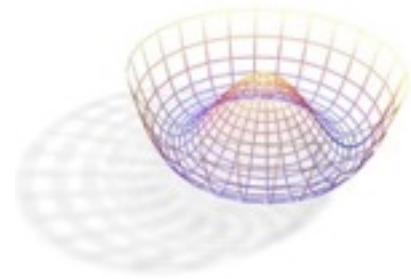




Statistiek bij de ontdekking van het Higgsdeeltje

Frank Filthaut
Radboud Universiteit Nijmegen & Nikhef

New York Times, 2008...



Asking a Judge to Save the World, and Maybe a Whole Lot More



Valerio Mezzanotti for The New York Times

Part of a detector to study results of proton collisions by a particle accelerator that a federal lawsuit filed in Hawaii seeks to stop.

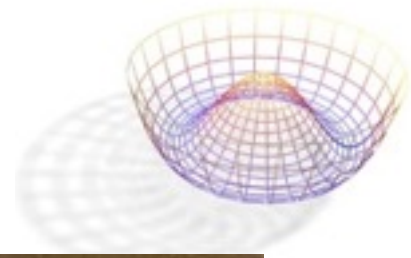
By DENNIS OVERBYE

But Walter L. Wagner and Luis Sancho contend that scientists at the European Center for Nuclear Research, or CERN, have played down the chances that the collider could produce, among other horrors, a tiny black hole, which, they say, could eat the Earth. Or it could spit out something called a “strangelet” that would convert our planet to a shrunken dense dead lump of something called “strange matter.” Their suit also says CERN has failed to provide an environmental impact statement as required under the National Environmental Policy Act.

Inhoud:

Deeltjesfysica en het Higgsdeeltje
Zoektocht naar het Higgsdeeltje
En verder...

Voorbij het blote oog



Antoni van Leeuwenhoek, 1632-1723:

- uitvinding van de microscoop
- ontdekking van de eerste bacteriën (“kleine beestjes”), 0.5 - 500 μm

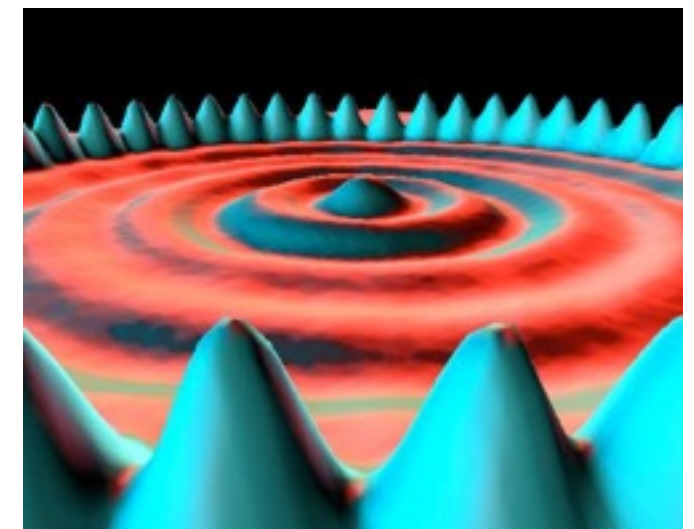


E. coli (grootte $\sim 1 \mu\text{m}$)

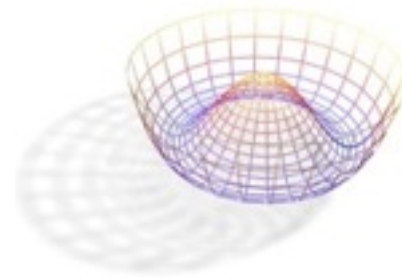


Resolutie beperkt tot $\sim \lambda$

- grens bij zichtbaar licht: 0.5 μm
- verbetering to $\sim 1 \text{\AA}$ mogelijk m.b.v. **STM, AFM**



Het atoom van binnen bekeken

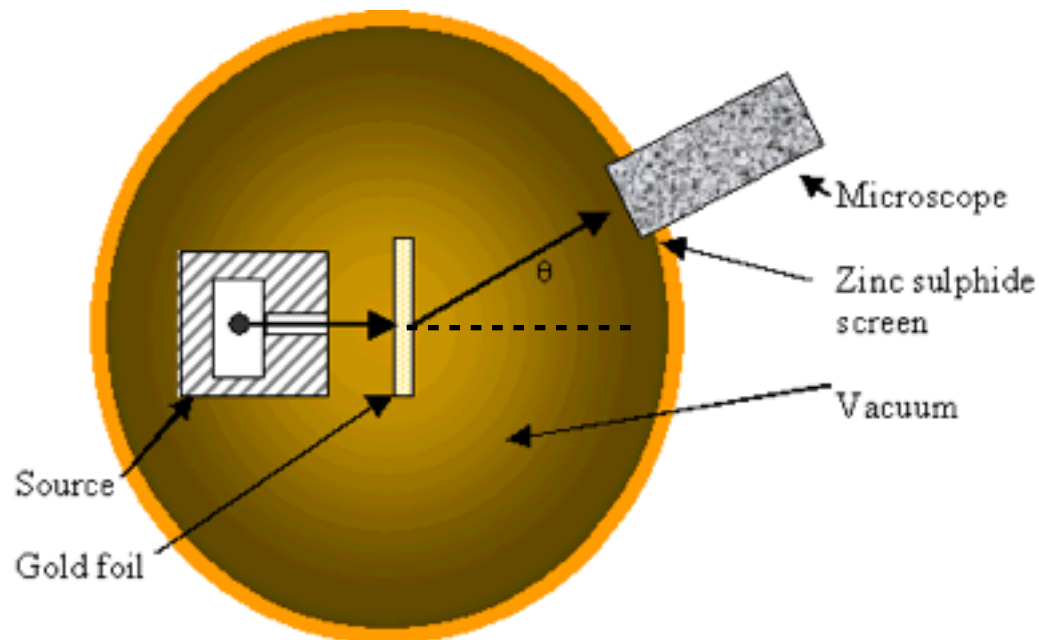


Idee: gebruik deeltjes om kleinere structuren te “zien”

- Rutherford (1911): verstrooiing van α -deeltjes (${}^4\text{He}$ -kernen, $E_\alpha \approx 3 \text{ MeV}$) aan een goudfolie
- quantummechanische vertaling: de Broglie-golflengte $\lambda \sim h/p \sim 10 \text{ fm}$

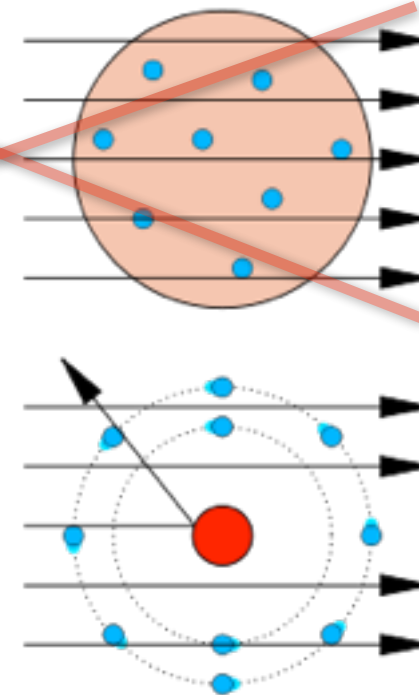
constante van Planck

impuls α -deeltjes
($p \approx m \cdot v$)

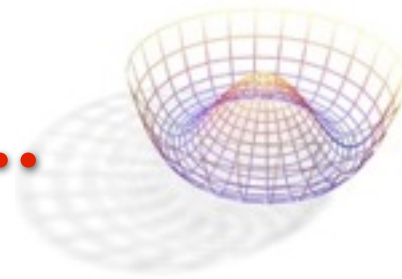


~~diffuse
ladingsverdeling
(Thomson)~~

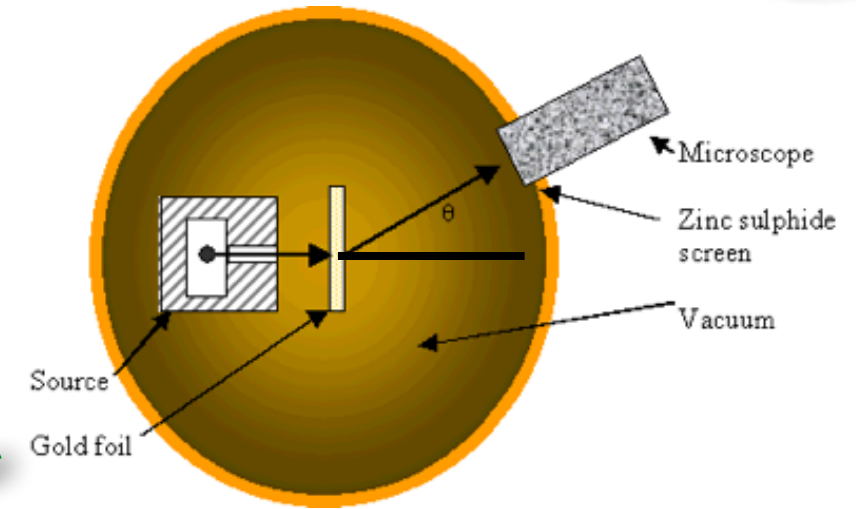
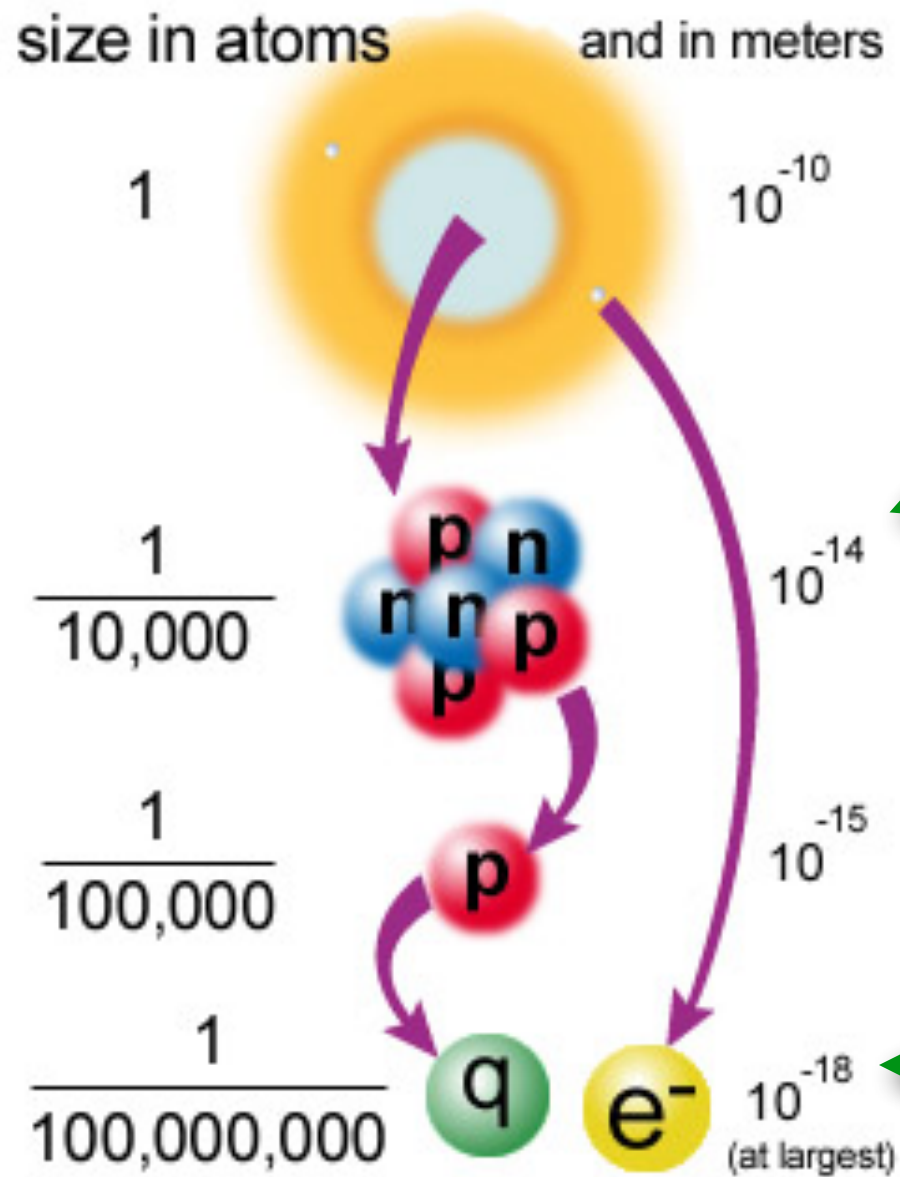
ladingsverdeling
met atoomkern
(Rutherford)



Zoektocht naar elementaire deeltjes...



