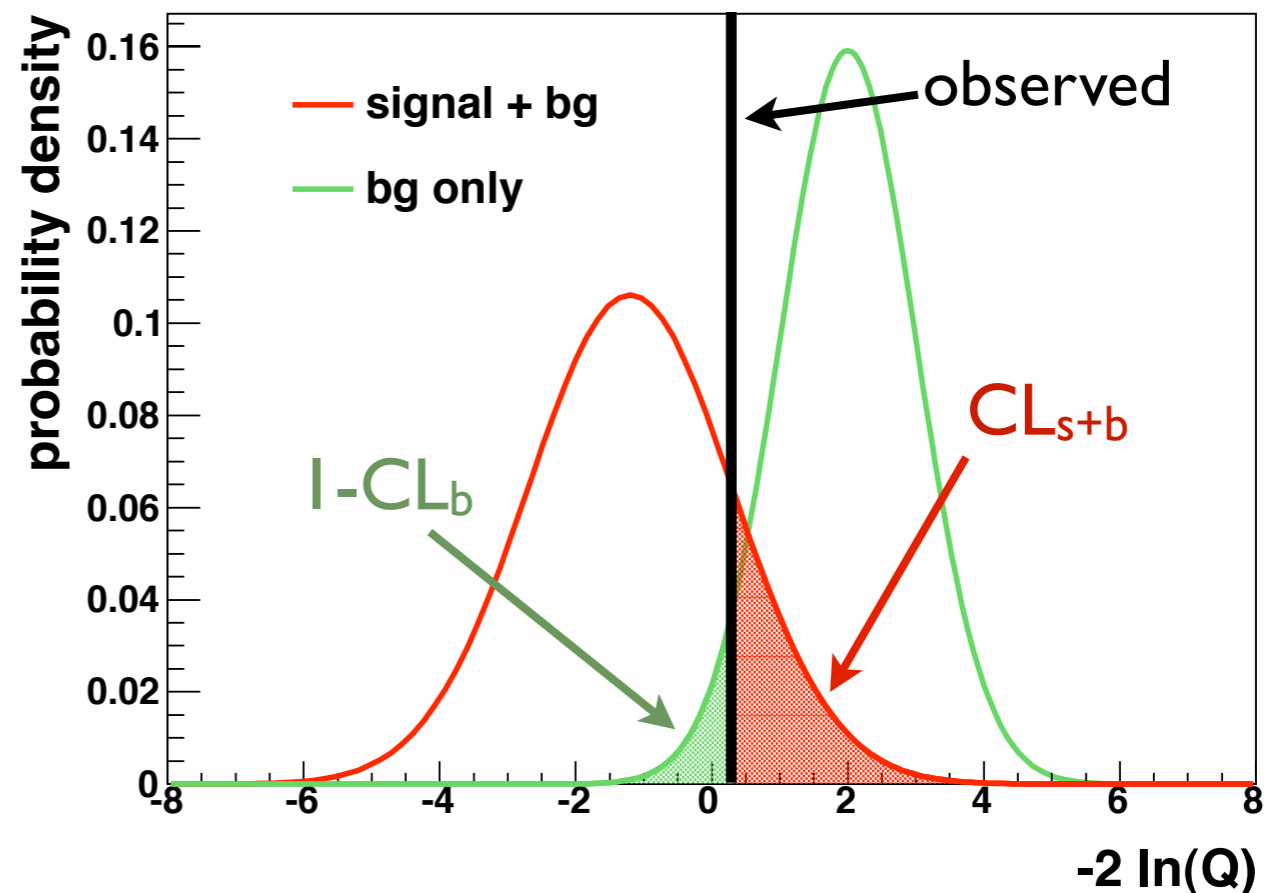
- No **significant** signal-like excess observed... \Rightarrow **set limits**
- **Procedure:**
- Compare data compatibility with $s+b$ / b -only hypotheses (each M_H)

$$Q = \frac{\mathcal{L}(s+b|m_H)}{\mathcal{L}(b)} = \prod_{i \in \text{bins}} \frac{e^{-(s_i+b_i)} (s_i+b_i)^{n_i}}{n_i!} / \frac{e^{-b_i} b_i^{n_i}}{n_i!}$$

- Calibrate outcome with **toy experiments**
- Compare resulting distributions with observed Q

$CL_{b/s+b} \equiv$ fraction of background-only/signal+bg experiments less signal-like than data

Reject $s+b$ hypothesis if $CL_{s+b} < 0.05$



Limits

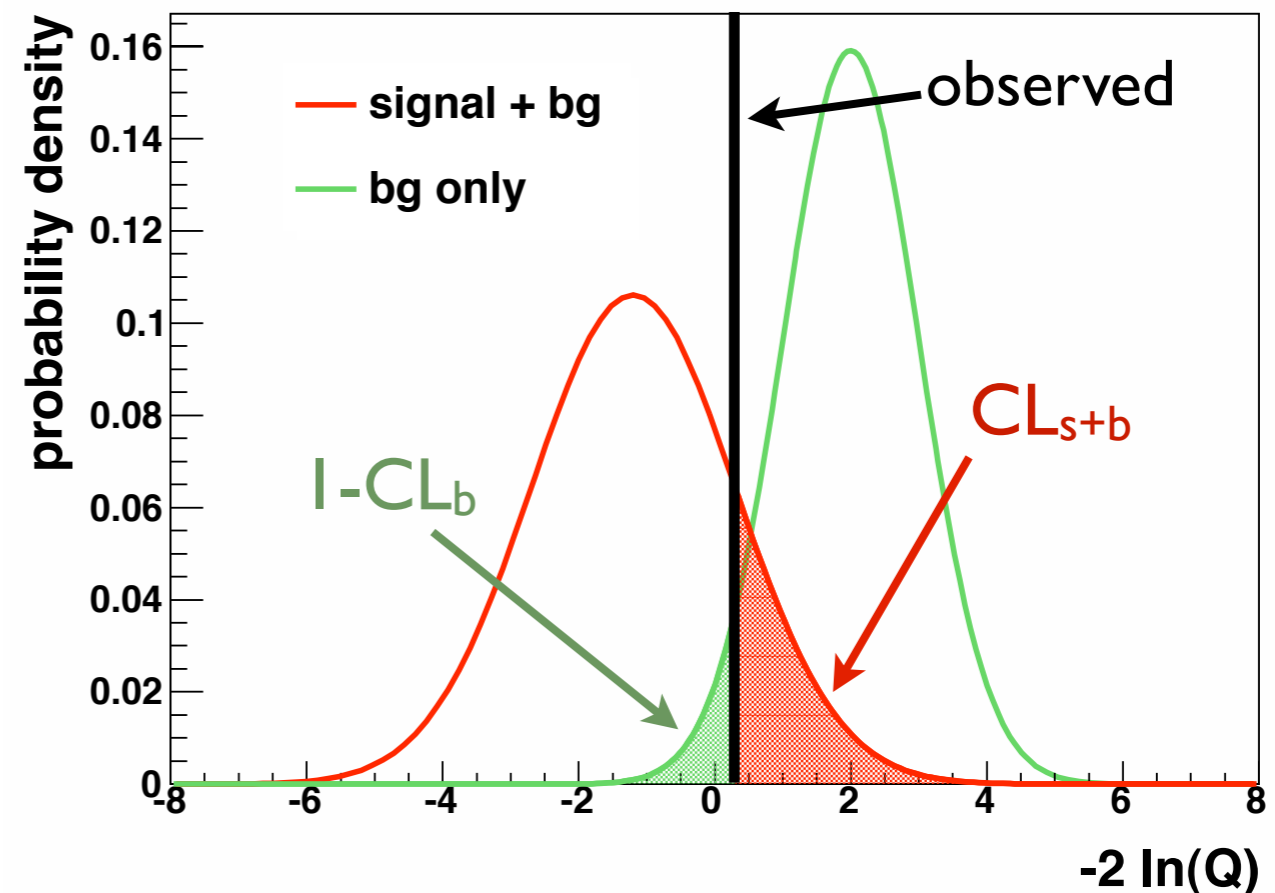
- No **significant** signal-like excess observed... \Rightarrow **set limits**
- **Procedure:**
 - Compare data compatibility with s+b / b-only hypotheses (each M_H)

$$Q = \frac{\mathcal{L}(s+b|m_H)}{\mathcal{L}(b)} = \prod_{i \in \text{bins}} \frac{e^{-(s_i+b_i)} (s_i+b_i)^{n_i}}{n_i!} / \frac{e^{-b_i} b_i^{n_i}}{n_i!}$$

- Calibrate outcome with **toy experiments**
- Compare resulting distributions with observed Q

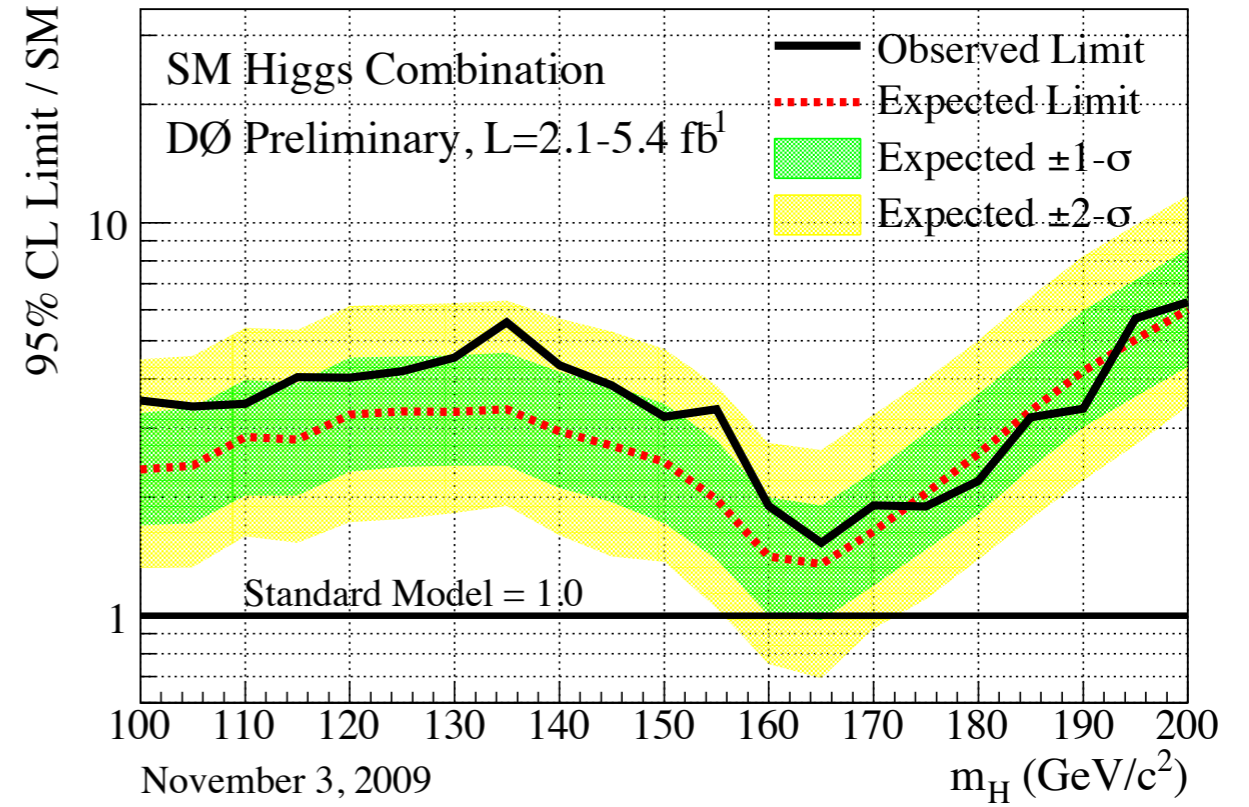
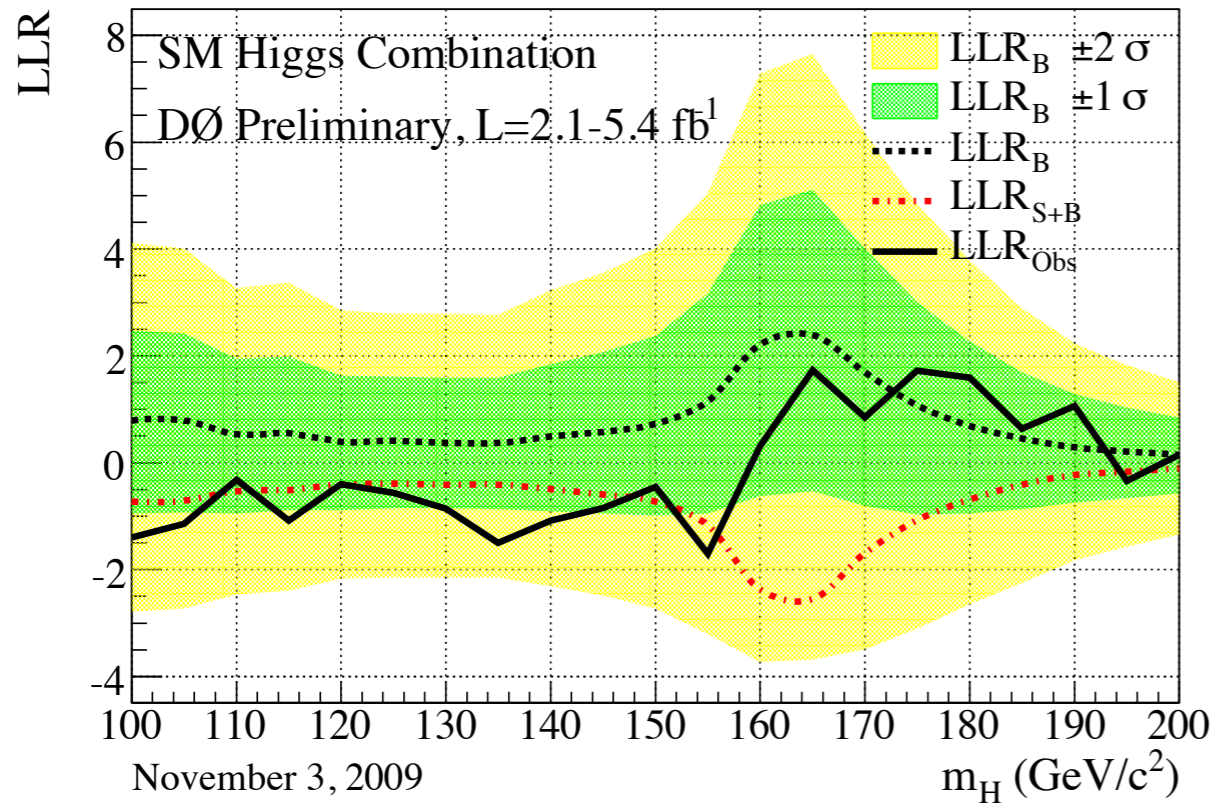
$CL_{b/s+b} \equiv$ fraction of background-only/signal+bg experiments less signal-like than data