size in atoms and in meters

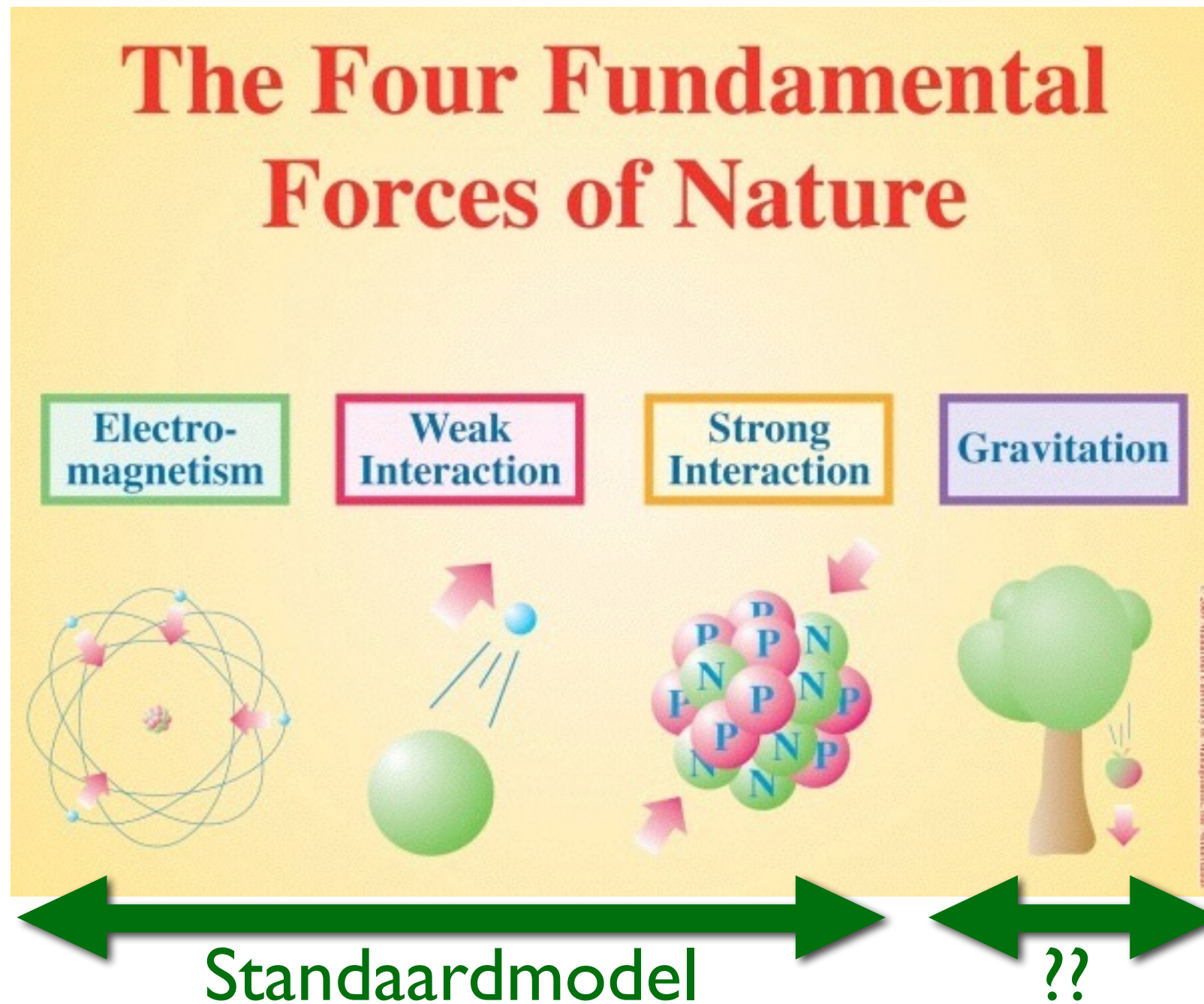
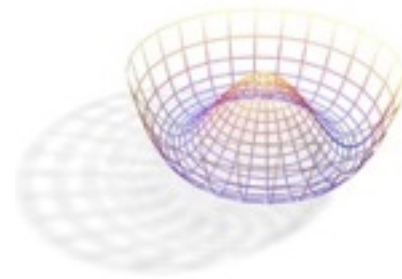


Rutherford, 1911



Friedman, Kendall, Taylor, 1968

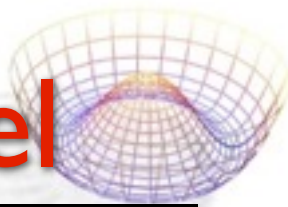
... en hun wisselwerkingen



Alle wisselwerkingen in het Standaardmodel beschreven m.b.v. ijktheorie en overgebracht door “krachtdeeltjes”

$$U(1)_Y \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)_c$$

Elementaire deeltjes in het Standaardmodel



Leptonen:

- deeltjes zonder sterke wisselwerking (alleen zwak, electromagnetisch)
- 3 “families” (en antideeltjes)

Quarks:

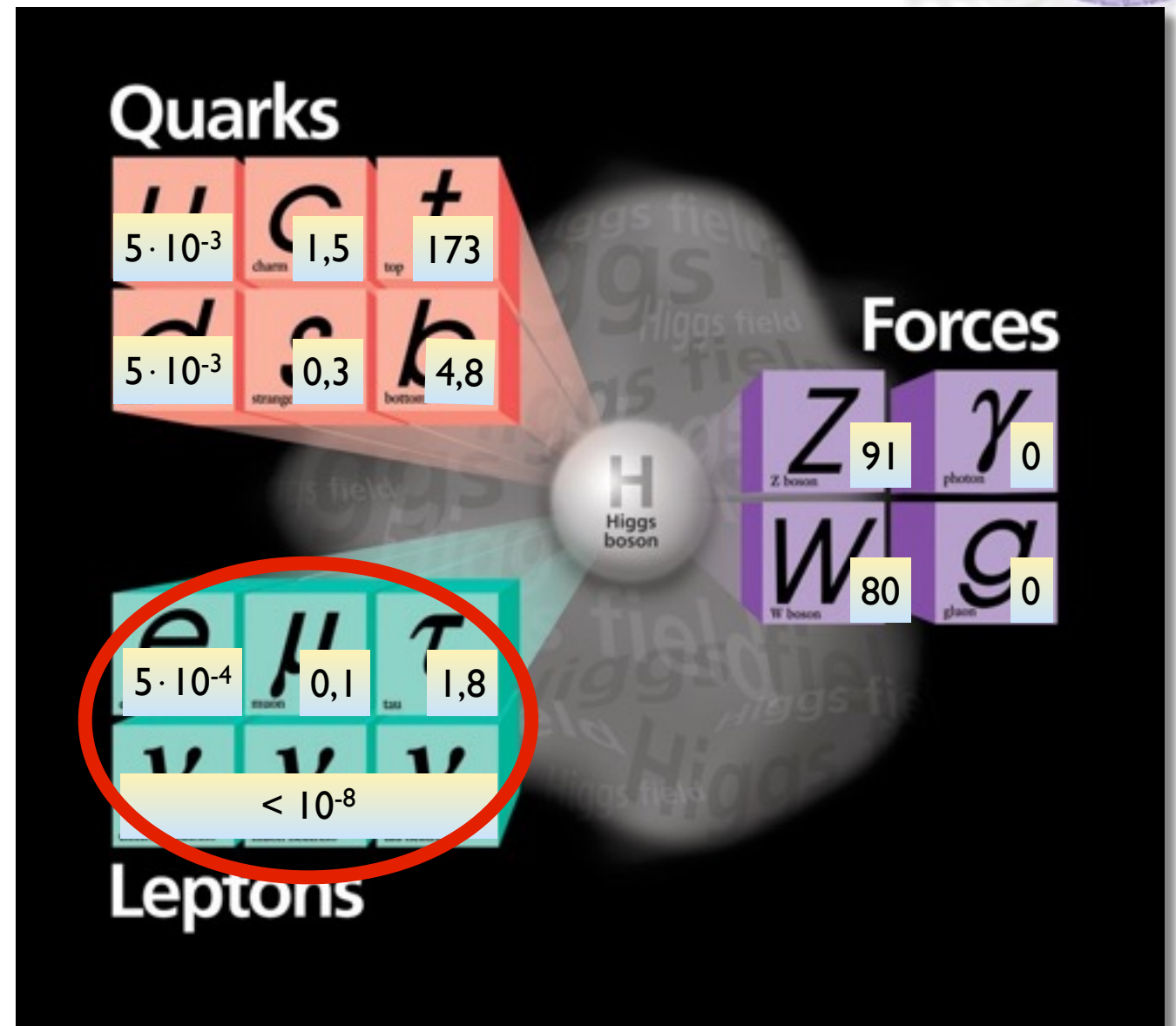
- voelen ook de sterke wisselwerking (en komen niet als vrije deeltjes voor maar alleen in gebonden toestanden: **hadronen**)
- 3 “families” (en antideeltjes)

Krachtdeeltjes:

- foton (EM), gluonen (sterke wisselwerking), W/Z (zwakke wisselwerking)

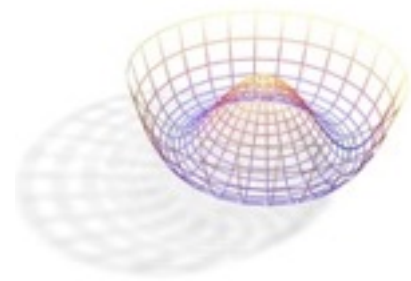
zwaar \Rightarrow korte dracht ($\ll 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

Ontbrekend (tot 2012): het Higgsdeeltje



massa's in $\text{GeV}/c^2 \sim m_p$

Massa uit interactie

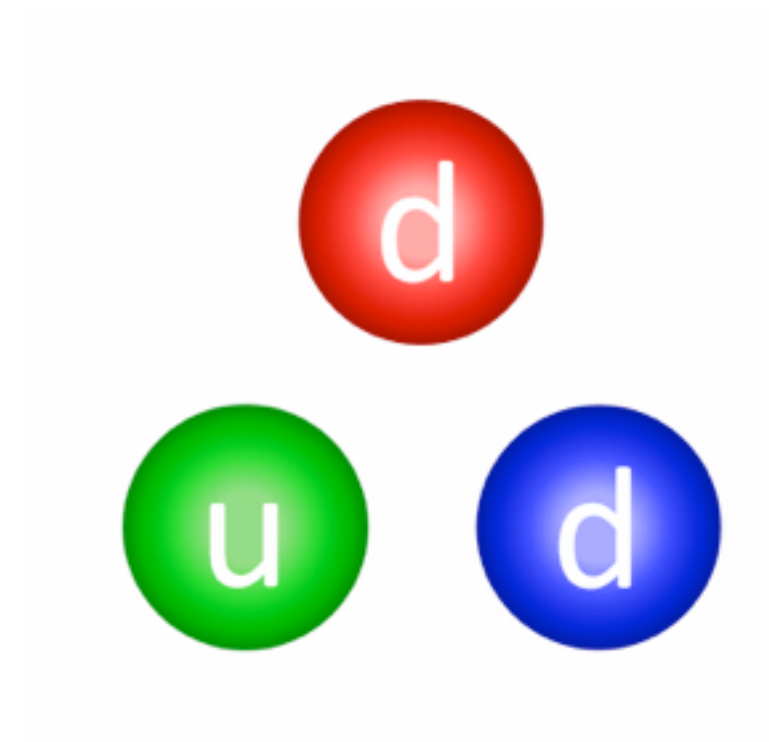
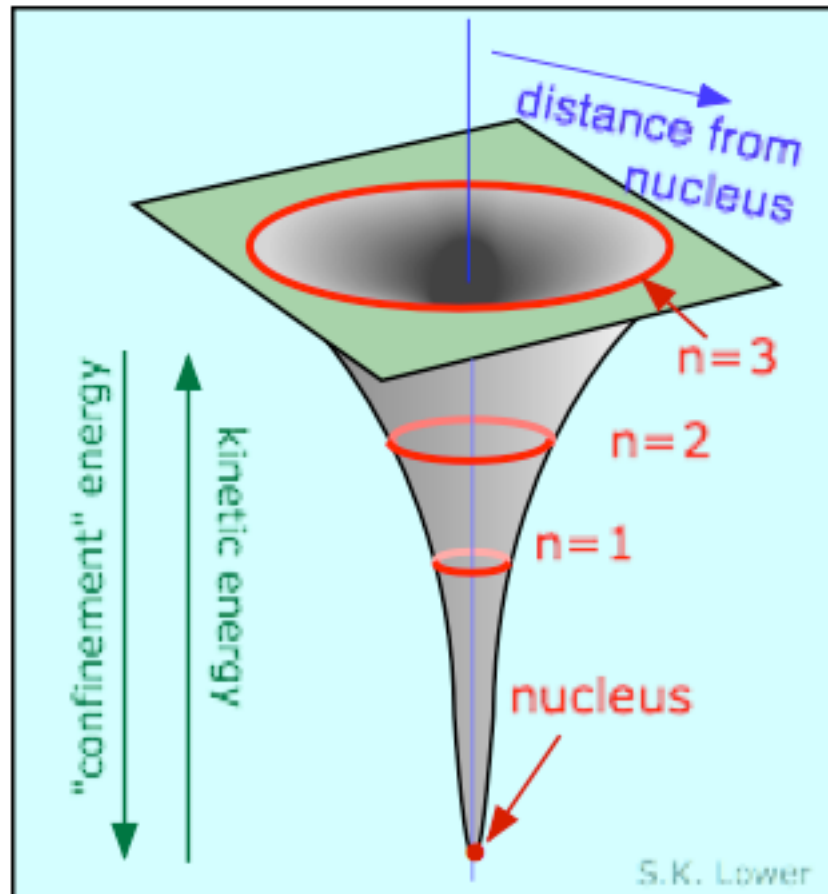


Waterstofatoom: bindingsenergie
t.g.v. Coulomb-interactie

- $m_H \approx m_p + m_e - 13,6 \text{ eV}/c^2$

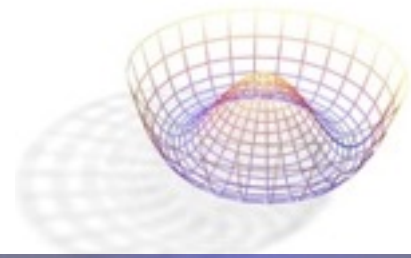
Proton: bijna alle massa t.g.v.
interactie

- som van quarkmassa's:
 $\sim 10 \text{ MeV}/c^2 \ll m_p$



Maar dit werkt niet bij
elementaire deeltjes!

Quantum-velden



Een “veld”: overal aanwezig

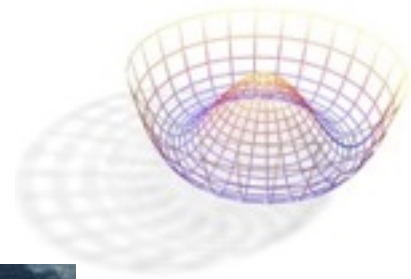
- voorbeeld van een klassiek veld: wateroppervlak
- aangeslagen toestand (“excitatie”): een golf
 - bewegende golf, hoewel het wateroppervlak zelf niet beweegt!

Quantum-velden:

- excitaties zijn **deeltjes!**
 - voorbeeld: licht (het foton) is een excitatie van het elektromagnetische veld

Deeltjes krijgen hun massa door hun interactie met het Higgs-veld!

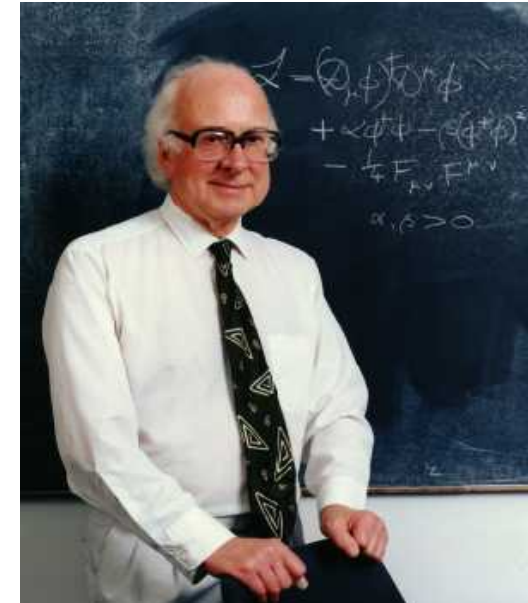
Dramatis Personae



Robert Brout †



François Englert



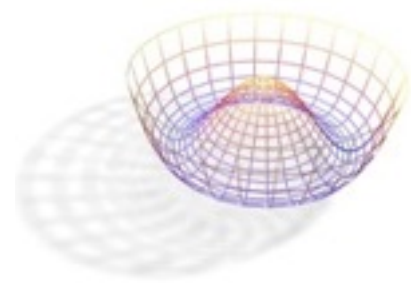
Peter Higgs

Theoretische artikelen uit 1964: bijna een halve eeuw oud!

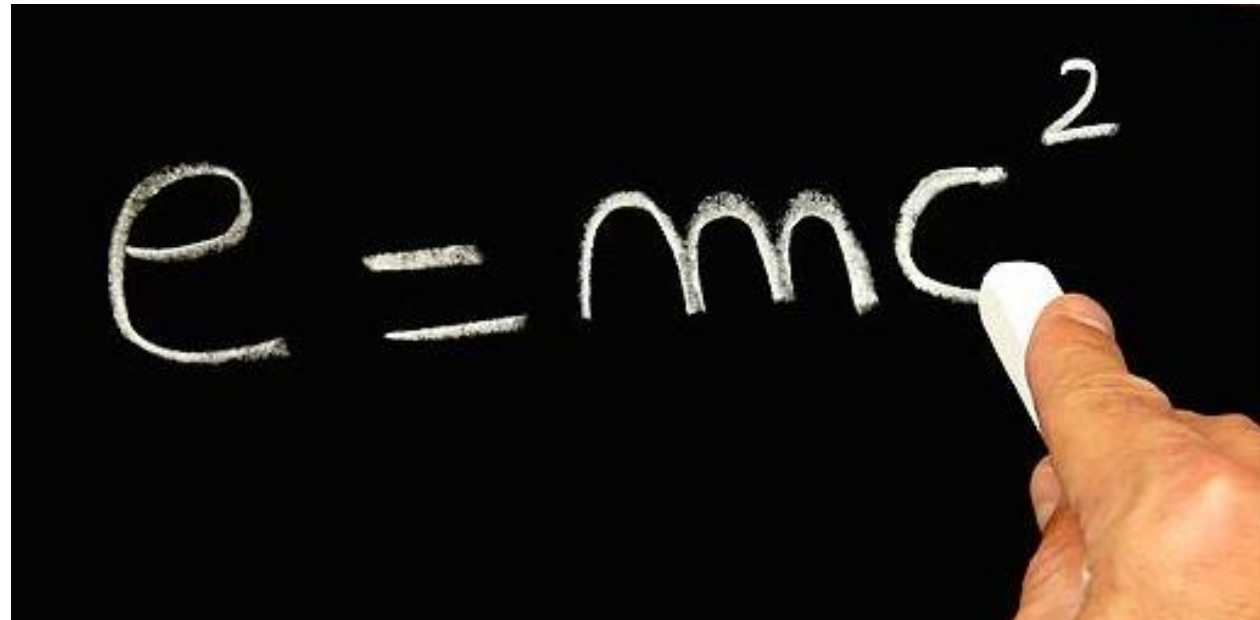
- maar pas echt een belangrijk onderwerp na aantonen van de consistentie van het Standaardmodel ('t Hooft en Veltman, 1973) en de ontdekking van de W- en Z-deeltjes (1983/4)
- Nobelprijs in 2013
 - “for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider”



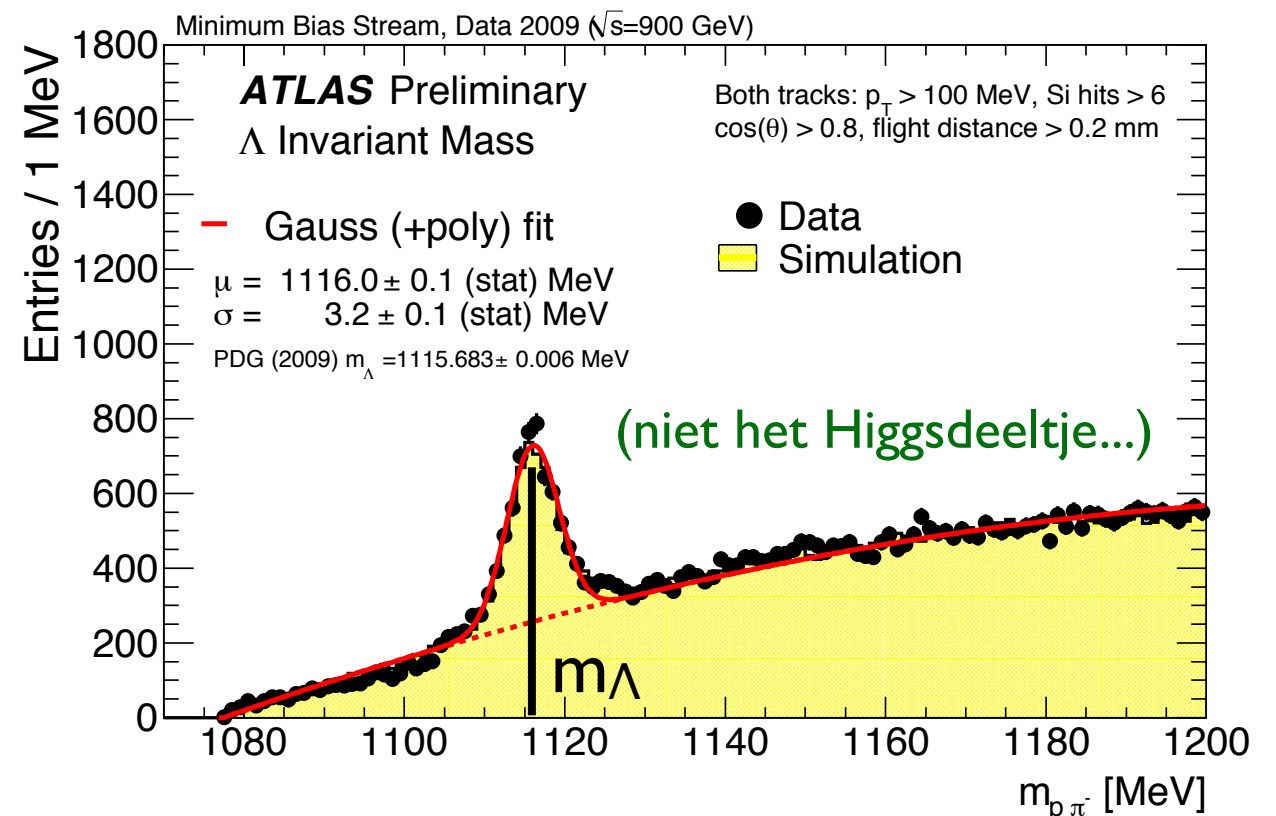
Technieken



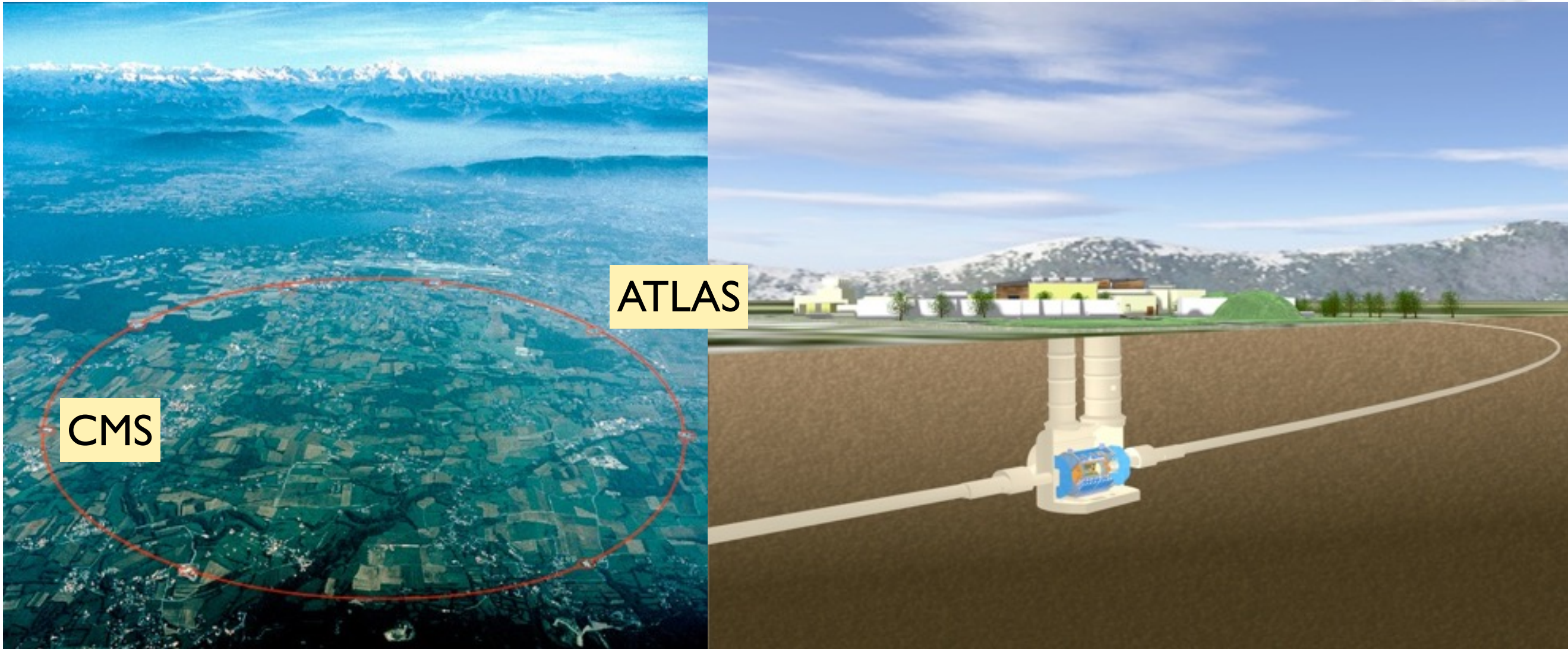
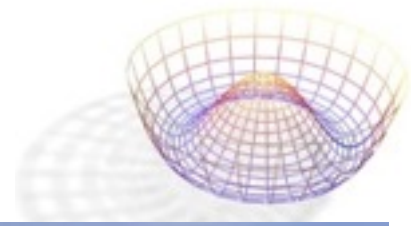
Het Higgsdeeltje leeft zeer kort ($\tau \approx 10^{-22}$ s) dus hoe het te ontdekken?



- botsingen: converteer kinetische energie naar massa
- vervalsprocessen: reconstrueer de massa van het vervallende deeltje (als alle vervalsproducten gemeten worden)



De Large Hadron Collider

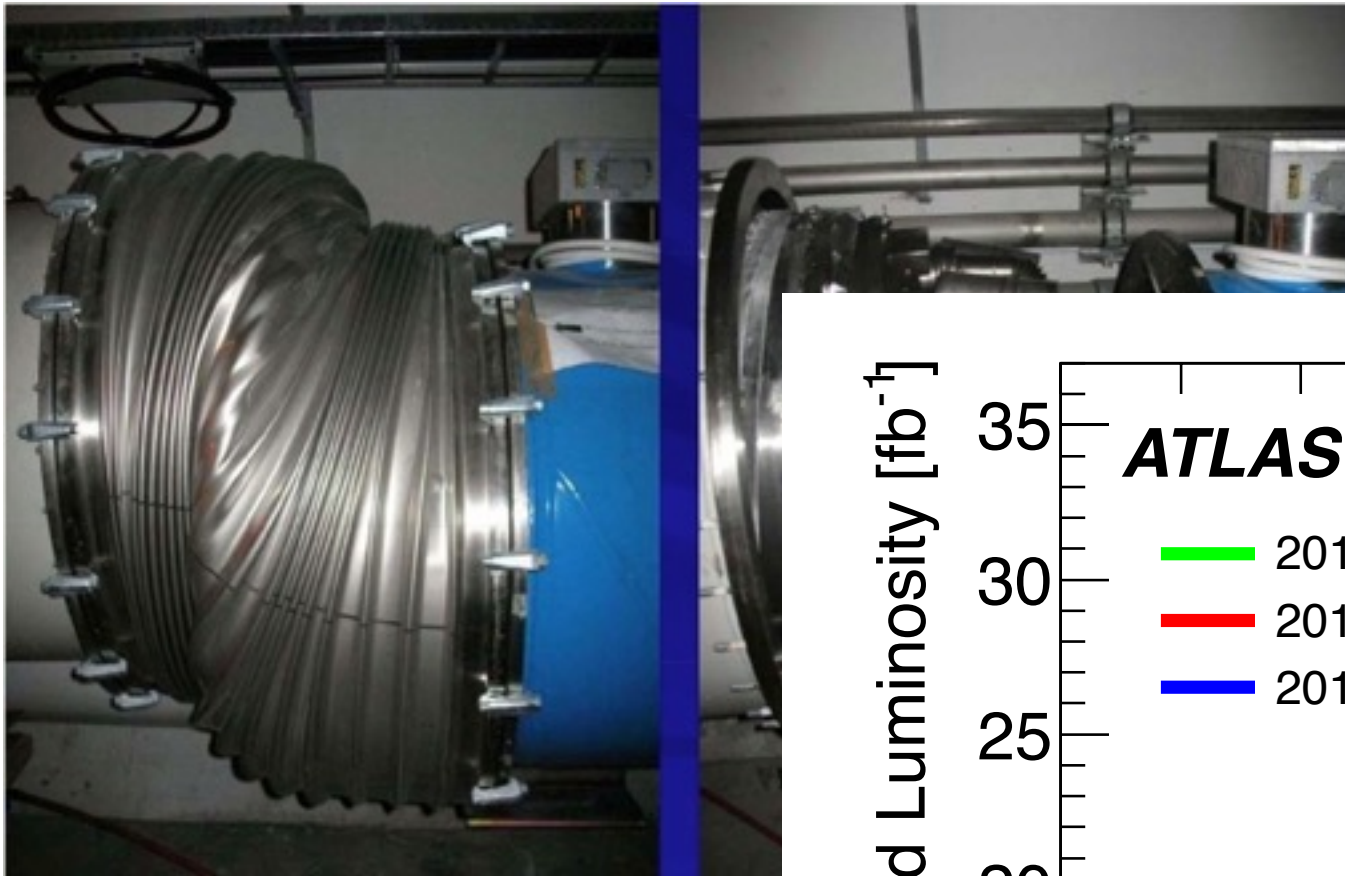
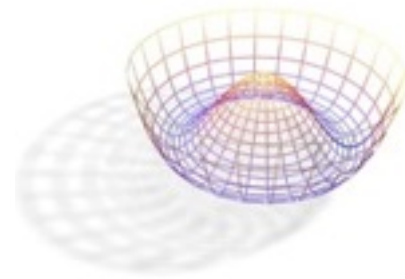