Reject s+b hypothesis if $CL_{s+b} < 0.05$



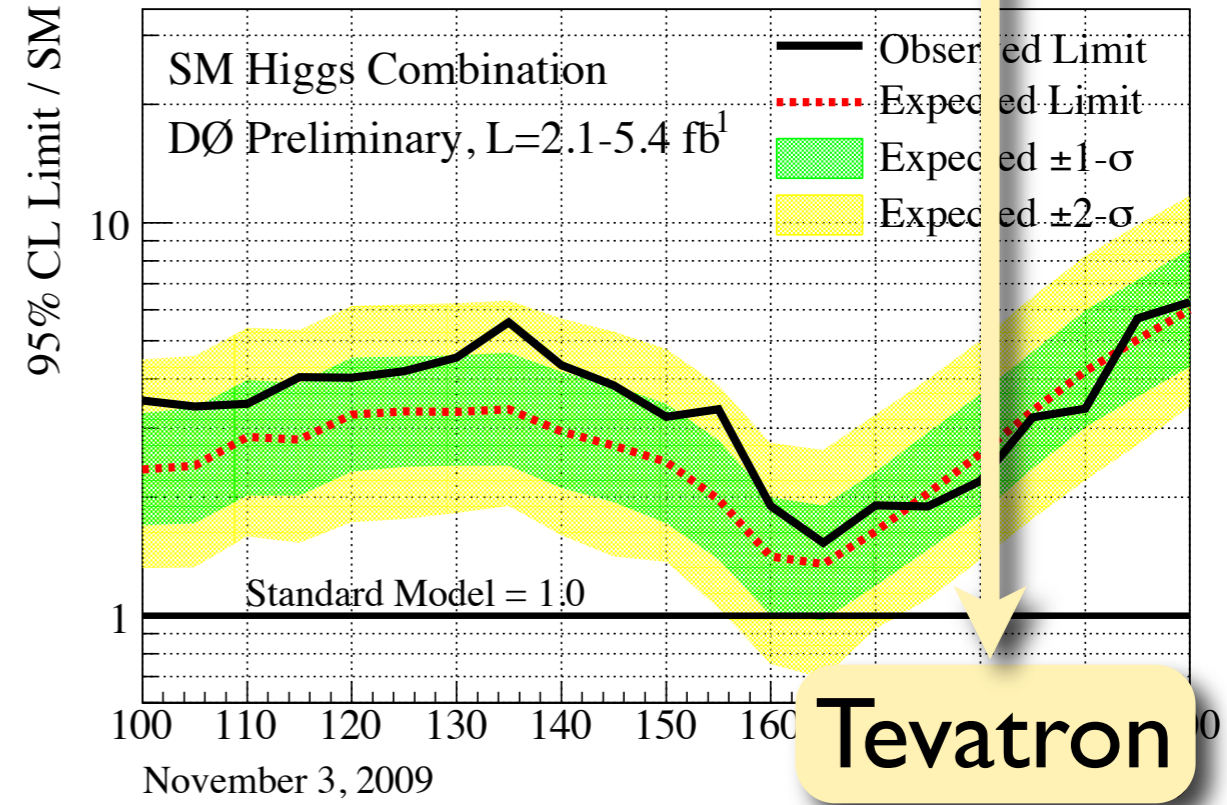
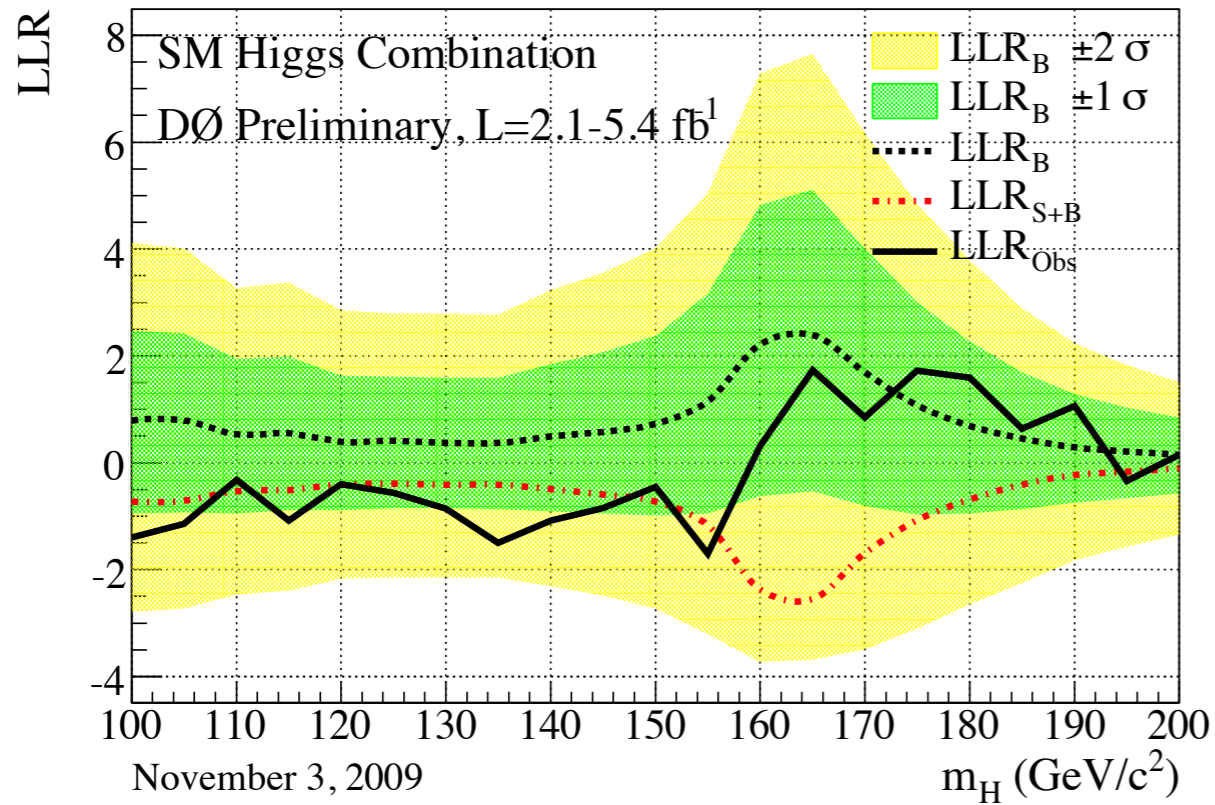
Combinations

DØ only

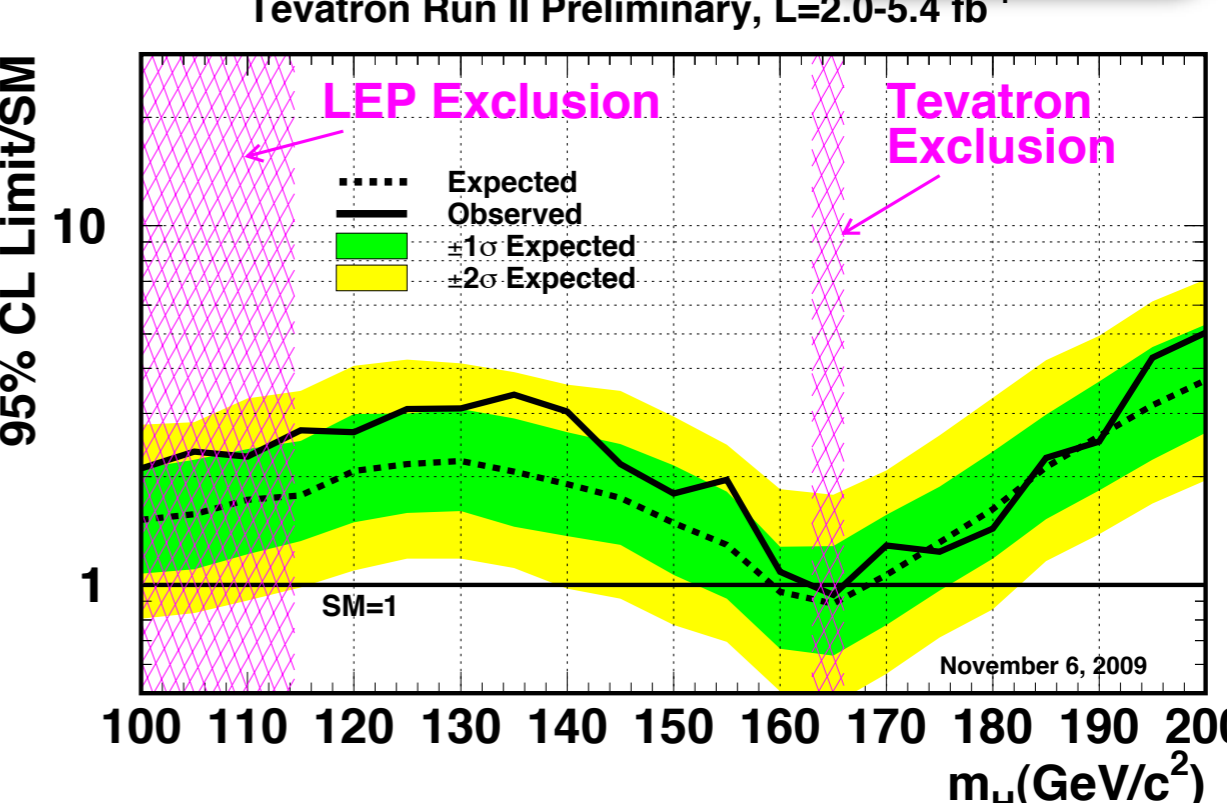
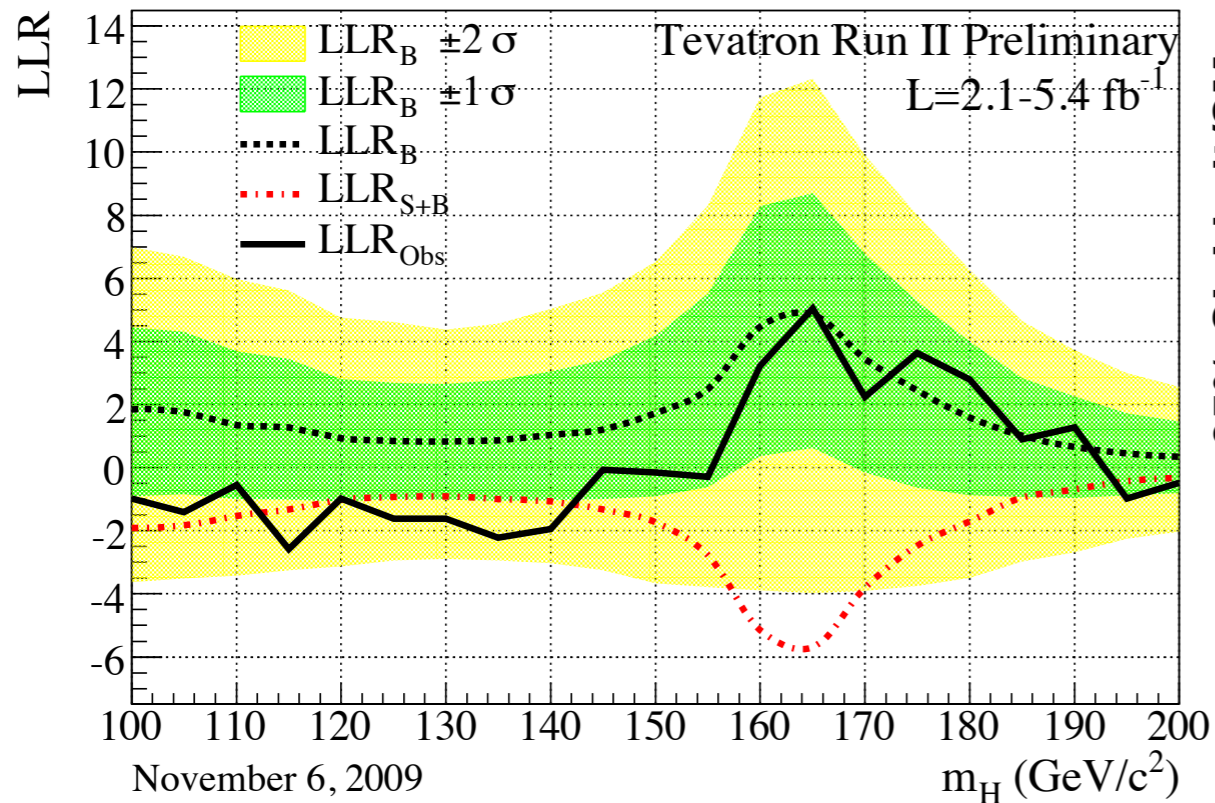


Combinations

DØ only

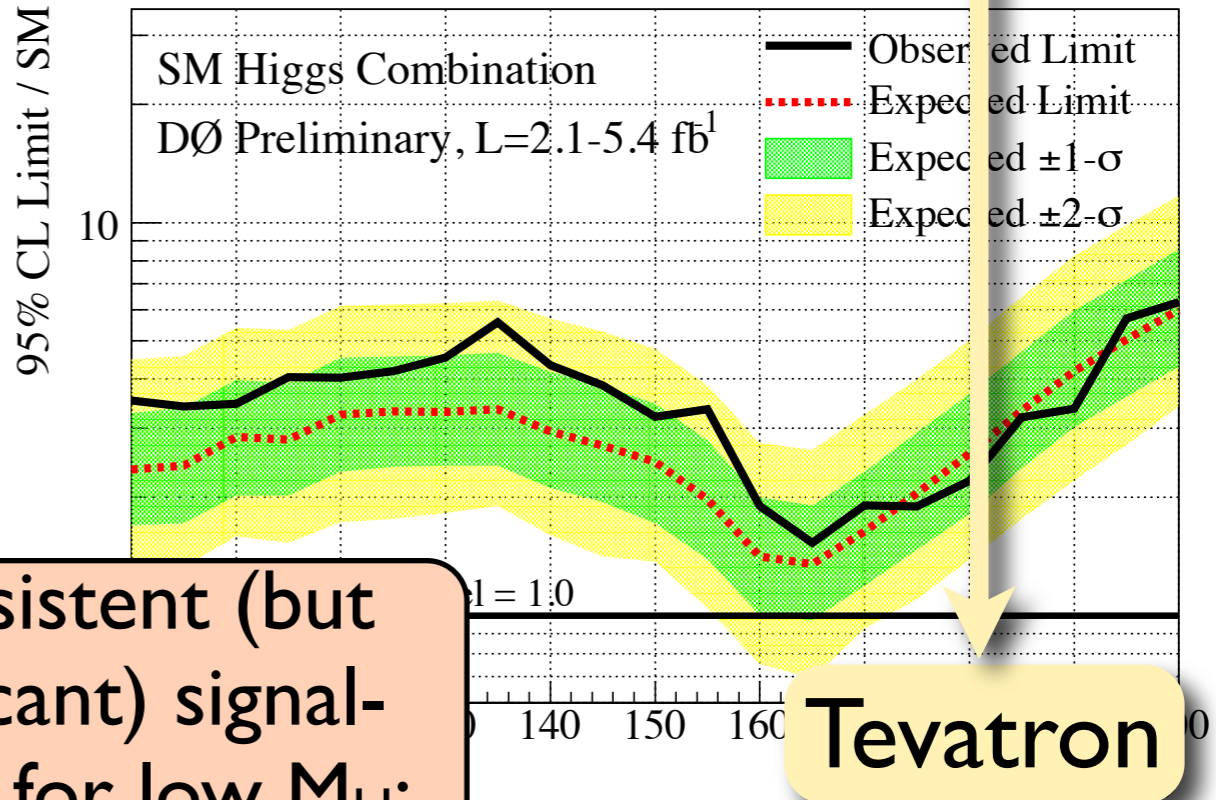
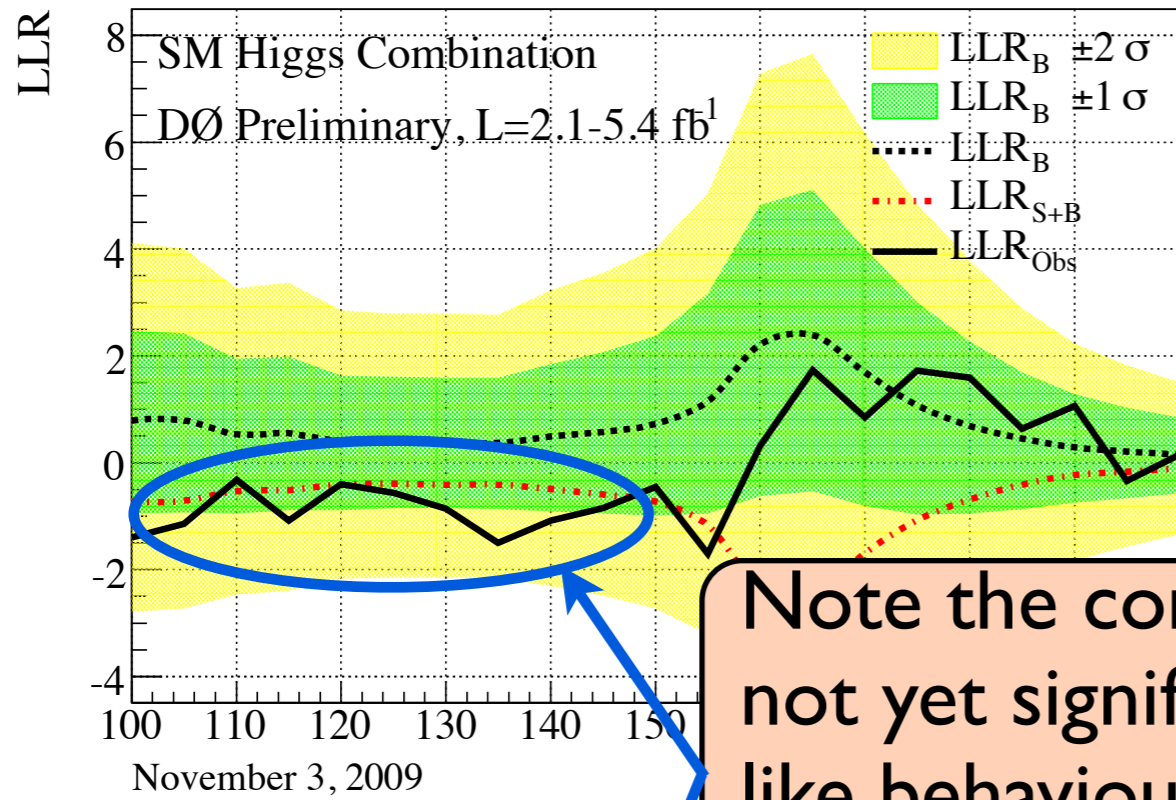


Tevatron



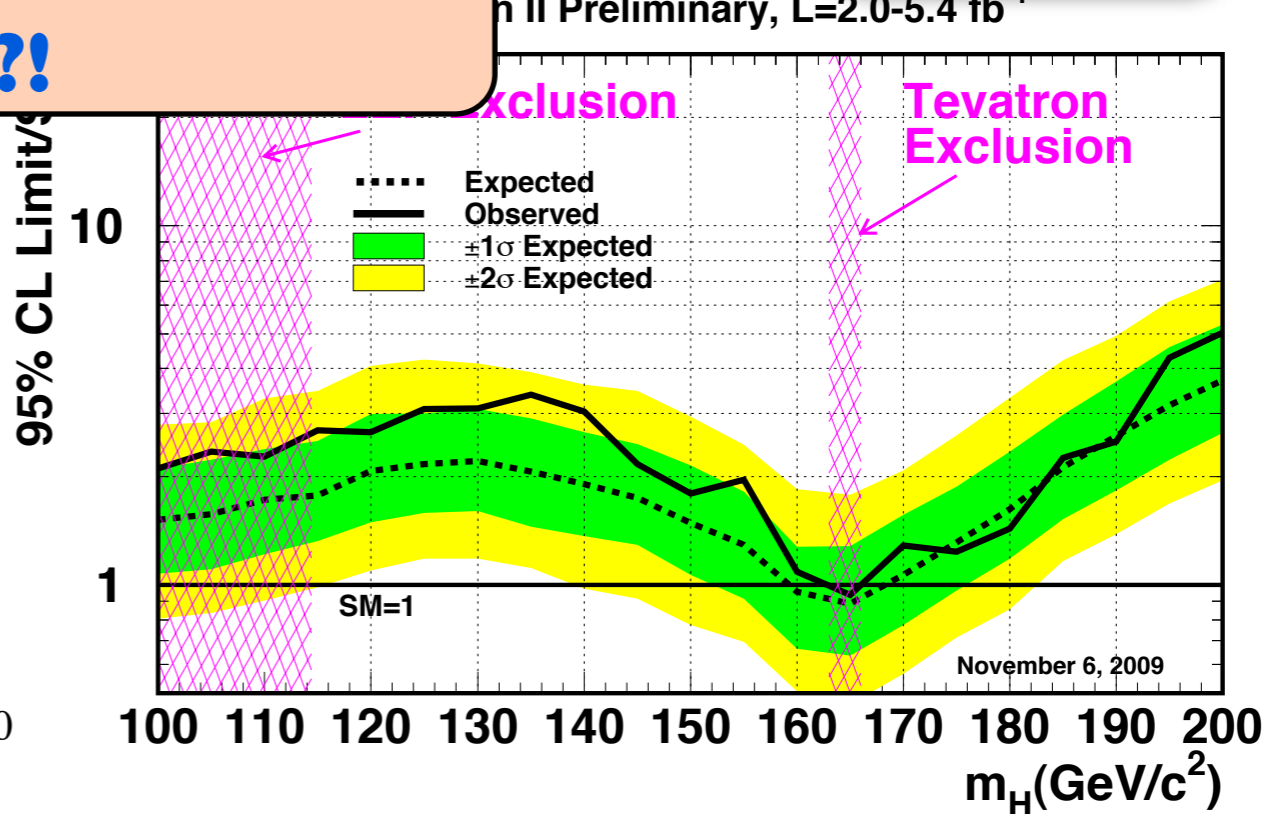
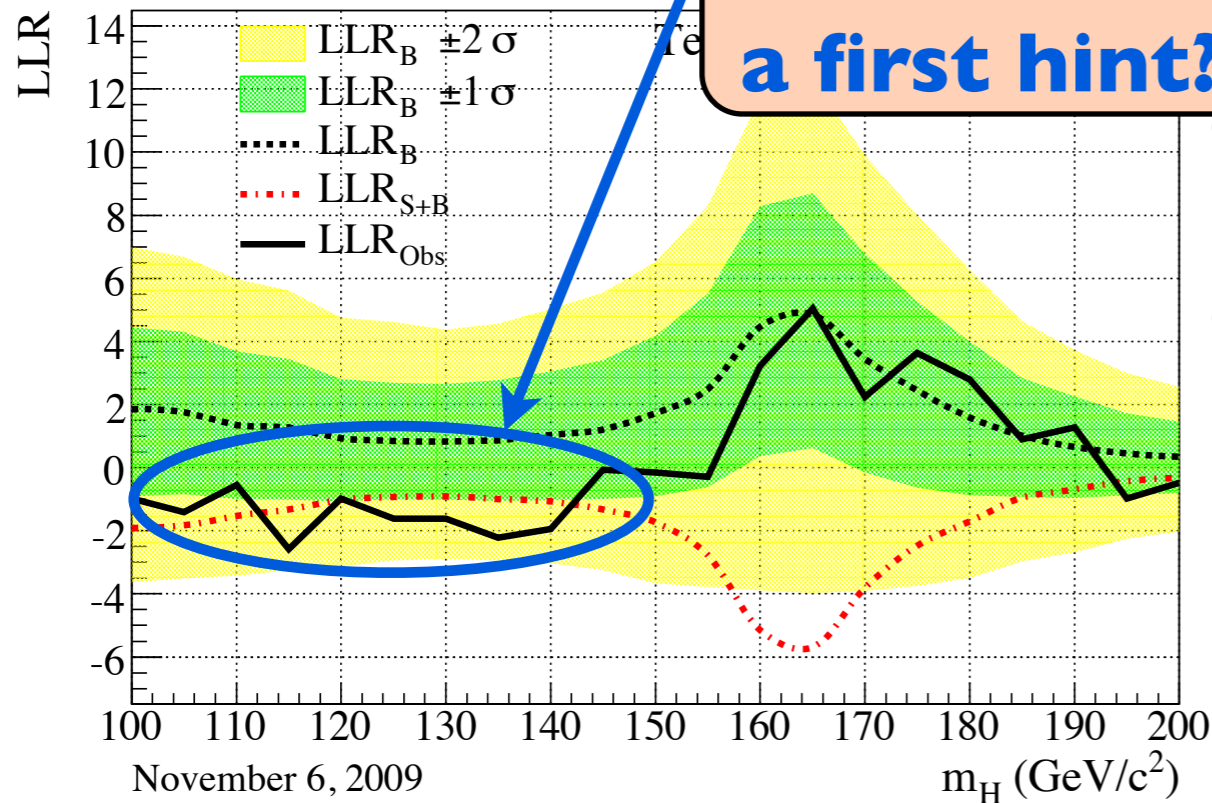
Combinations