27 km omtrek, 2 protonbundels met
 $E = 4 \text{ TeV}$ ($v/c \approx 0,99999997$) \Rightarrow 7 TeV

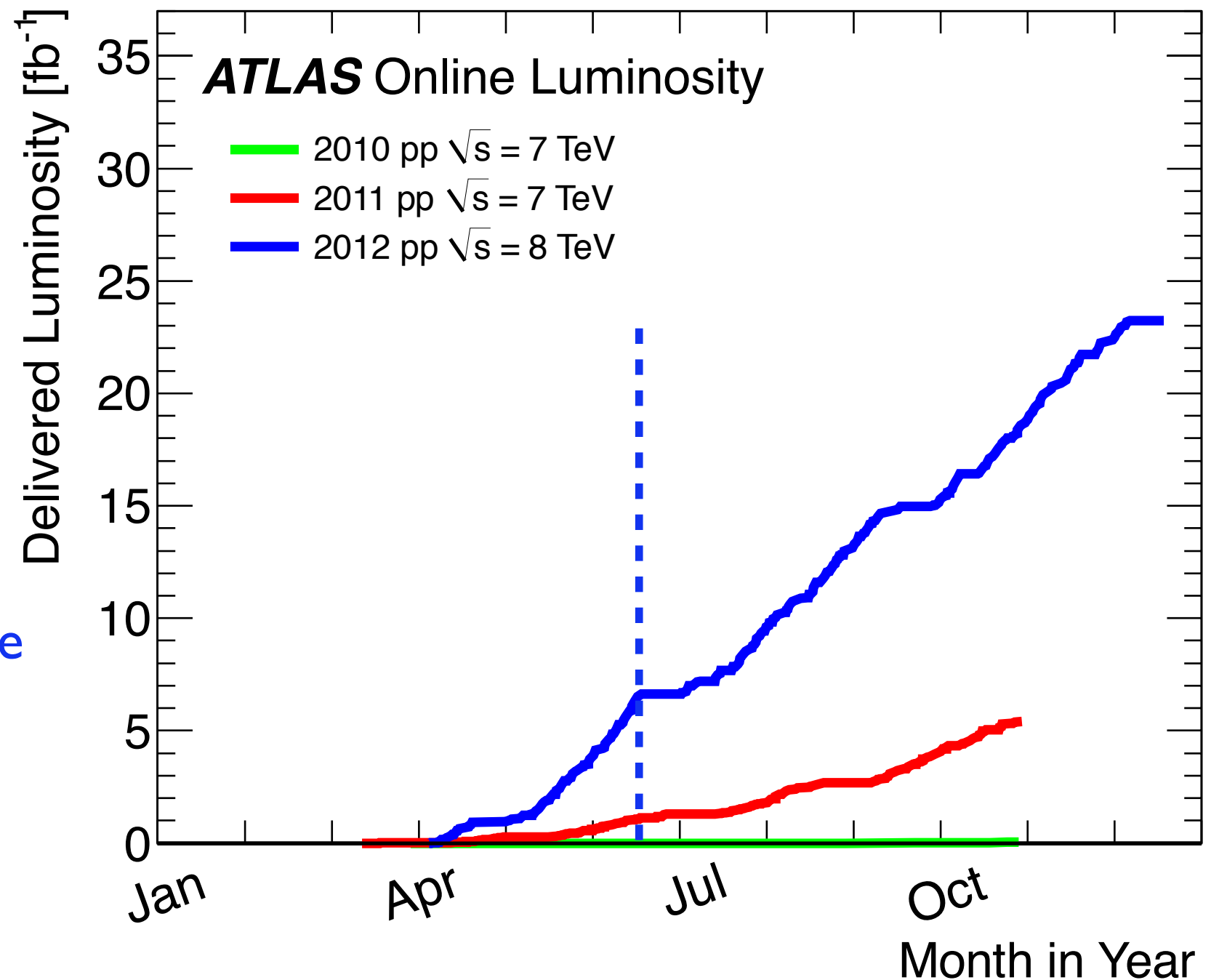
- hoge energie \Rightarrow sterk magneetveld (tot 8,5 Tesla)
- superfluide ($T = 1,9 \text{ K}$)



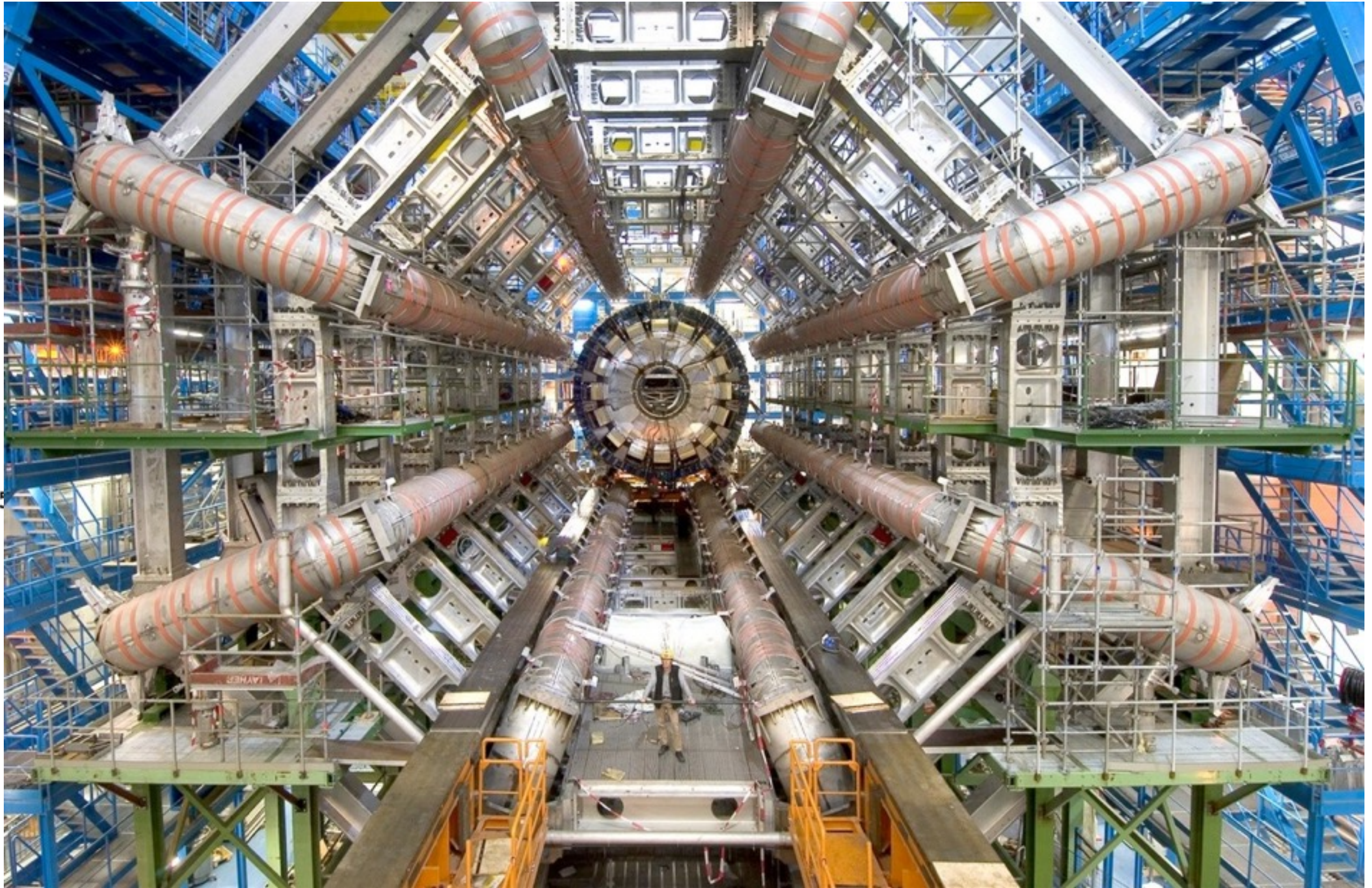
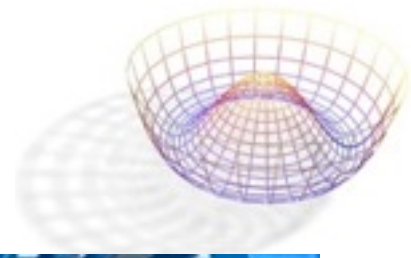
De LHC: een succes!



In 2 jaar meer botsingen
dan in 10 jaar bij de vorige
versneller

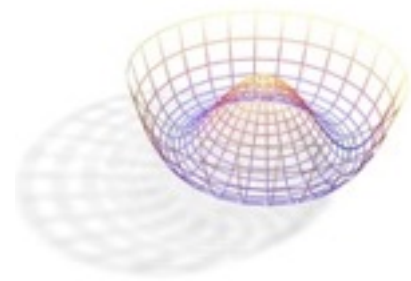


ATLAS: A Toroidal Lhc ApparatuS



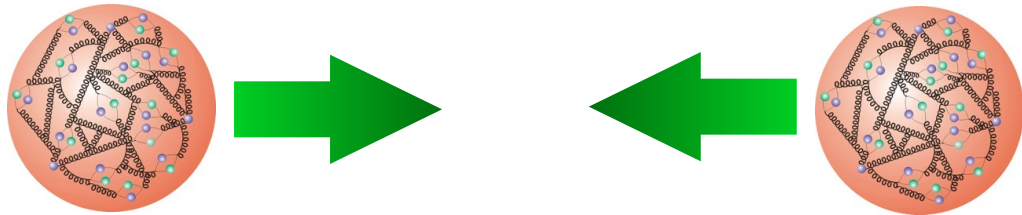
25

Botsingen in de LHC/ATLAS



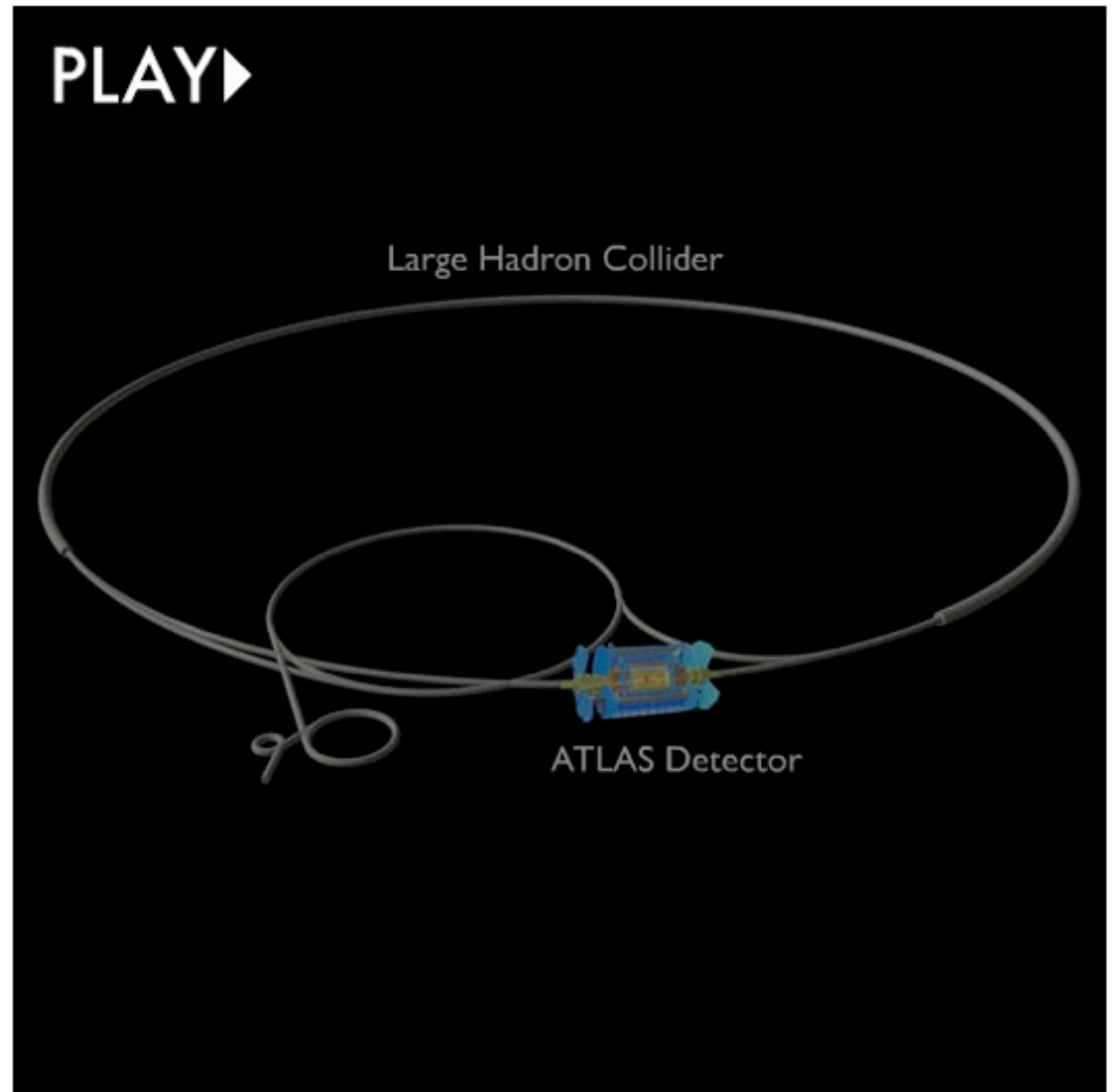
100 miljard protonen per pakketje van 20 μm dik, 10 cm lang

- iedere 8 meter een pakketje

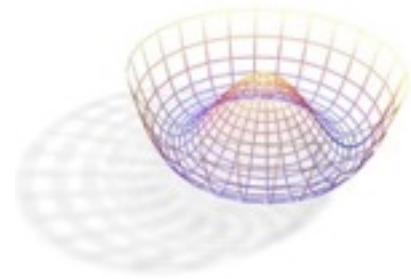


Tot 40 miljoen “foto’s”
per seconde!