DØ only



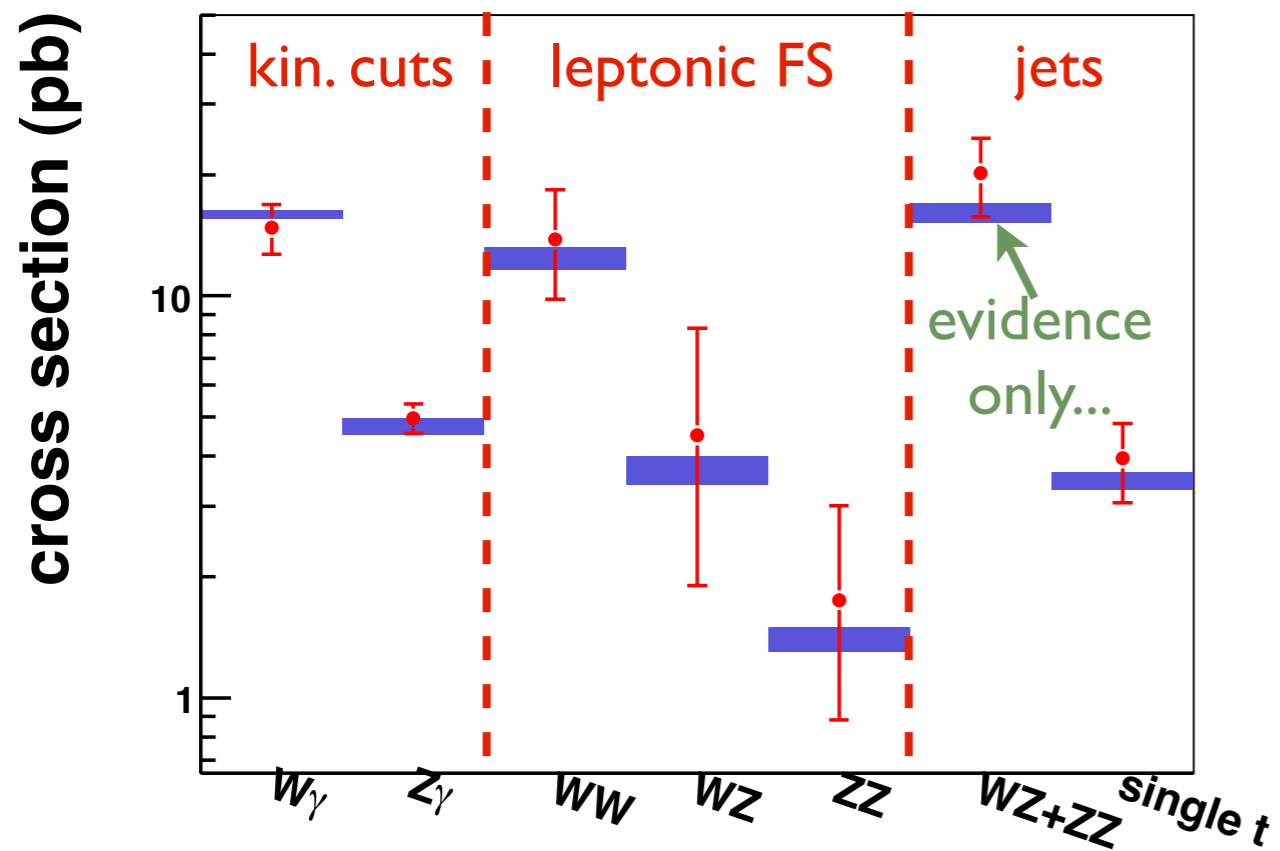
Tevatron

Note the consistent (but not yet significant) signal-like behaviour for low M_H :
a first hint?!



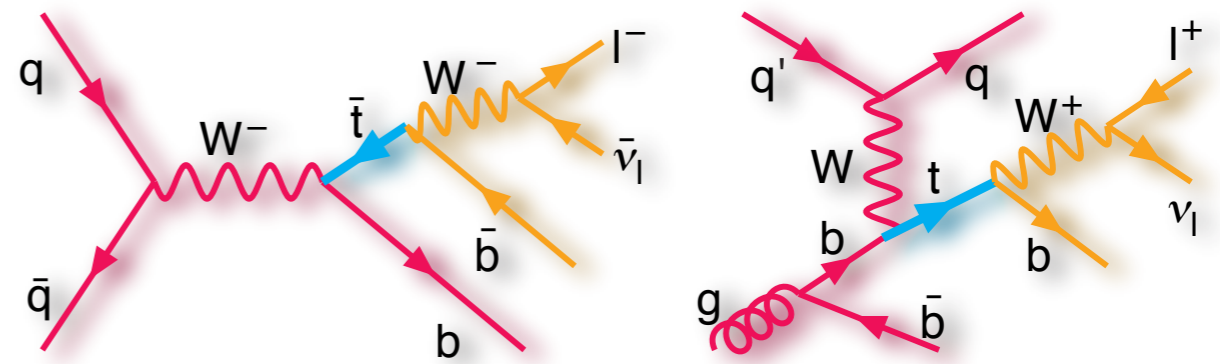
How Credible is All This?

DØ's discovery track record...

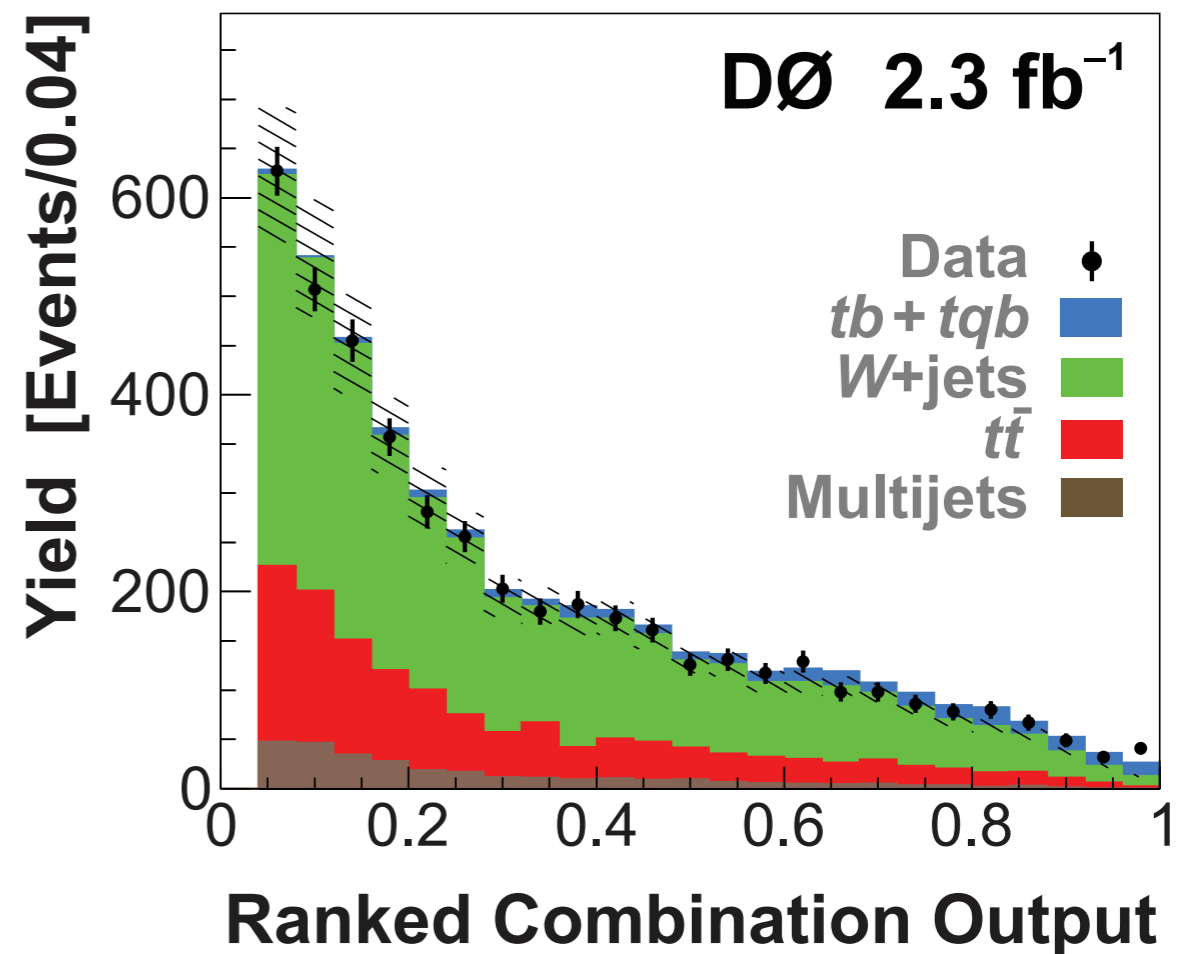


Especially interesting:

- single top production: same final state as $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$
- similarly for WW : irreducible bg to high- M_H search channel

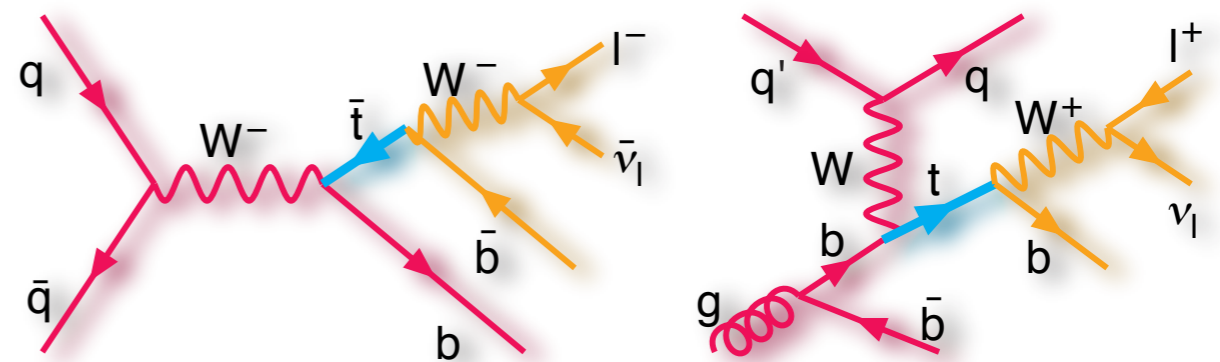
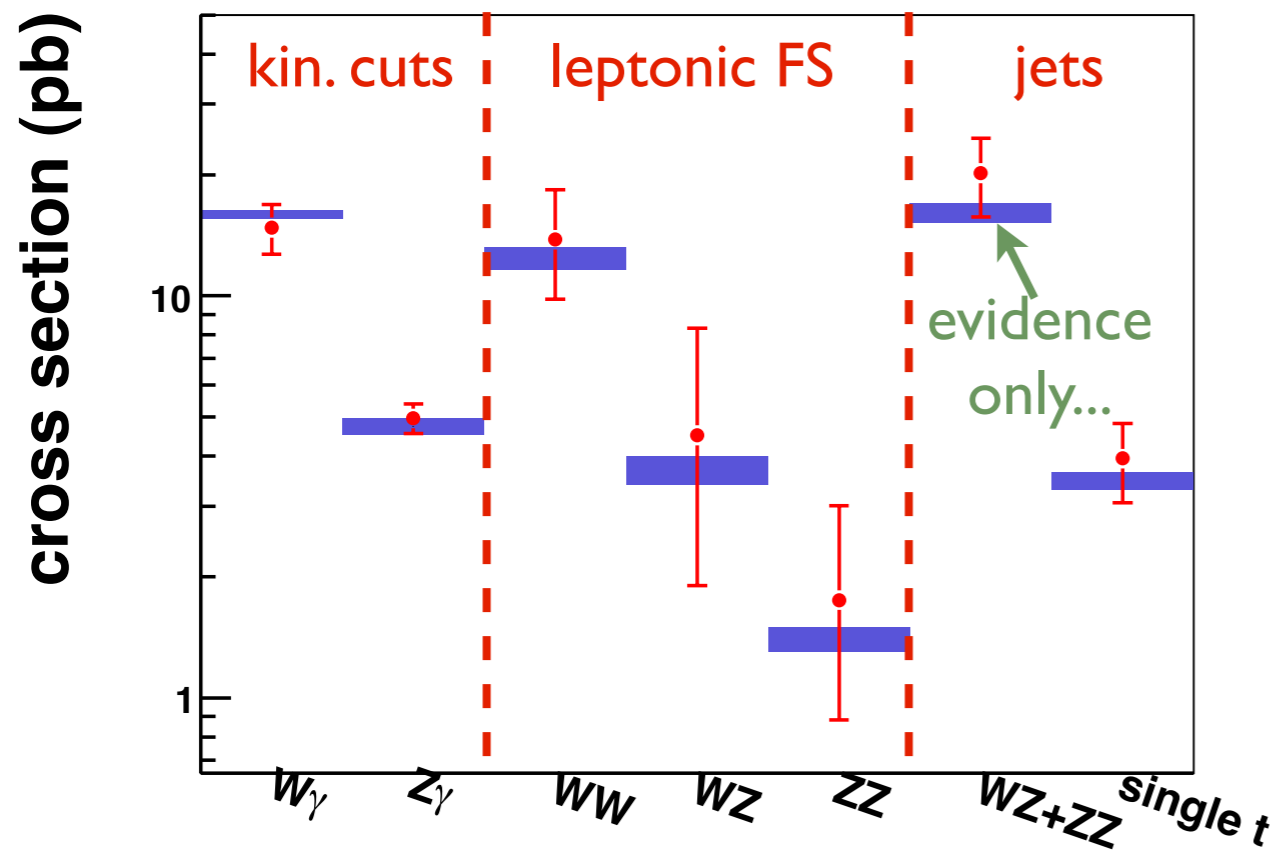


(a) Final Discriminant



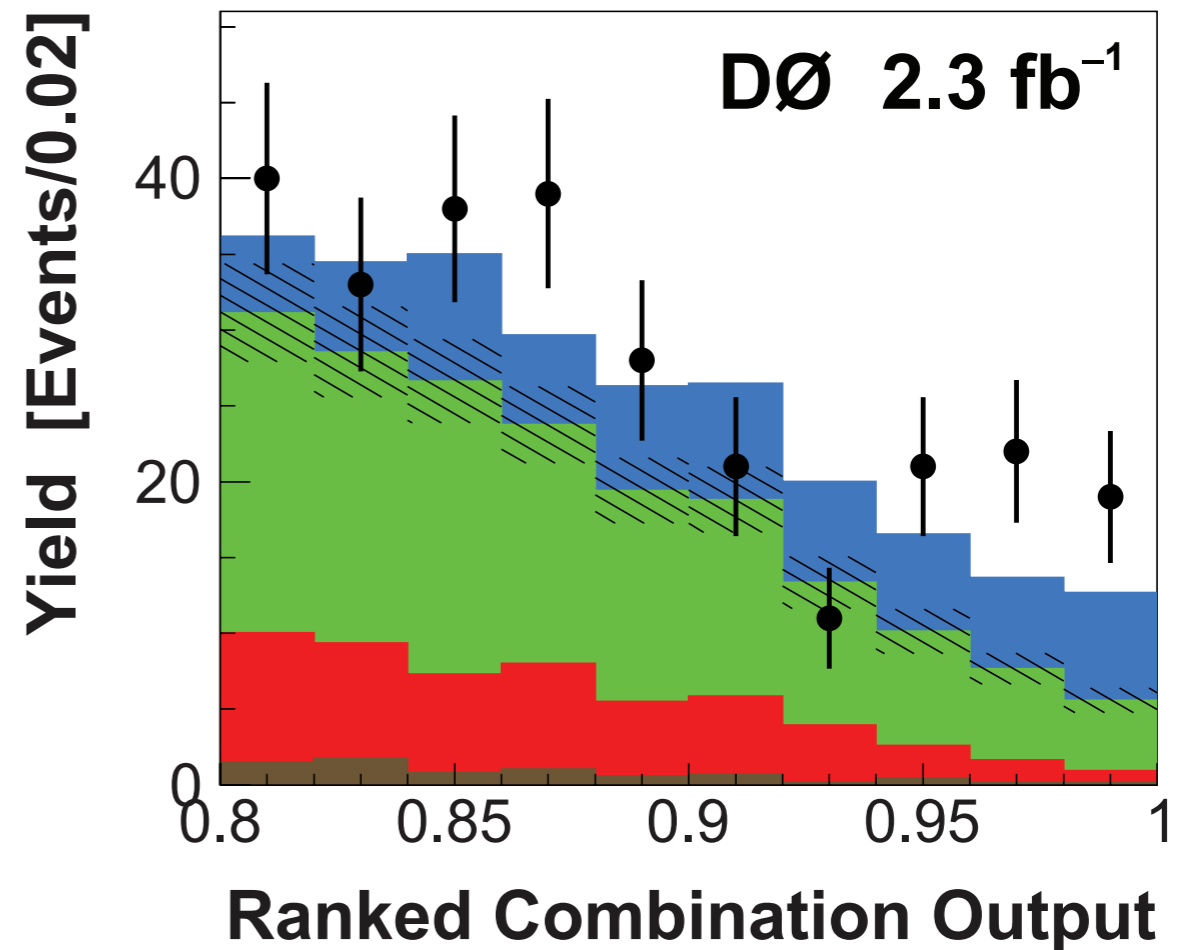
How Credible is All This?

DØ's discovery track record...

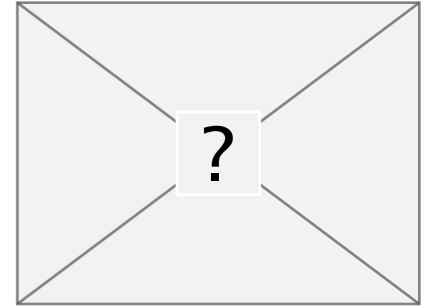


Especially interesting:

- single top production:
same final state as $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$
- similarly for WW : irreducible
bg to high- M_H search channel

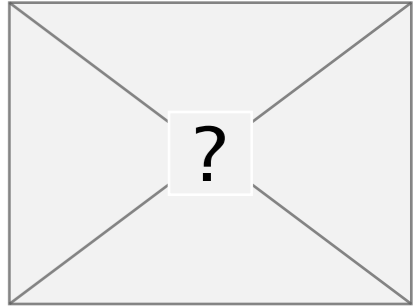


De toekomst

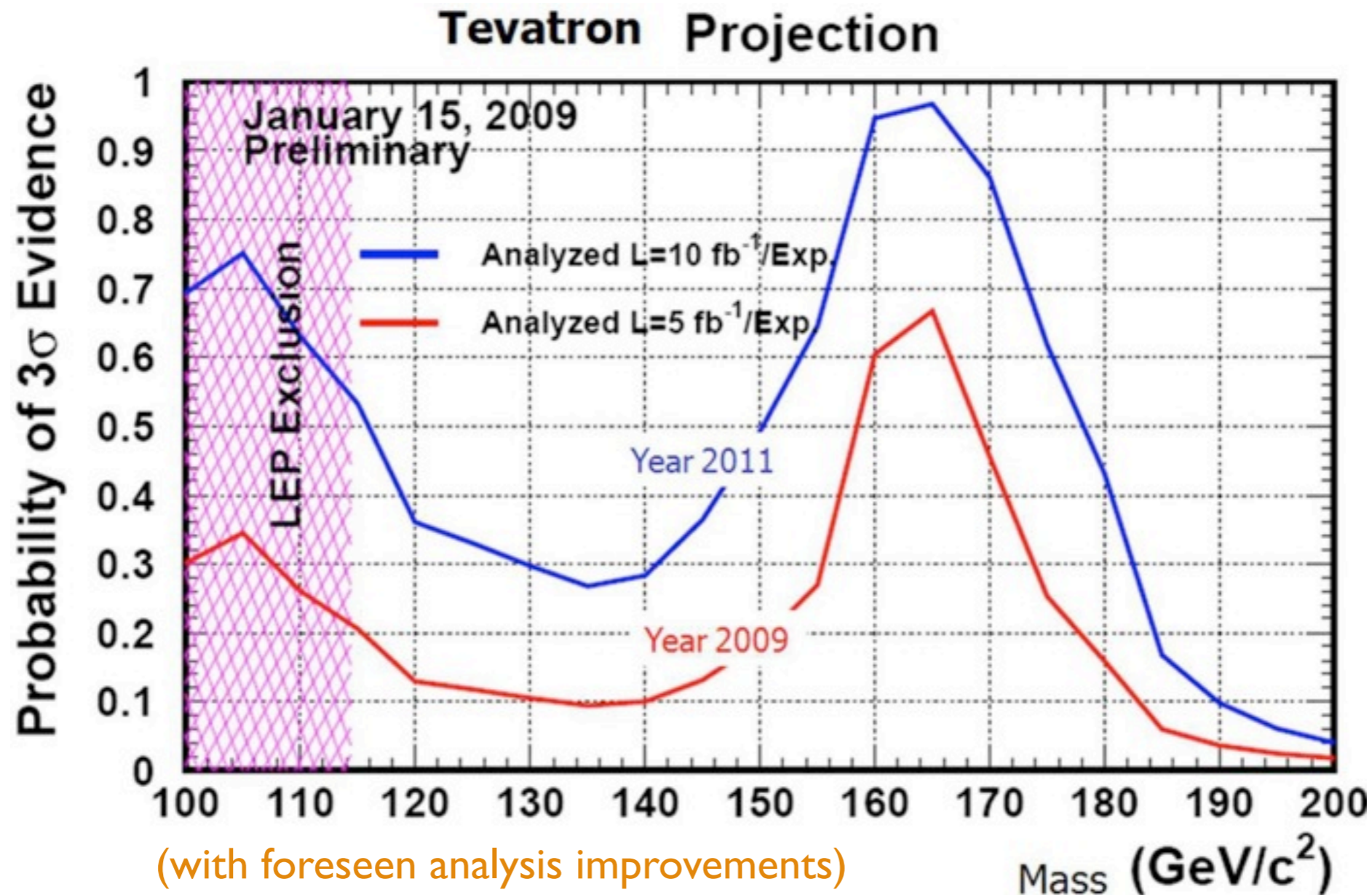


The ghost you're trying to reach is currently unavailable.
Please leave a message after the beep.

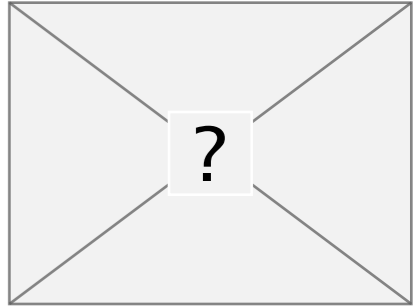
De toekomst



- ⊗ The Tevatron is set to double its present dataset!
 - DØ (and CDF) running stably & efficiently
- ⊗ The race with the LHC is on!