- ~ 100 miljoen “pixels” per foto



Detectie van deeltjes

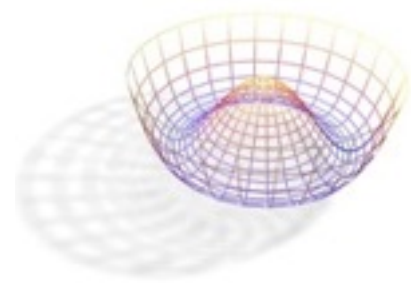


Behalve deeltjes die afzonderlijk te zien/meten zijn:

- **neutrino's** (schijnbare schending van behoud van impuls)
 - **hadron-jets** (vele hadronen die min of meer in dezelfde richting bewegen)
- en meer specialistisch:
- **T-leptonen** (zeer smalle hadron-jets)
 - **b-jets** (afkomstig van b-quarks:
“lange” levensduur van B-hadronen, $\tau_B \approx 1,5 \text{ ps}$)

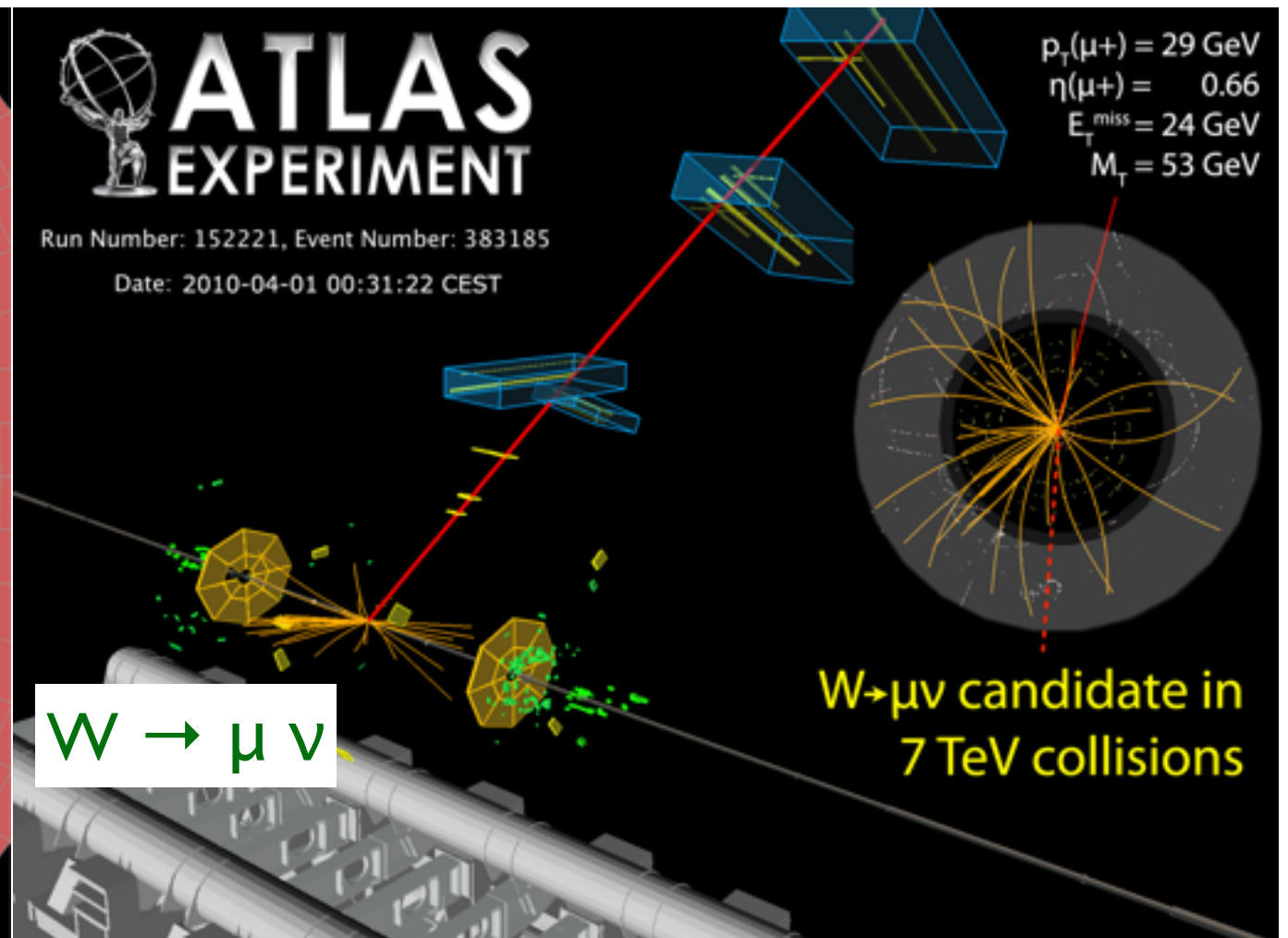
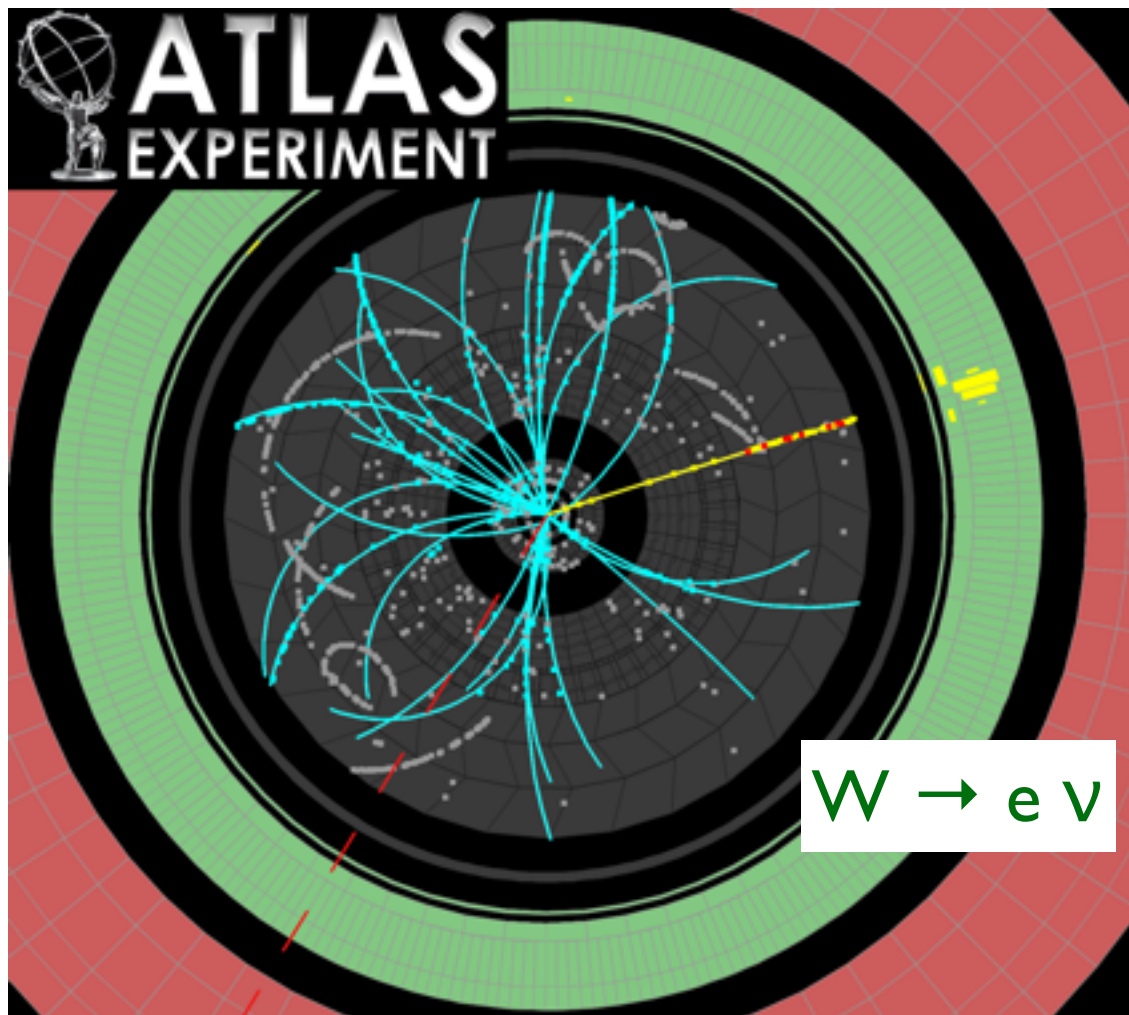


“Herkennen” van botsingen

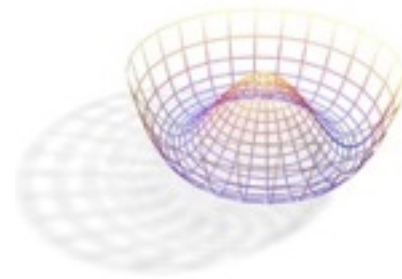


Reconstrueer zo goed mogelijk de impulsen van geladen en neutrale deeltjes \Rightarrow aanwijzingen voor kort levende deeltjes

- en probeer zoveel mogelijk “interessante” deeltjes te herkennen (e^\pm , μ^\pm , γ , ...)

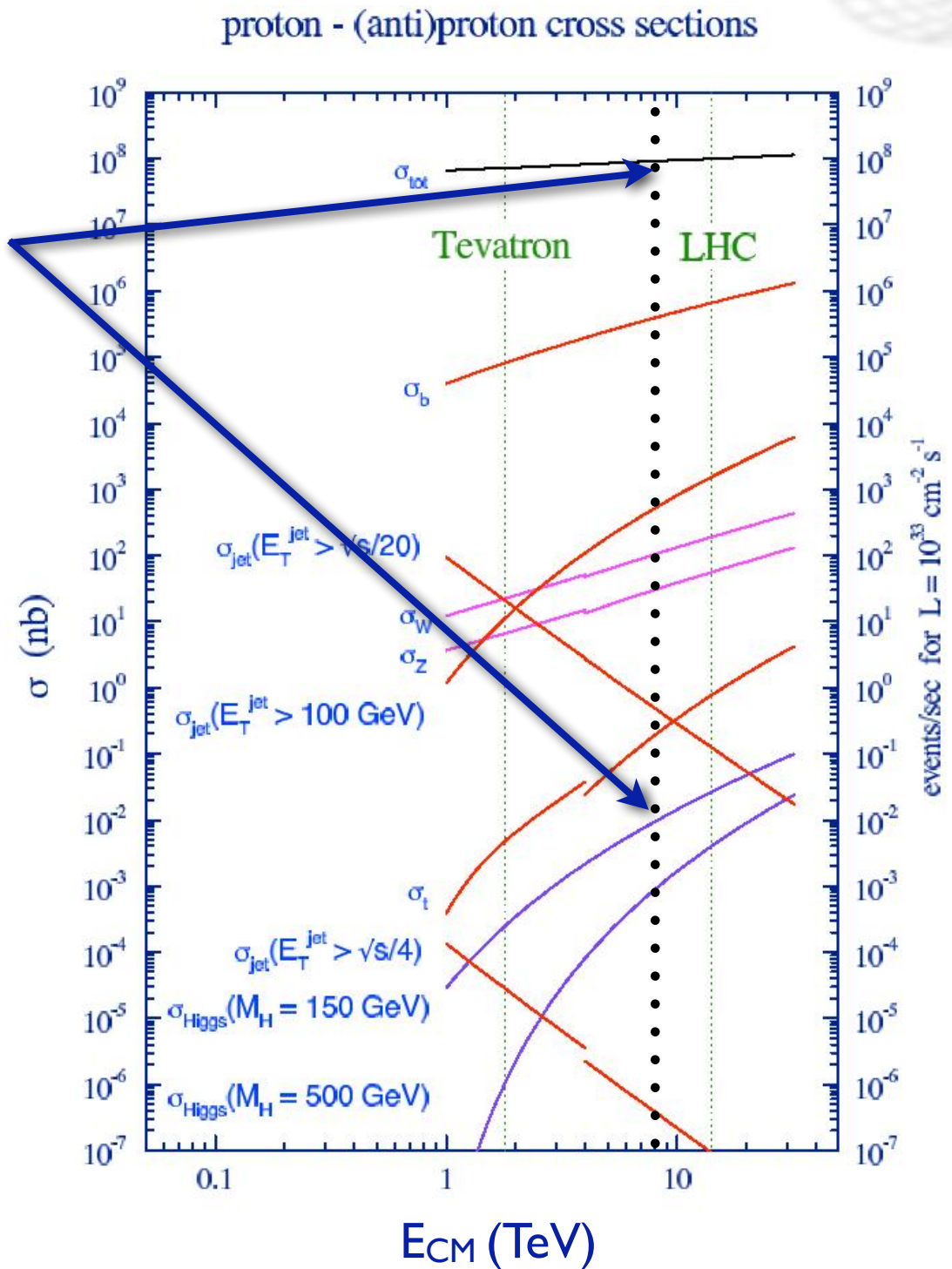


De uitdaging

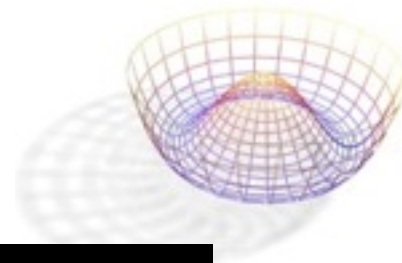


Interacties bij de LHC worden gedomineerd door de sterke interactie

- waarschijnlijkheid om Higgsbosonen te maken is $\sim 10^{10}$ keer kleiner
 - ▮ onderdrukken van achtergronden is de kunst