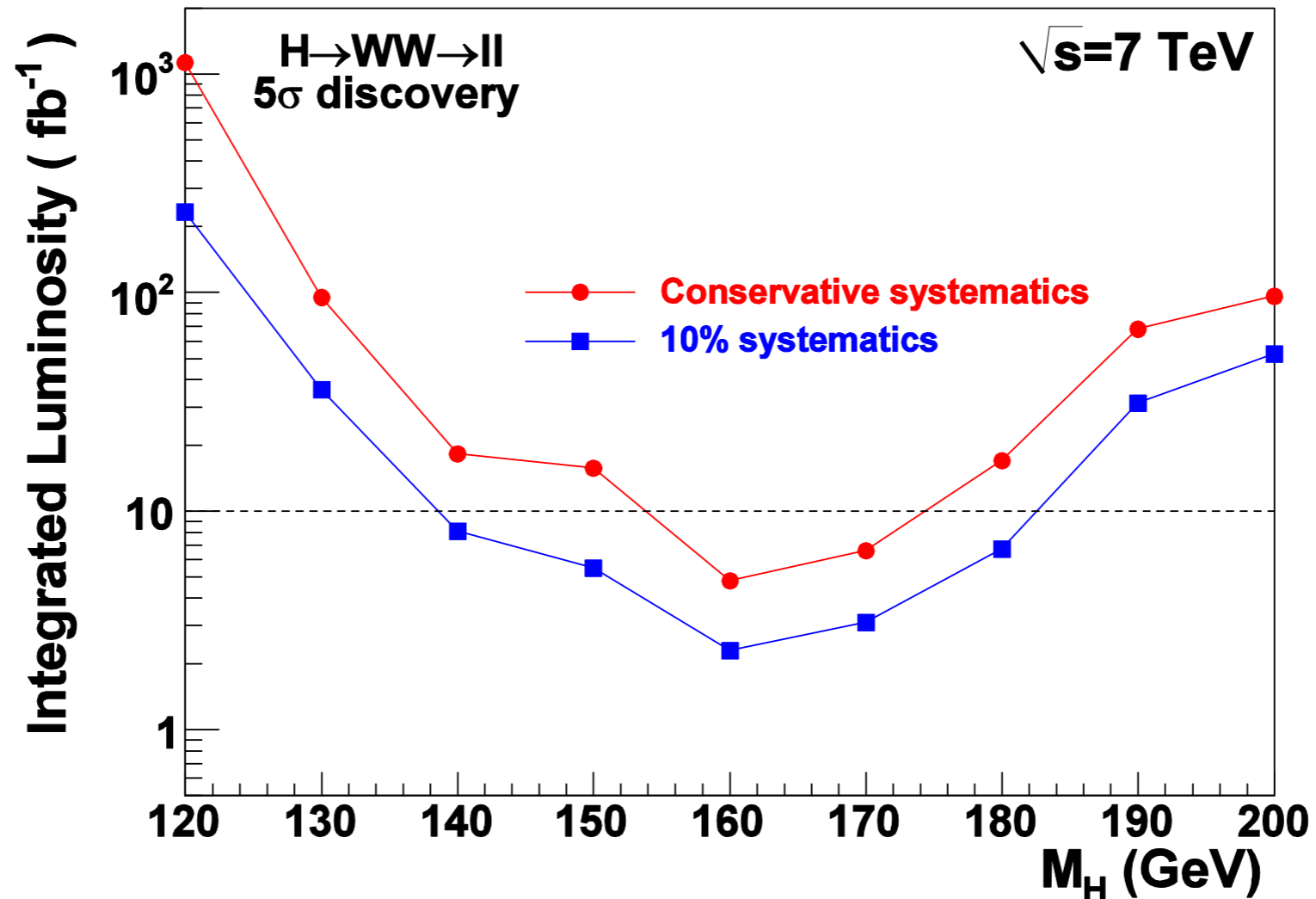


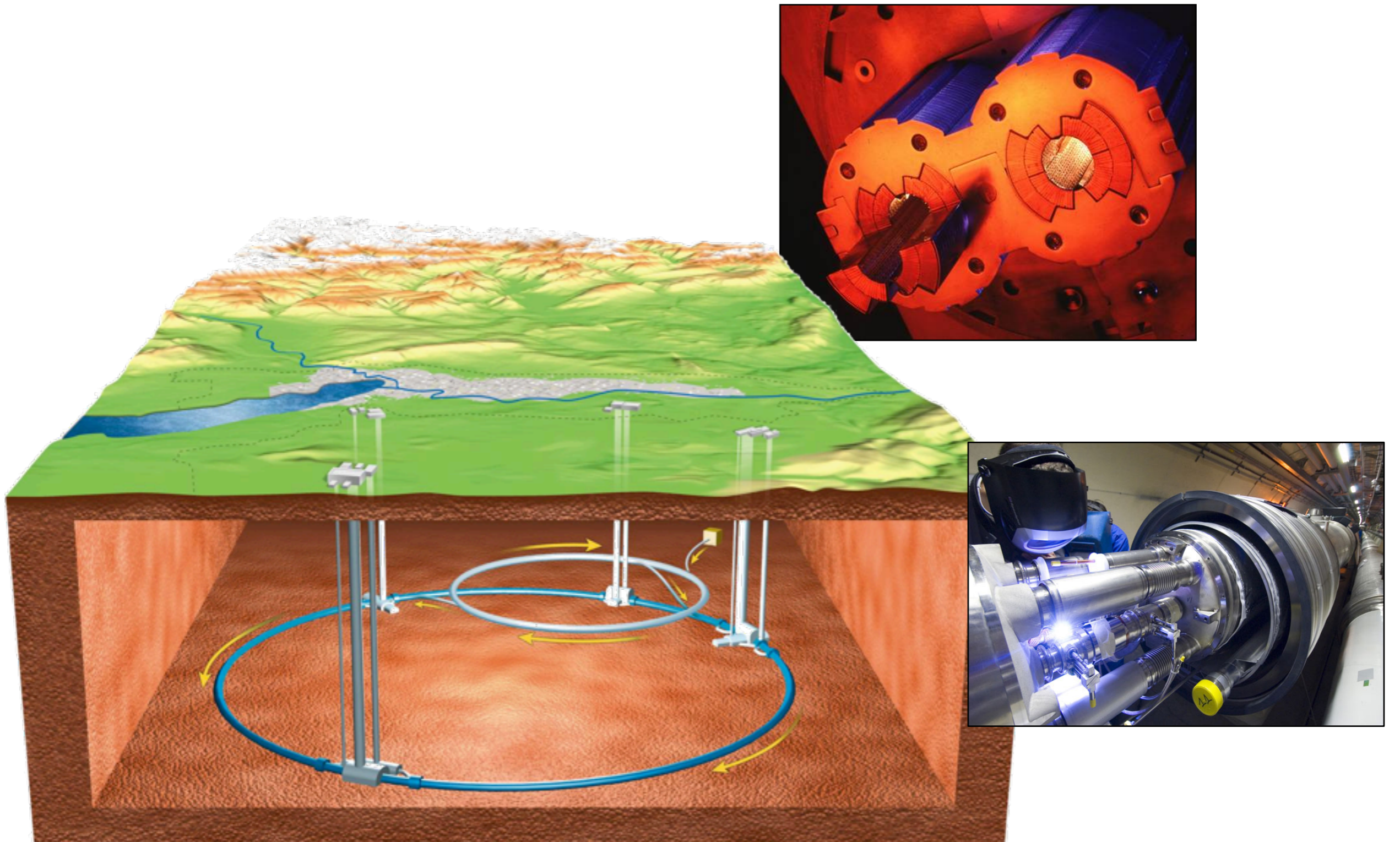
De toekomst



- ⊗ The Tevatron is set to double its present dataset!
 - DØ (and CDF) running stably & efficiently
- ⊗ The race with the LHC is on!

LHC sensitivity (H→mode only)





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

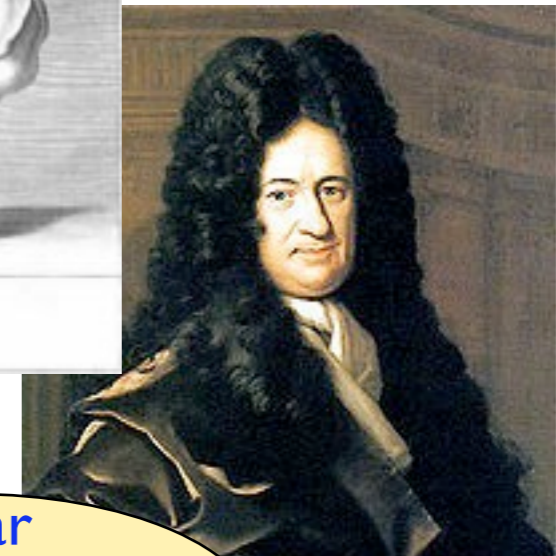


Indrukwekkende intellectuele prestaties!

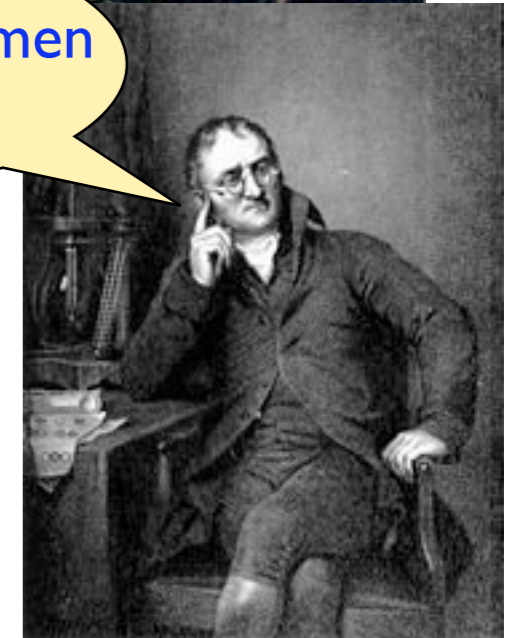
- maar zeker niet zonder competitie (andere ideeën)
- onmogelijk om zonder experiment tot eenduidige conclusies to komen

Fysica of metafysica?

- Demokritos, ca. 460-370 BC:
materie is opgebouwd uit atomen die zich “in de leegte” bevinden
- **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



maar
waaruit zijn atomen
opgebouwd?

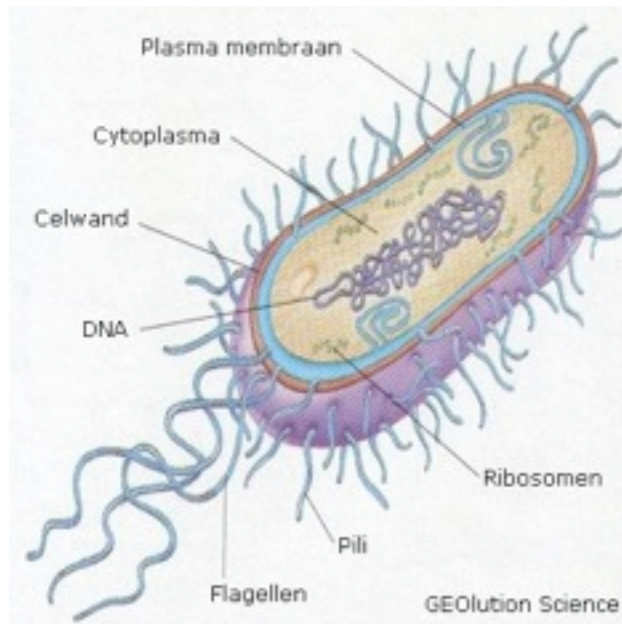


Indrukwekkende intellectuele prestaties!

- 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 μm



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



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

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

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
- **α -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor α -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
- **α -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor α -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
- **α -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor α -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
- **α -deeltjes/elektronen** “voelen” de electromagnetische (en voor α -deeltjes de sterke) wisselwerking
 - test (voornamelijk) de **elektrische ladingsverdeling**
- **neutronen (Chadwick, 1932)** voelen alleen de sterke wisselwerking
 - test de **verdeling van kernmaterie**

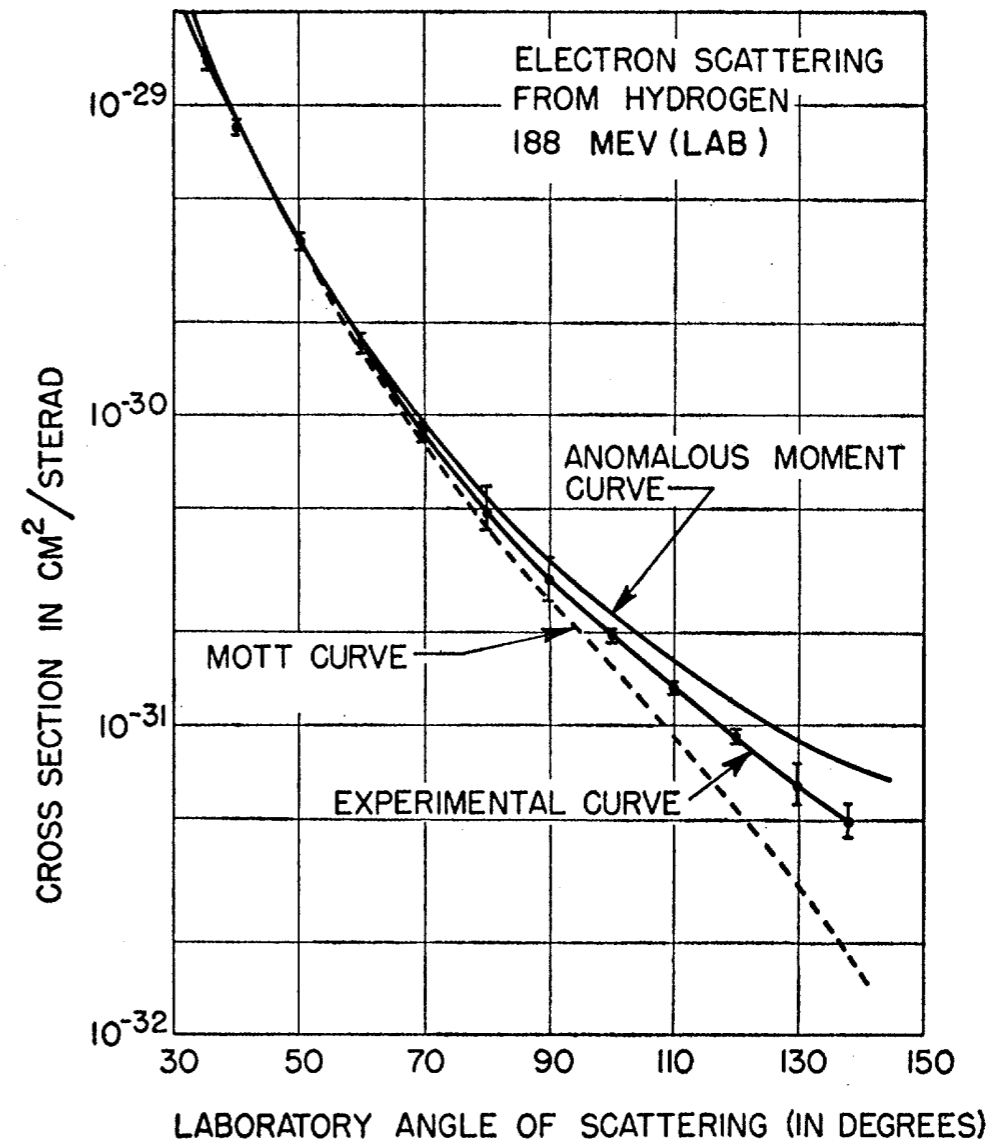
Structuur van het proton

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

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



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



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)!

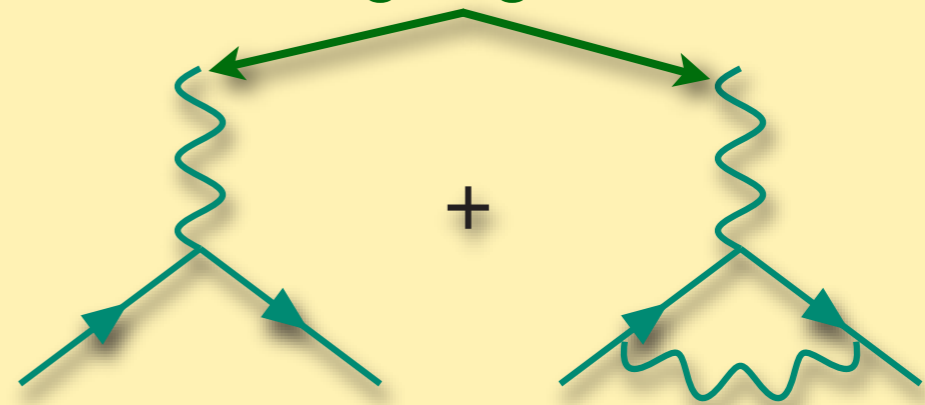
- In laagste orde, uit Dirac-vergelijking:
 $g=2$

- 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

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

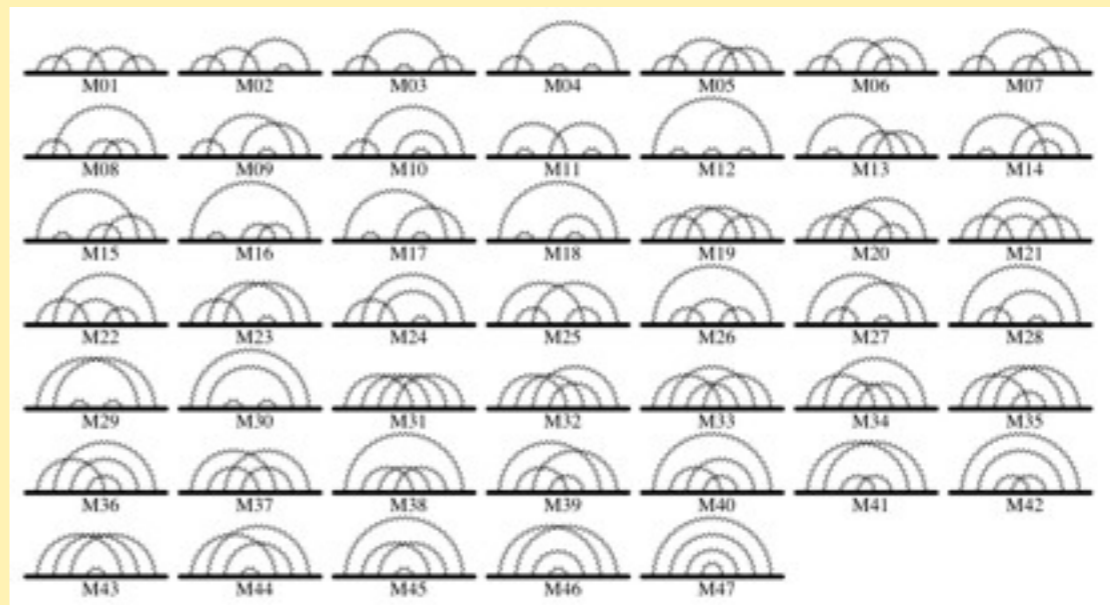
- Zeemansplitsing van (atomaire) energieniveaus
- Spin-precessie round B-field, Larmor-frequentie $\omega = \gamma B$
- QED geeft een voorspelling voor g (i.t.t. “gewone” QM)!

- 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)!

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)!

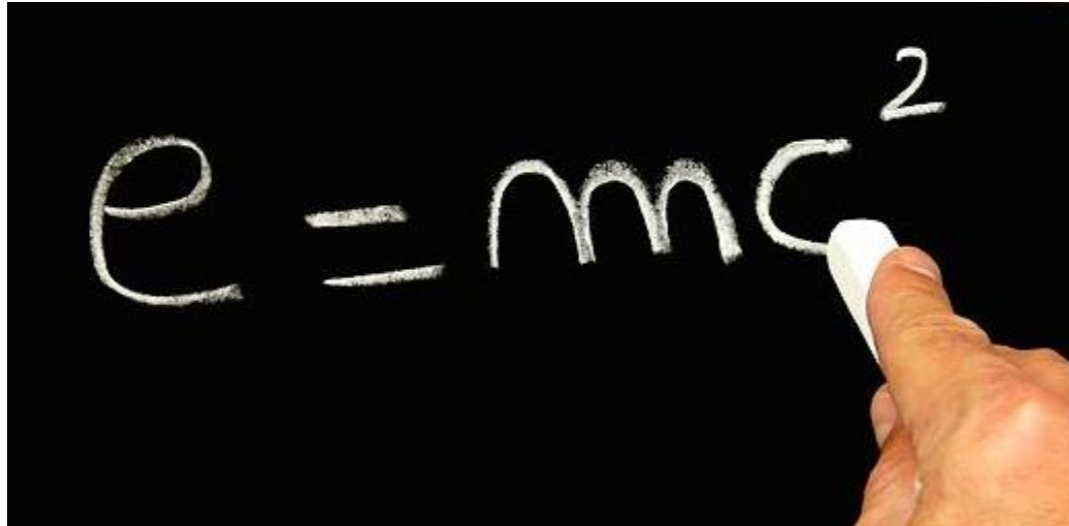
Vergelijking theorie en experiment:

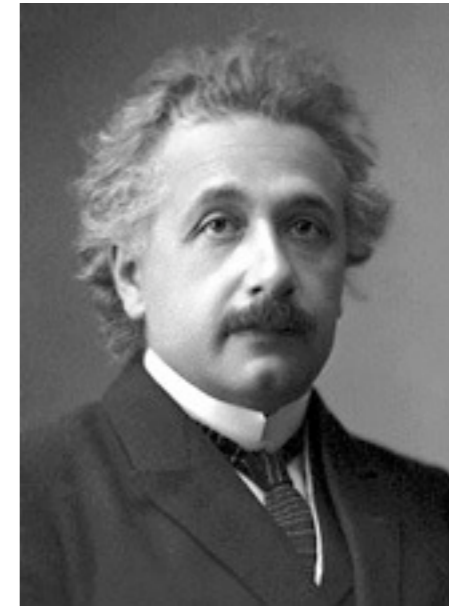
$$g/2 = \begin{cases} 1.00115965218073(28) & \text{(experiment)} \\ 1.00115965218085(76) & \text{(theorie)} \end{cases}$$

QED werkt!

Intermezzo: technieken

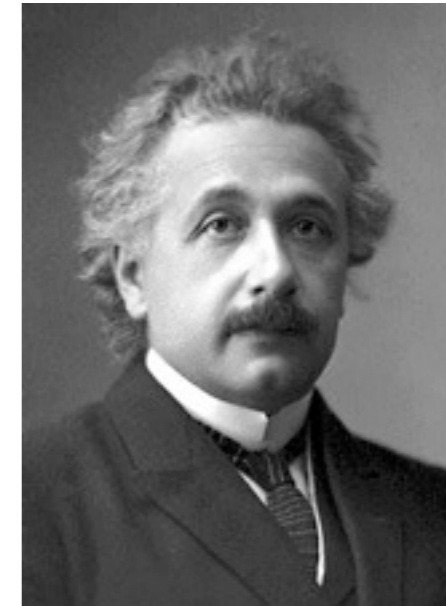
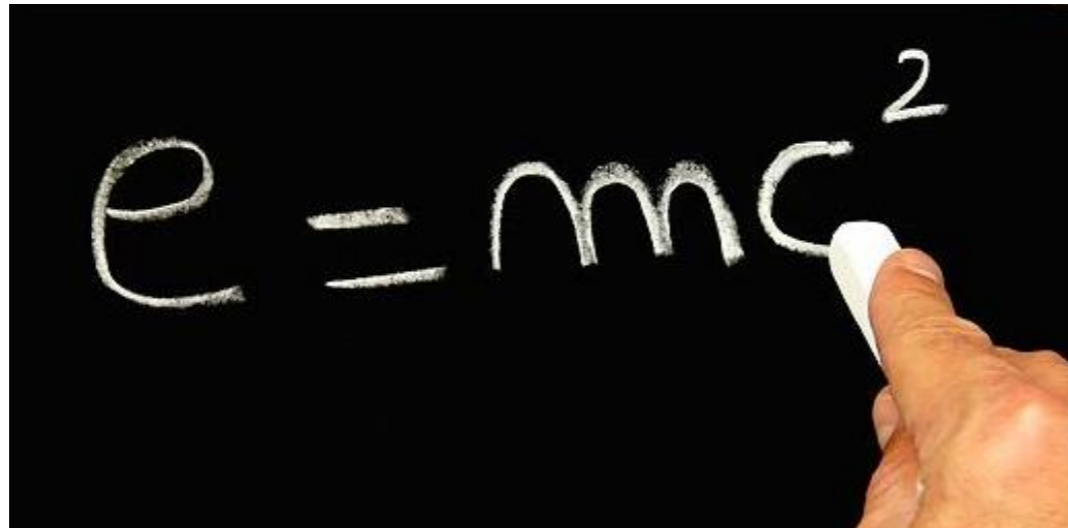
- Hoe deze kortlevende deeltjes te produceren / waar te nemen?

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 end of the equation, having just finished writing the '2' as a superscript.

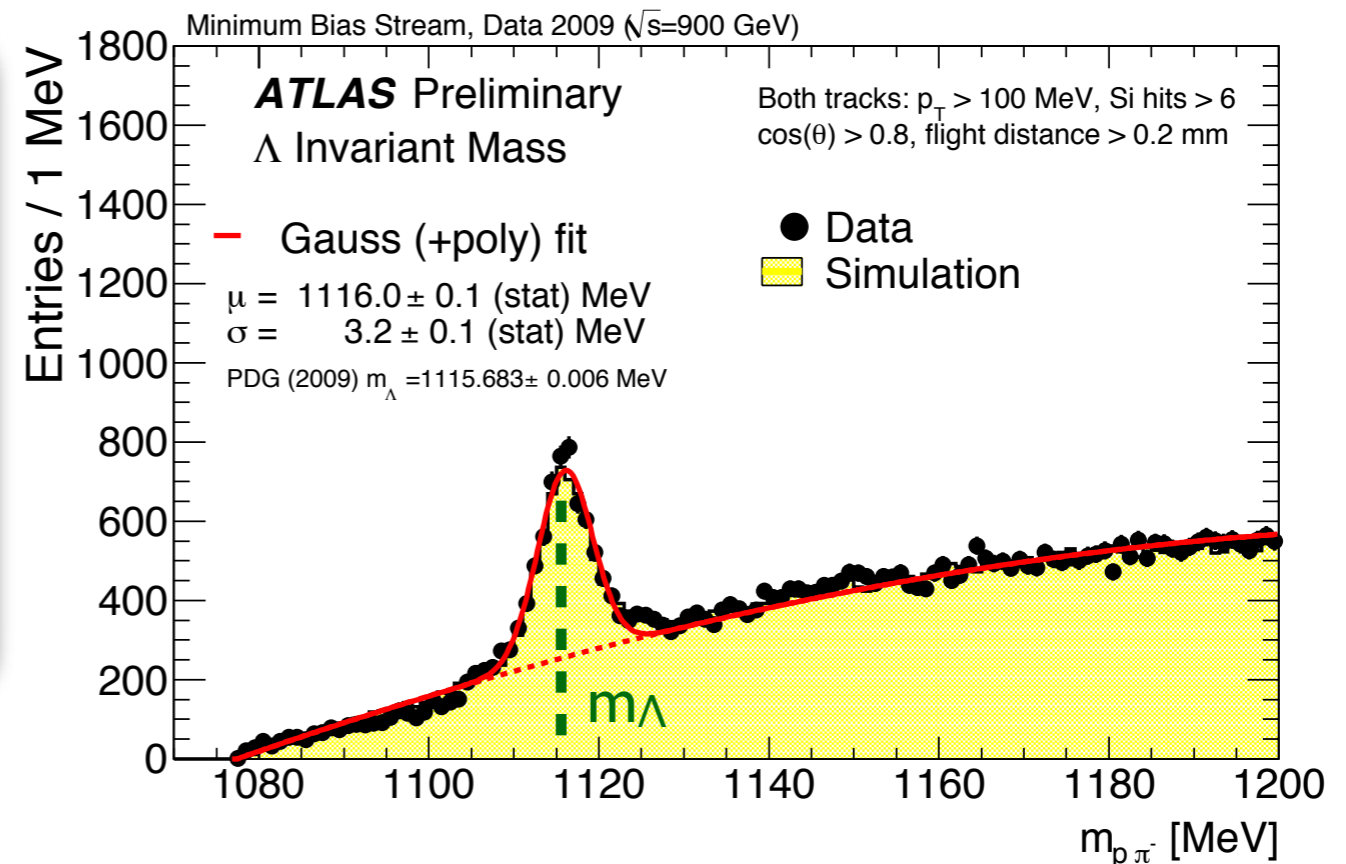


Intermezzo: technieken

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



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

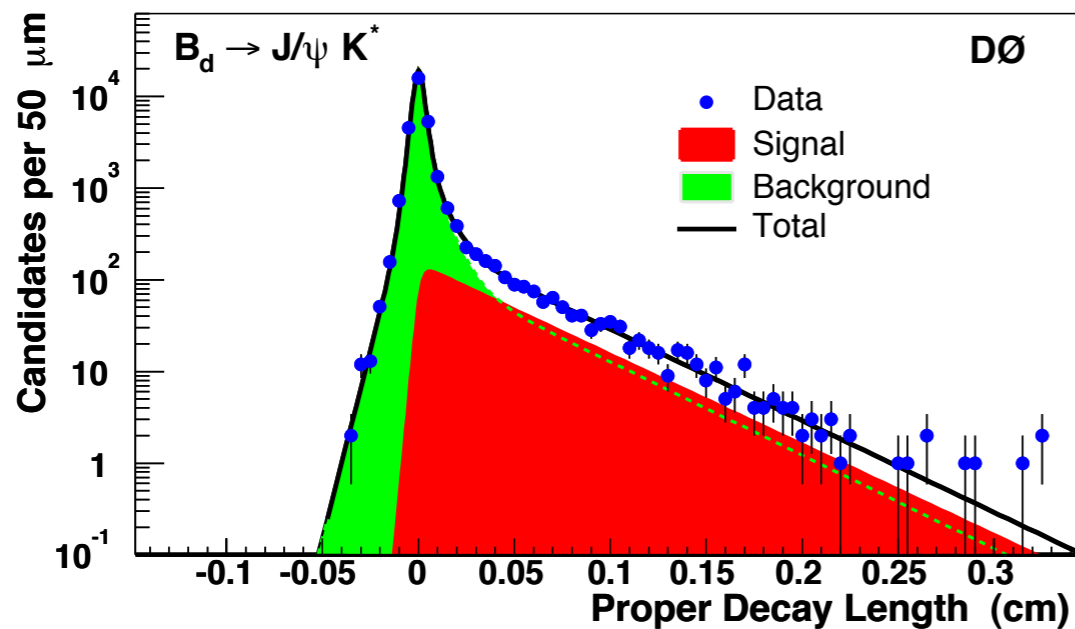


Intermezzo: technieken (2)