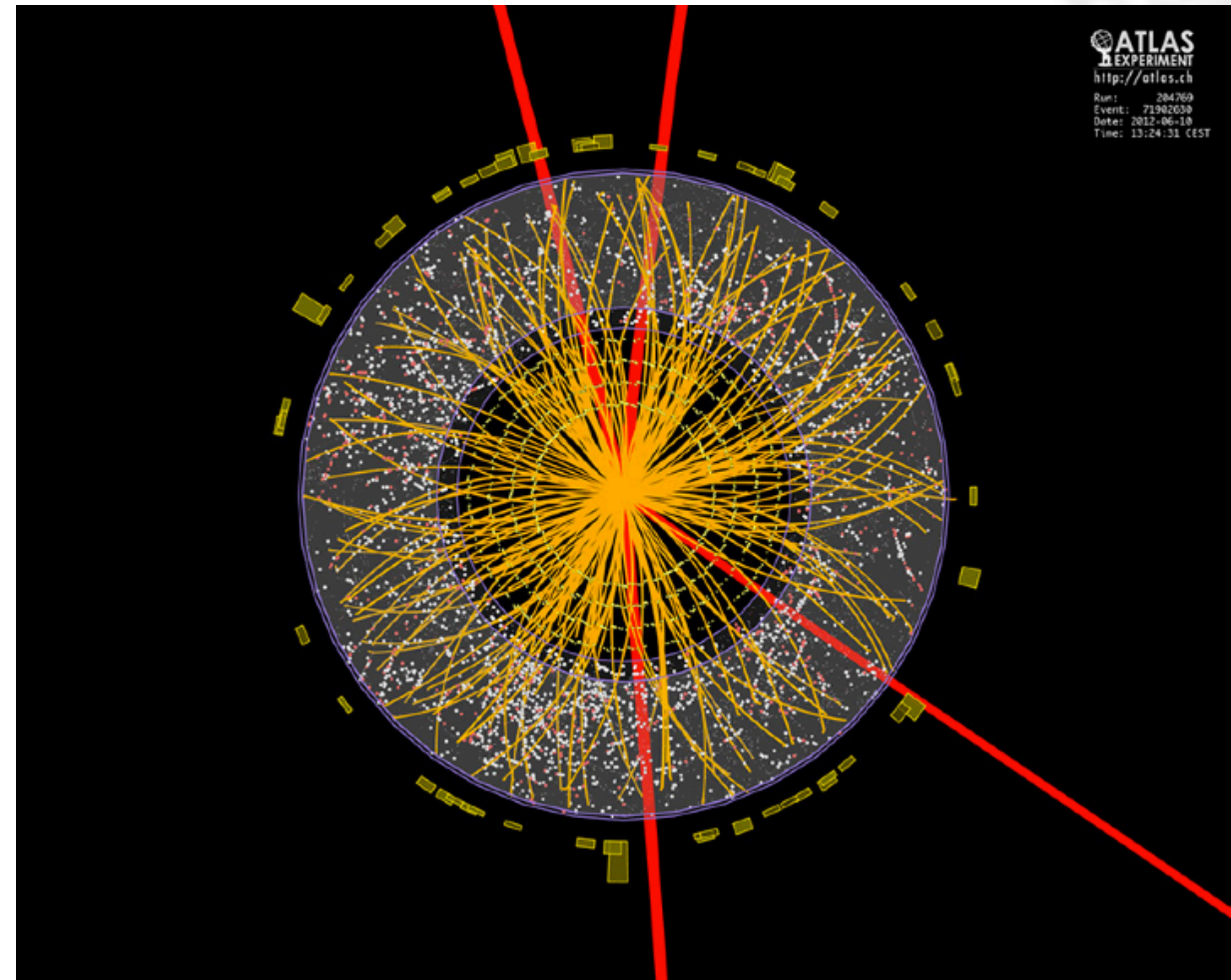
Reconstructie



De hele interactie moet zo goed mogelijk gereconstrueerd worden

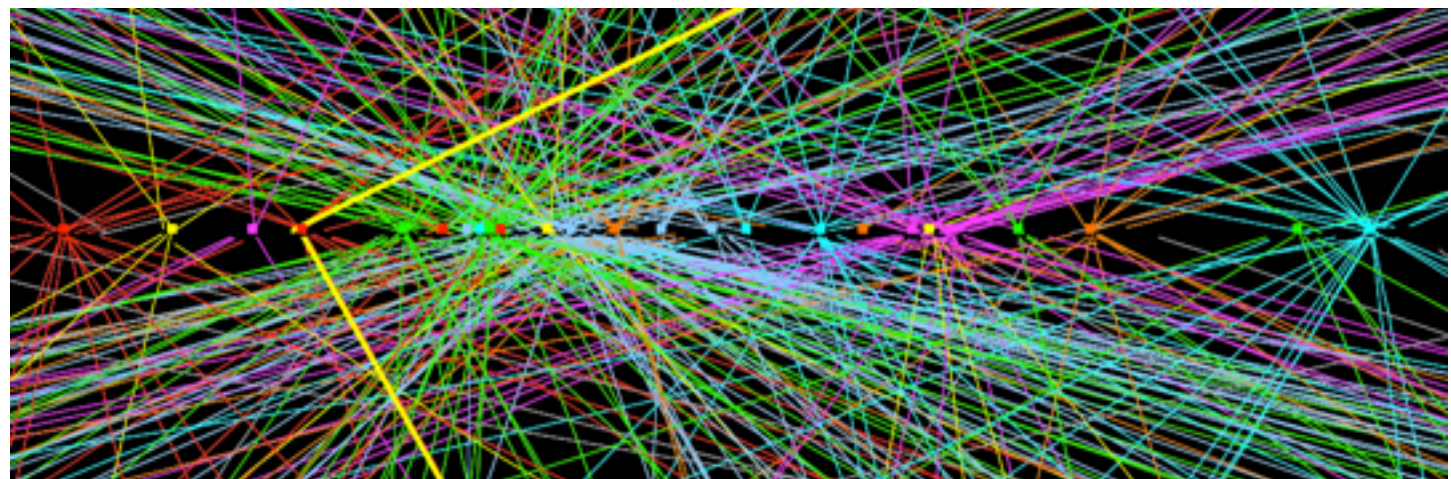
- patroonherkenning (met name voor reconstructie van trajecten van geladen deeltjes)
- selectie van de “interessante” interactie: tot 40 interacties per kruising van protonbundels

Iteratief proces, ~ 5000 PCs

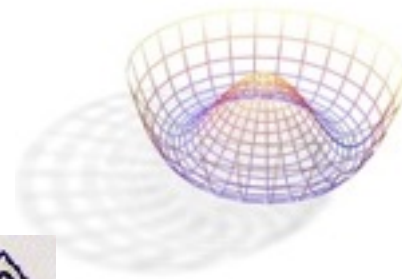


gesimuleerde $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ interactie

$Z \rightarrow \mu\mu$ kandidaat + 24 andere (oninteressante) interacties

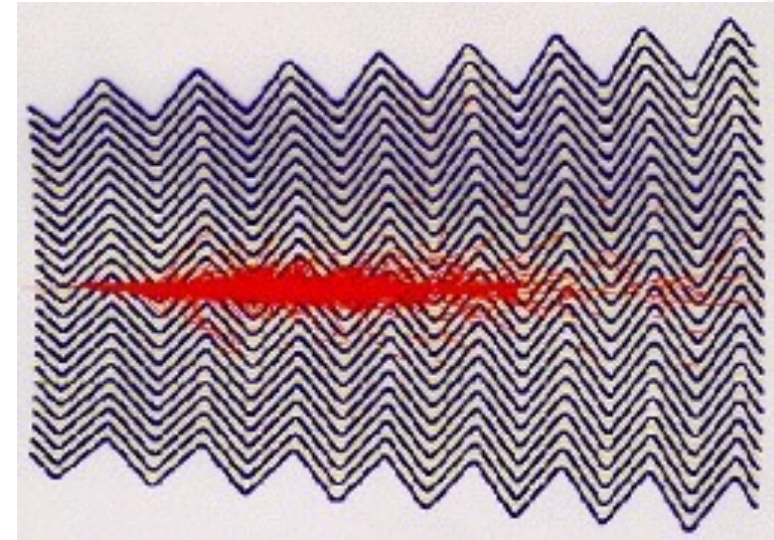


Simulatie en analyse



Gesimuleerde data:

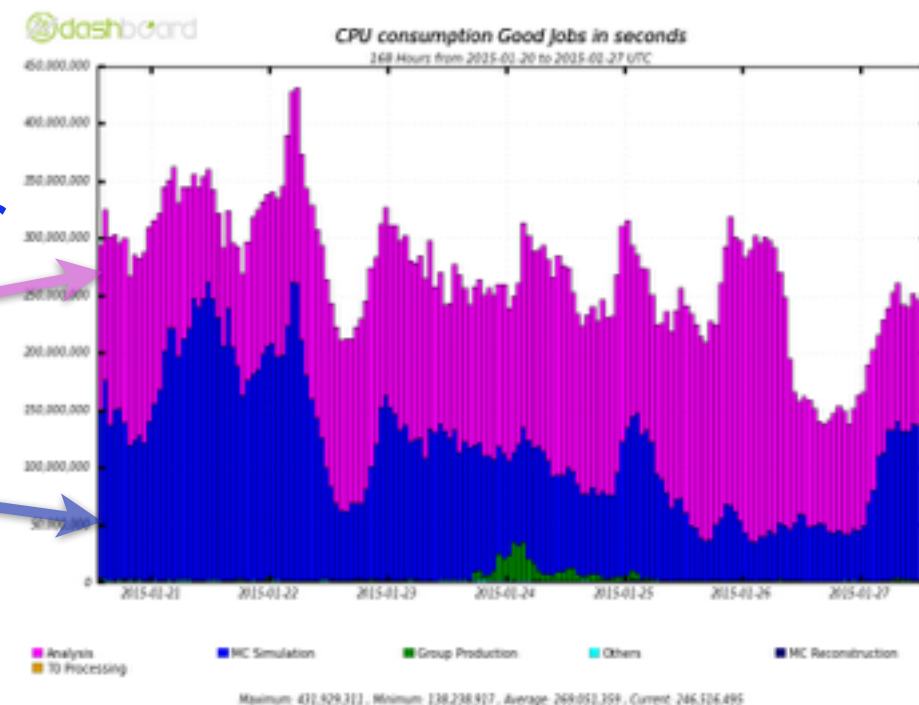
- simulatie van zowel de proton-proton interactie zelf als van de respons van de detector
- **essentieel voor het verkrijgen van concrete voorspellingen voor signaal / achtergrond in analyses**
- probleem: ~ 100 s / interactie, en aantallen interacties die vergelijkbaar zijn met de echte data (en voor sommige processen ordes van grootte meer!)



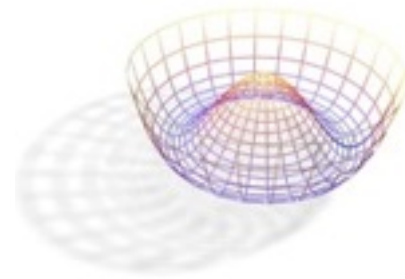
“shower” van een elektron in de ATLAS calorimeter

Grid: veel meer rekenkracht ($\sim 10^5$ CPUs voor ATLAS) dan op het CERN beschikbaar

- simulatie, reconstructie
- ... en data-analyse! Datasets zijn tot \sim PBytes groot