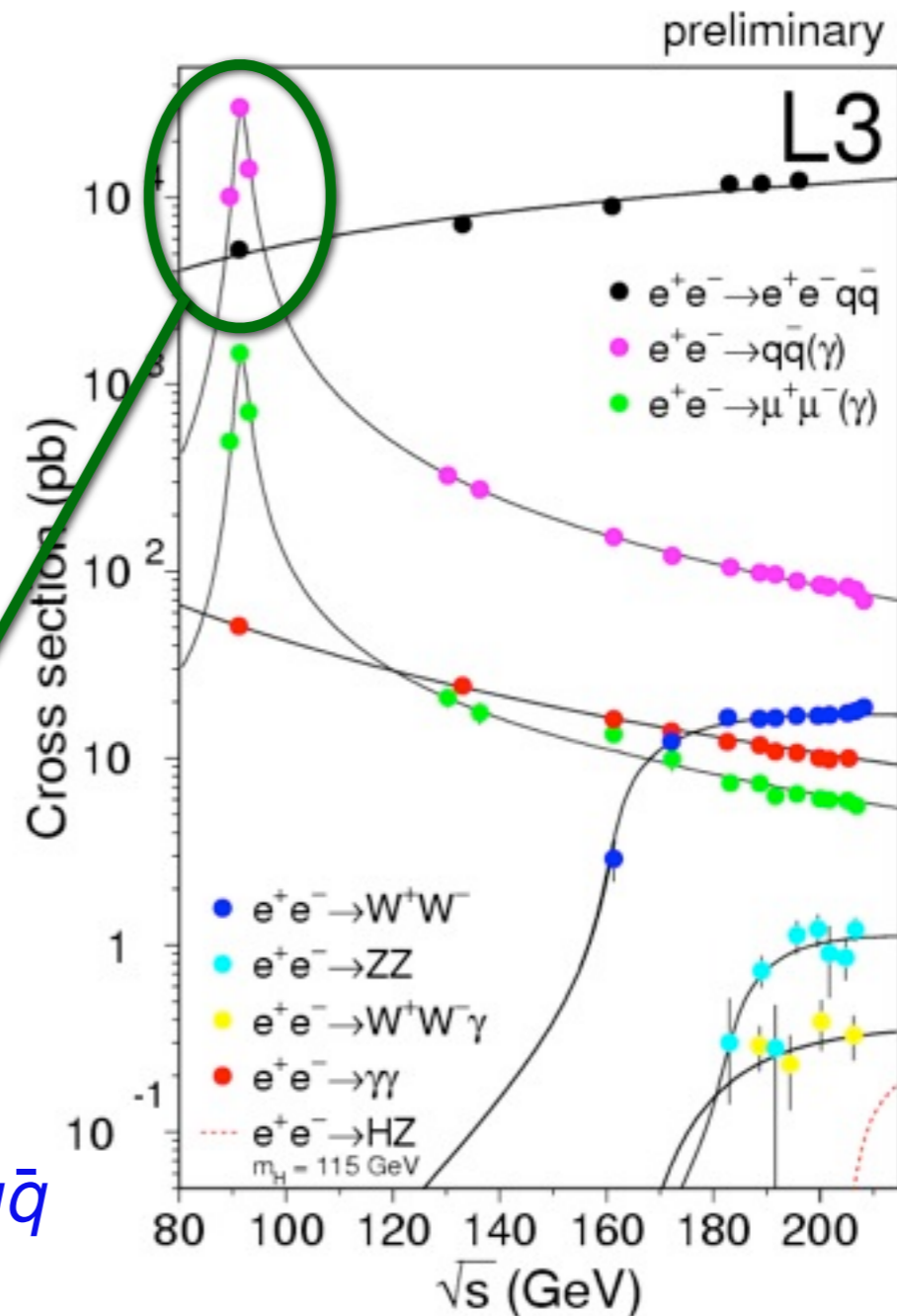
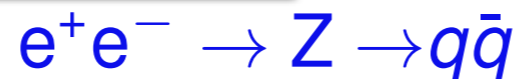
- En hoe hun levensduren te meten?

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

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



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



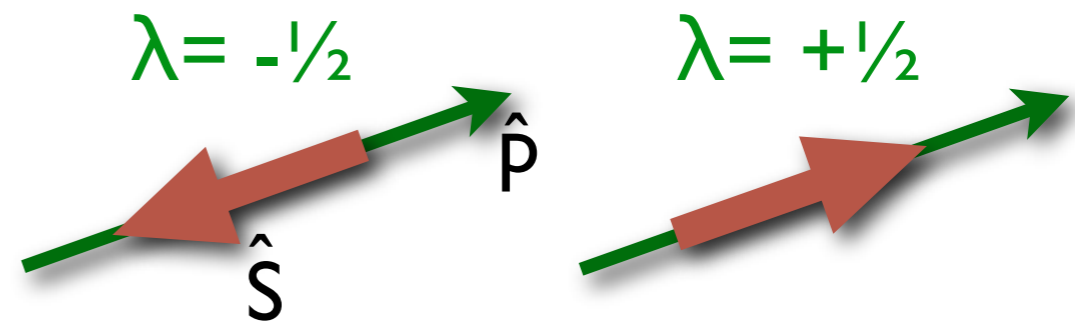
Een gewichtig probleem

- 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)

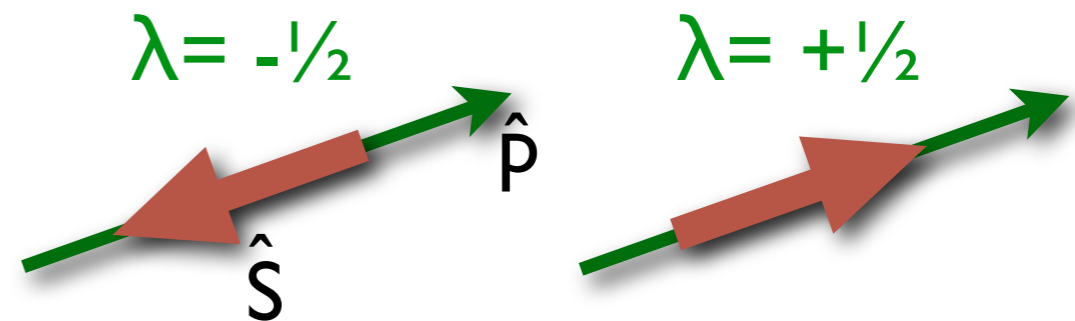


- links- en rechtshandige fermionen zijn eigenlijk **verschillende deeltjes**
- dit kan alleen als ze **strikt massaloos** zijn

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

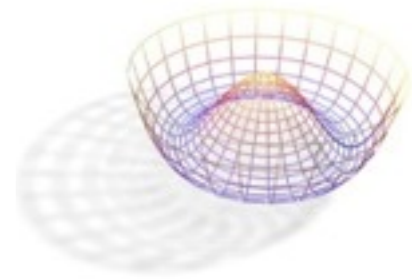


Het Higgsmechanisme

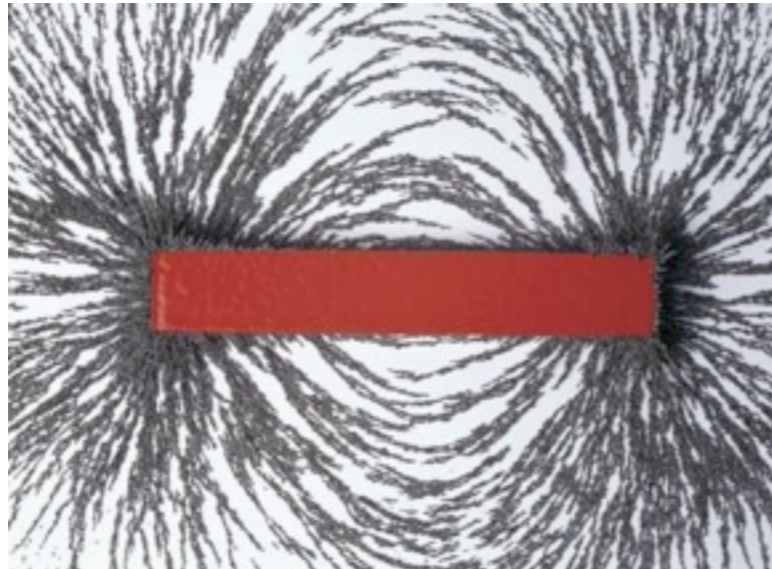
- Deeltjes krijgen “effectief” massa door interactie met het Higgsveld



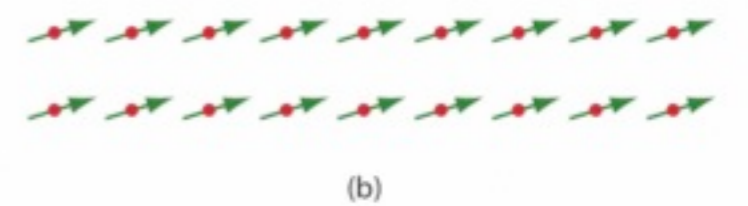
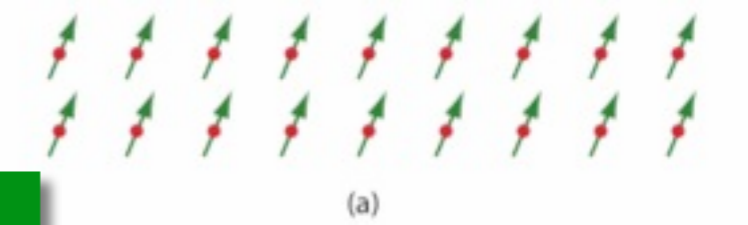
Magnetische Analogieën



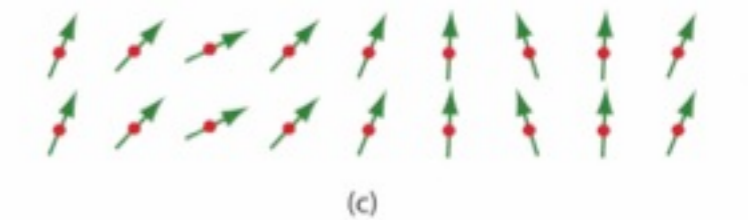
- Spontane symmetriebreking



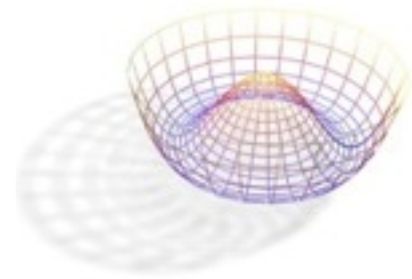
equivalente
grondtoestanden



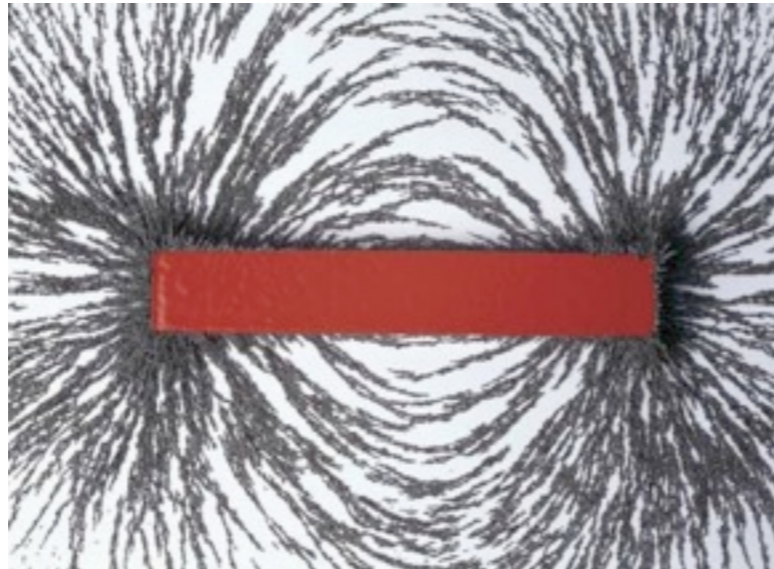
excitatie



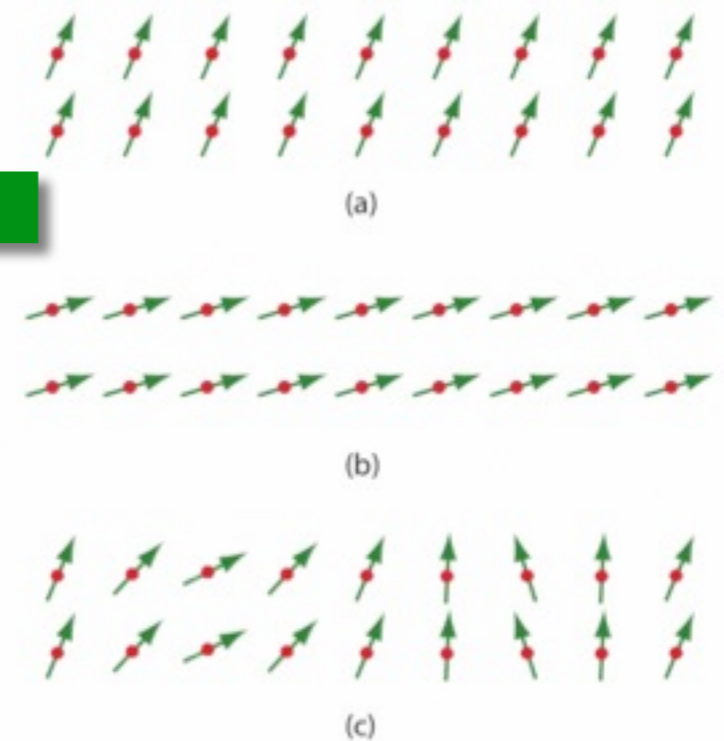
Magnetische Analogieën



- Spontane symmetriebreking



equivalente
grondtoestanden



excitatie

- Massieve fotonen



Meißner-effect: supergeleider
stoot magnetische veldlijnen af

- massieve fotonen
- maar dit heeft een medium nodig (e⁻-paar condensaat)!

In de deeltjesfysica is het
“medium” het vacuum!