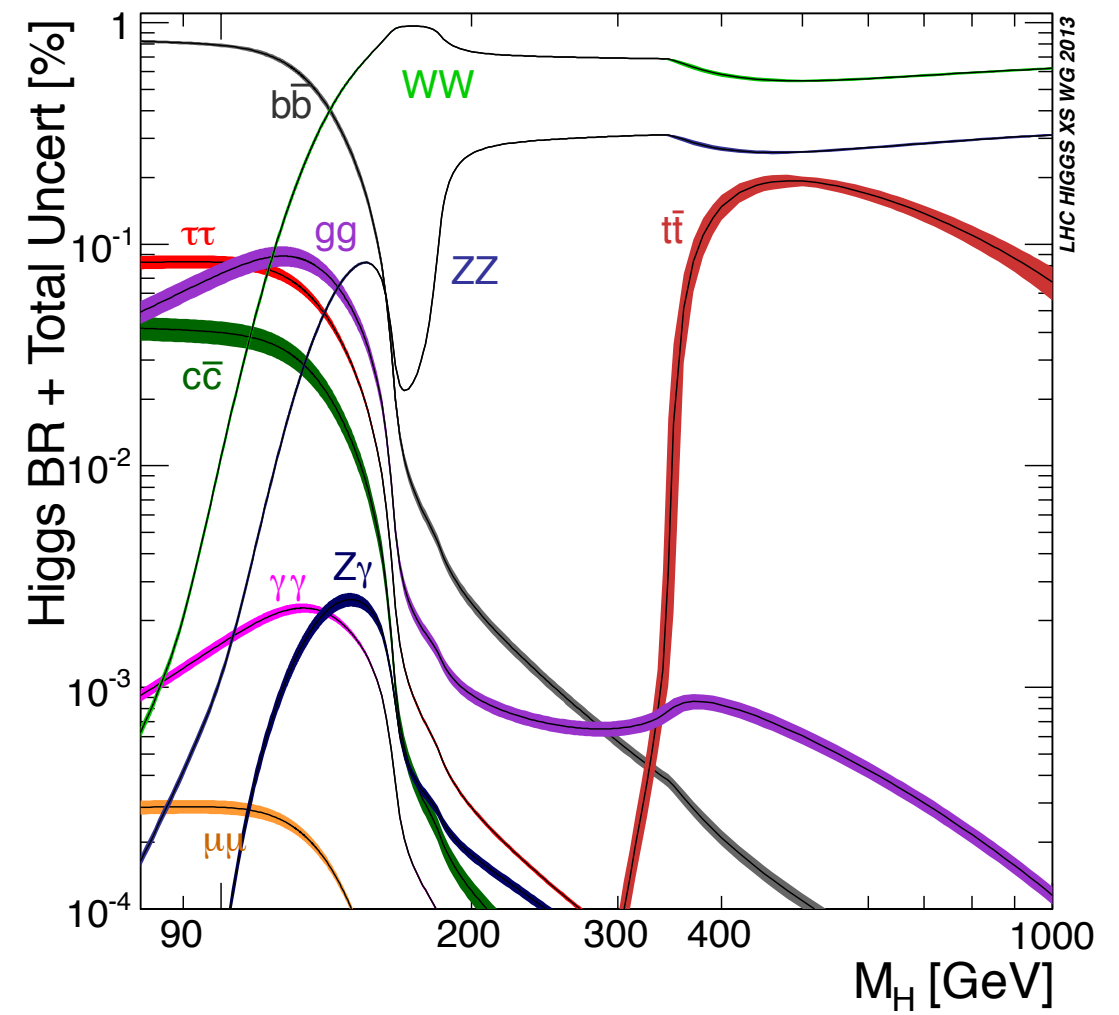
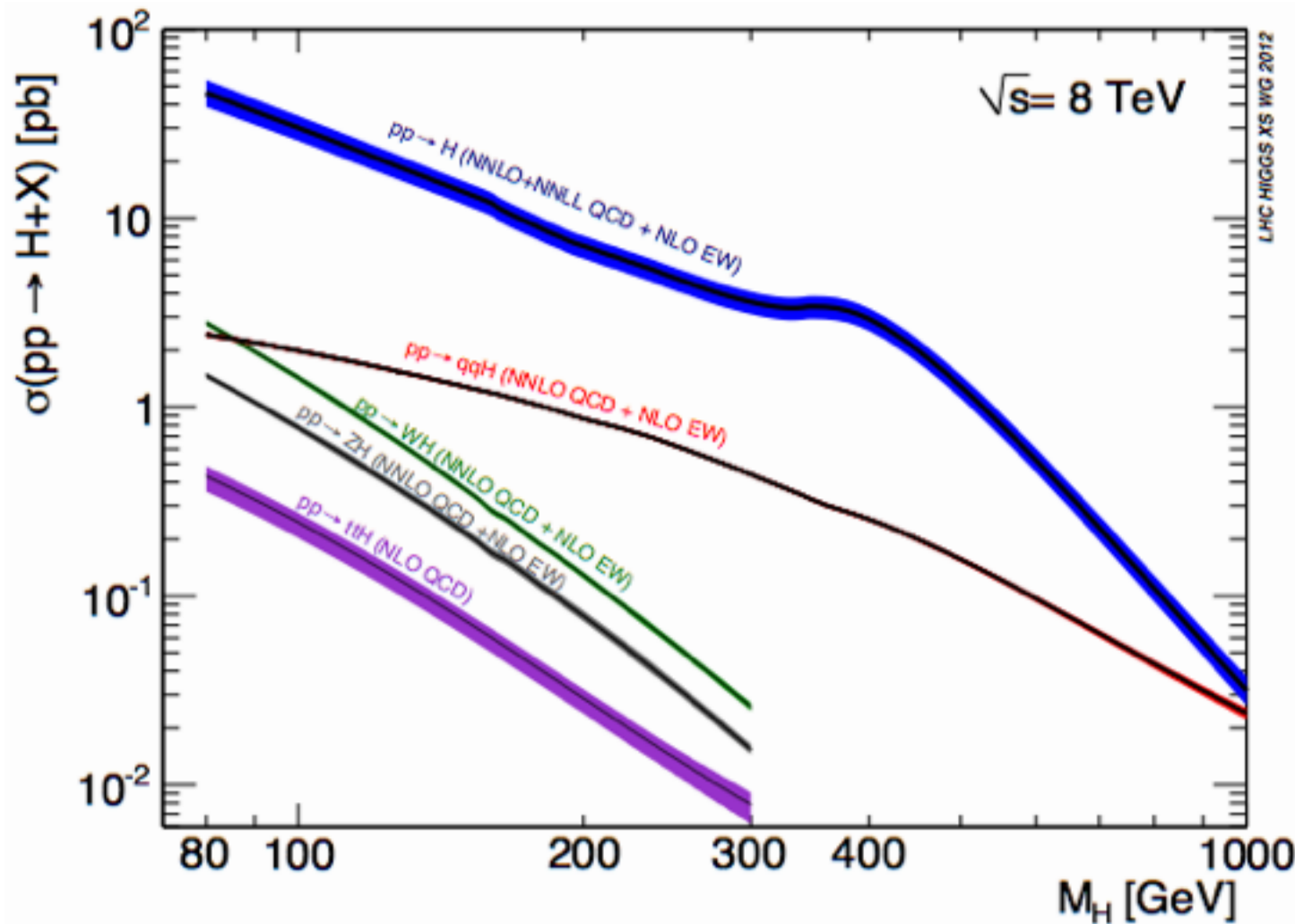


Higgs-voorspellingen

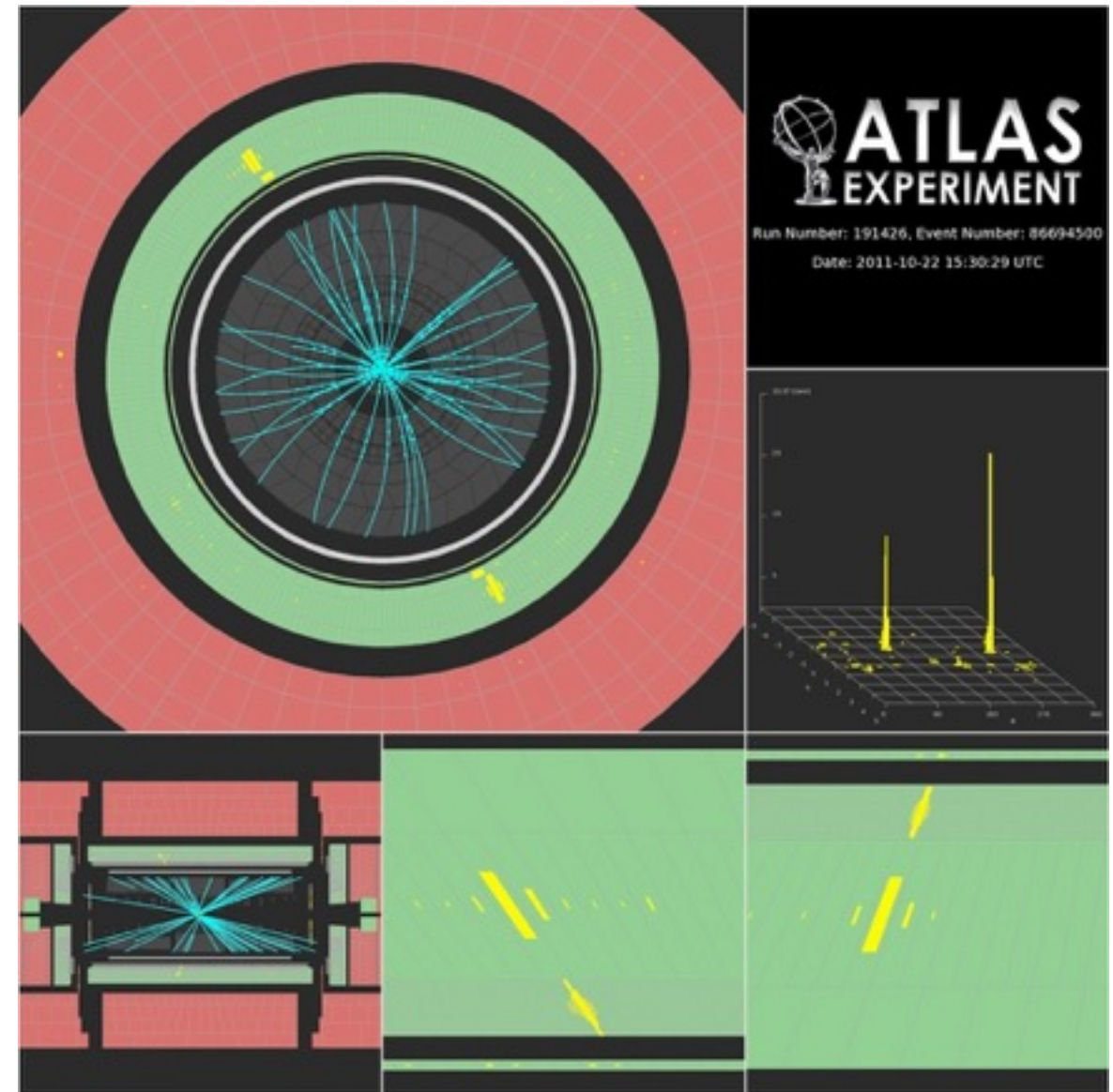
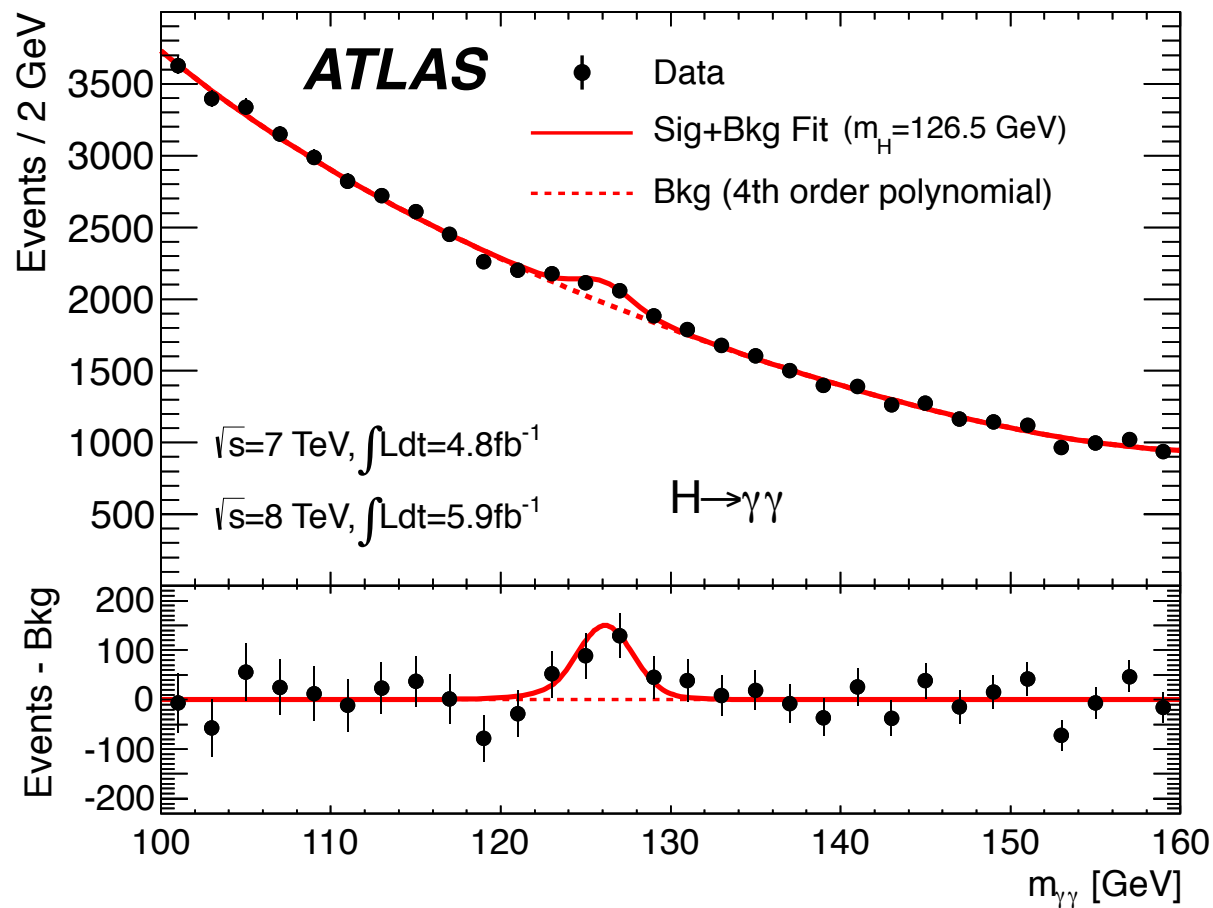
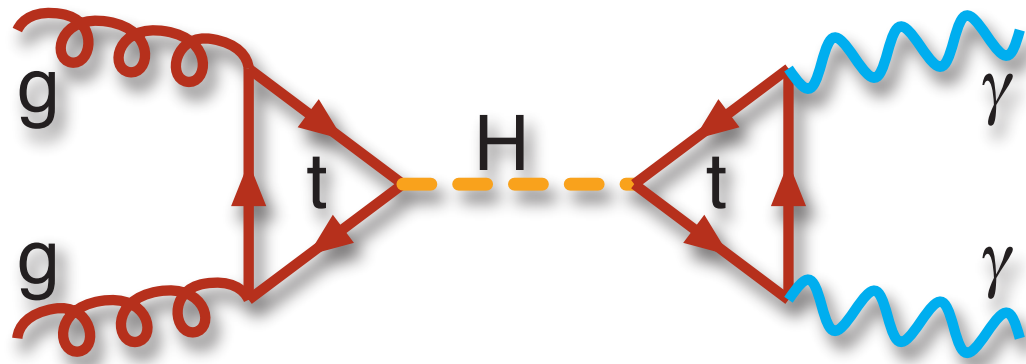
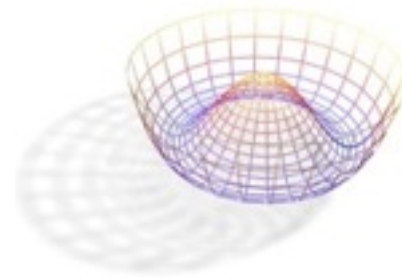


In het Standaardmodel van de deeltjesfysica:

- alleen de massa van het Higgsdeeltjes is onbekend
- voor gegeven massa zijn alle andere eigenschappen bekend!
- i.h.b.: het Higgsdeeltje koppelt het sterkst aan de zwaarste deeltjes

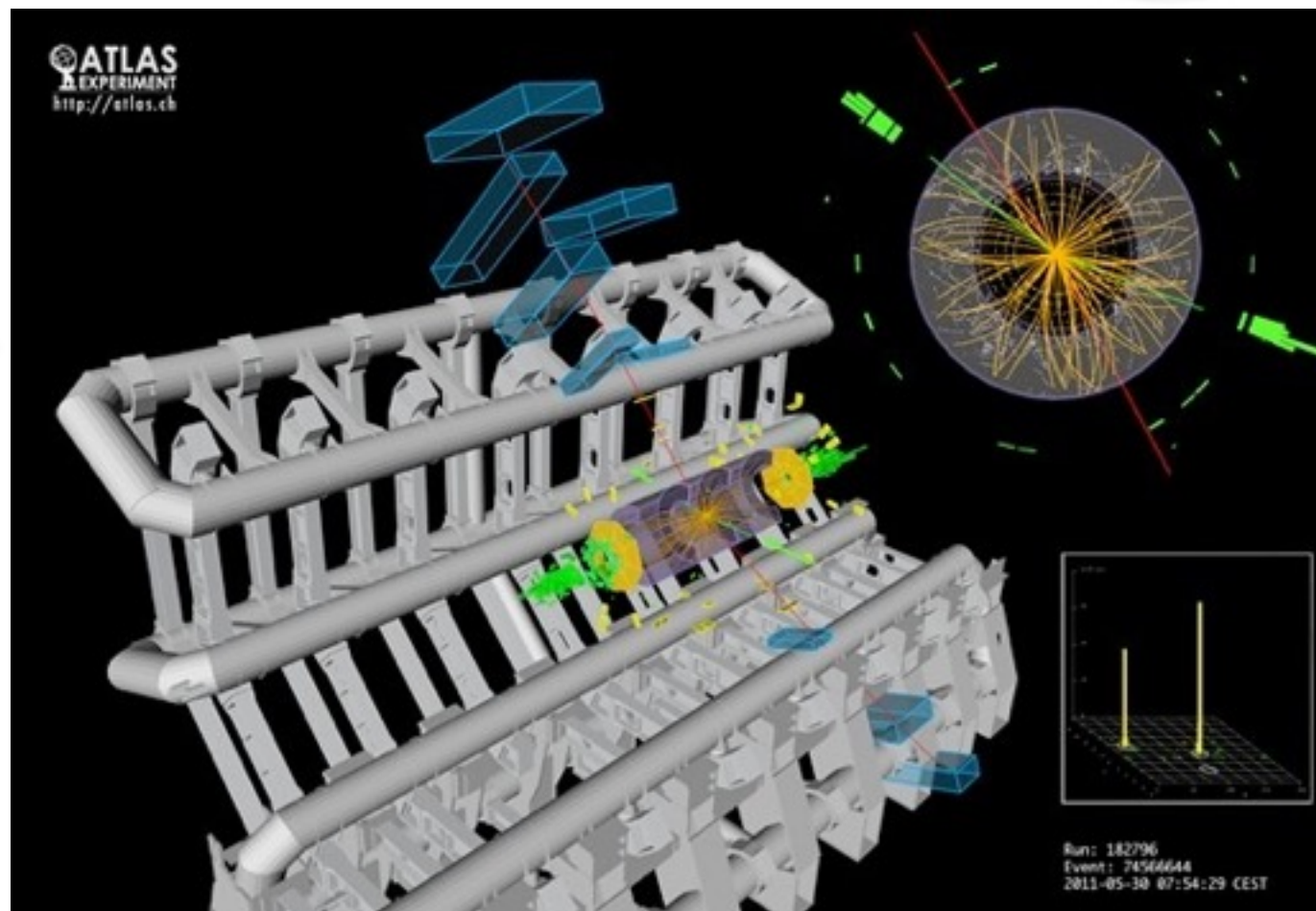
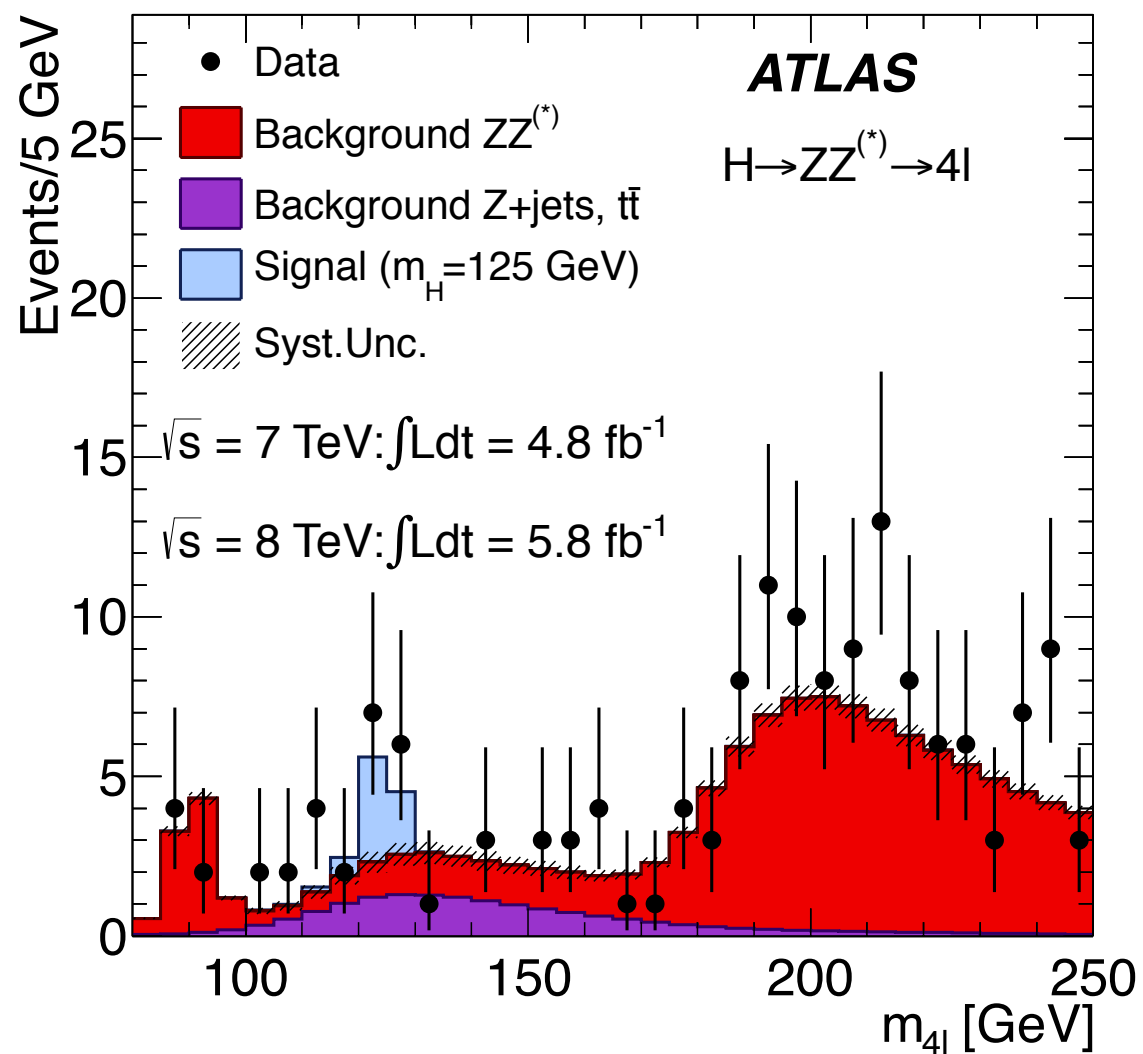
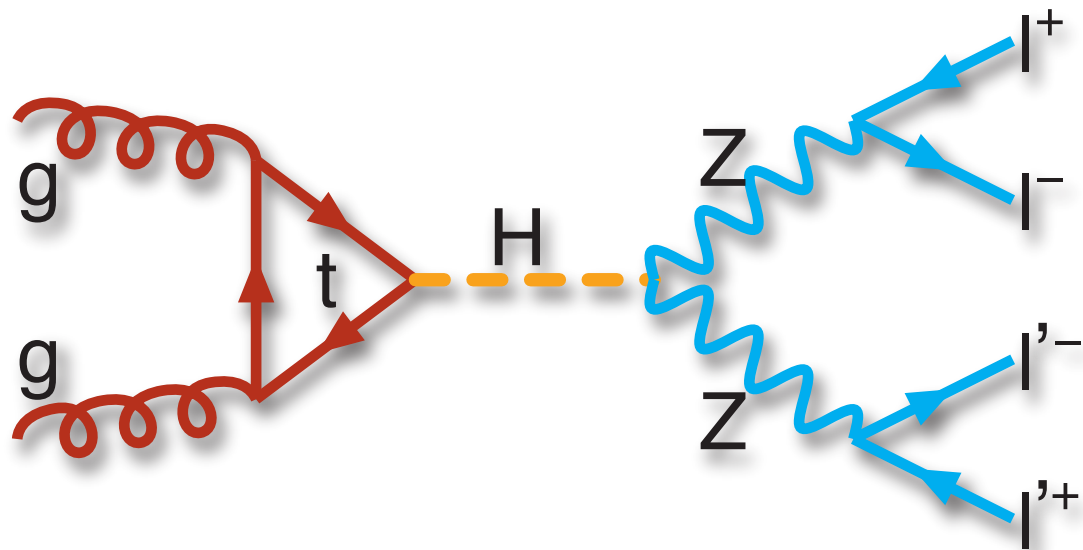
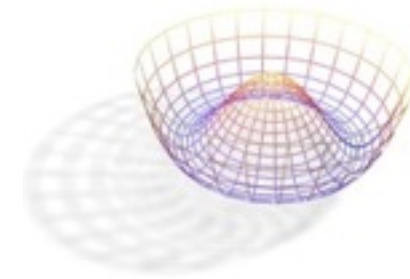


Higgsverval naar twee fotonen



Goede energieresolutie is cruciaal!

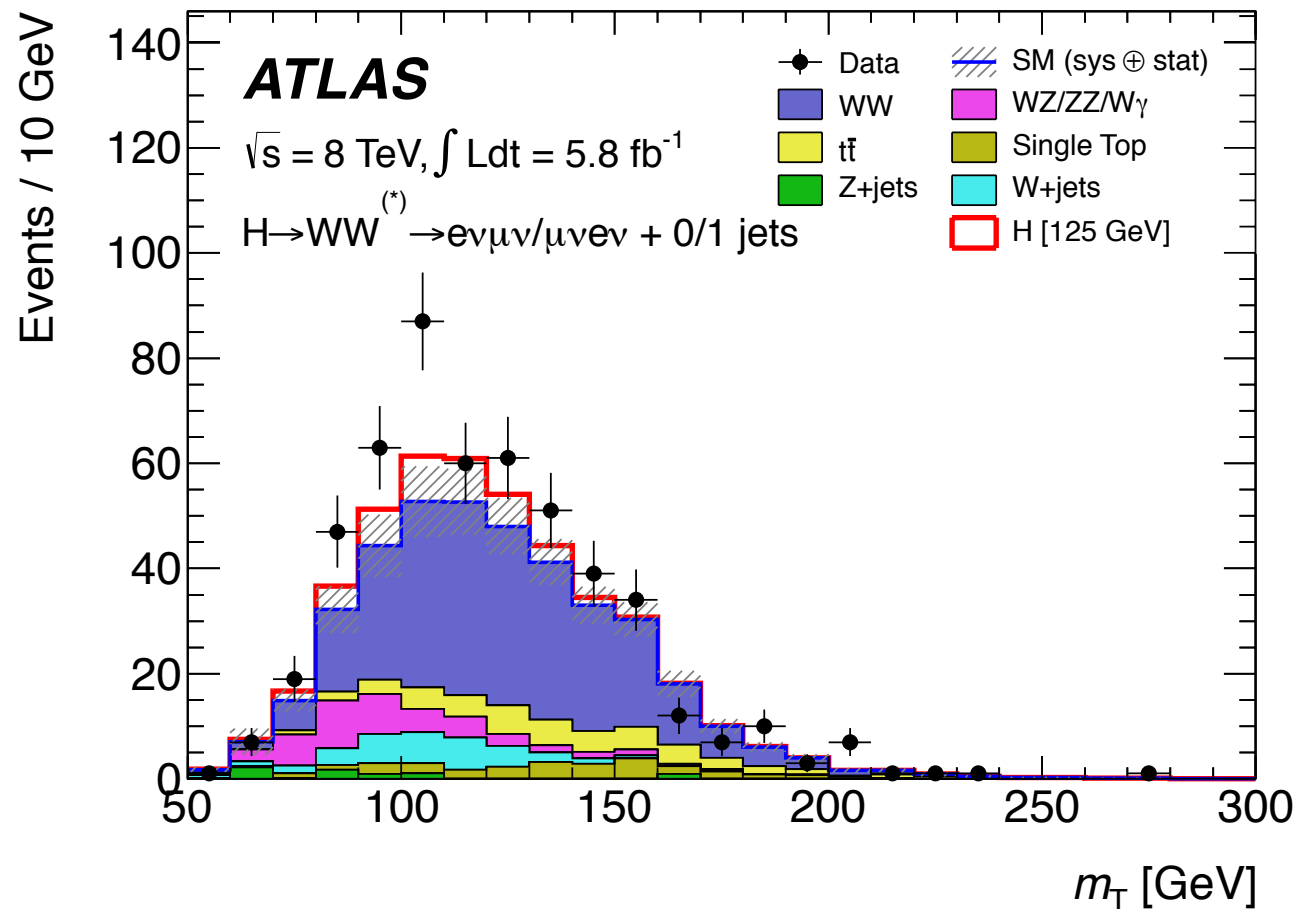
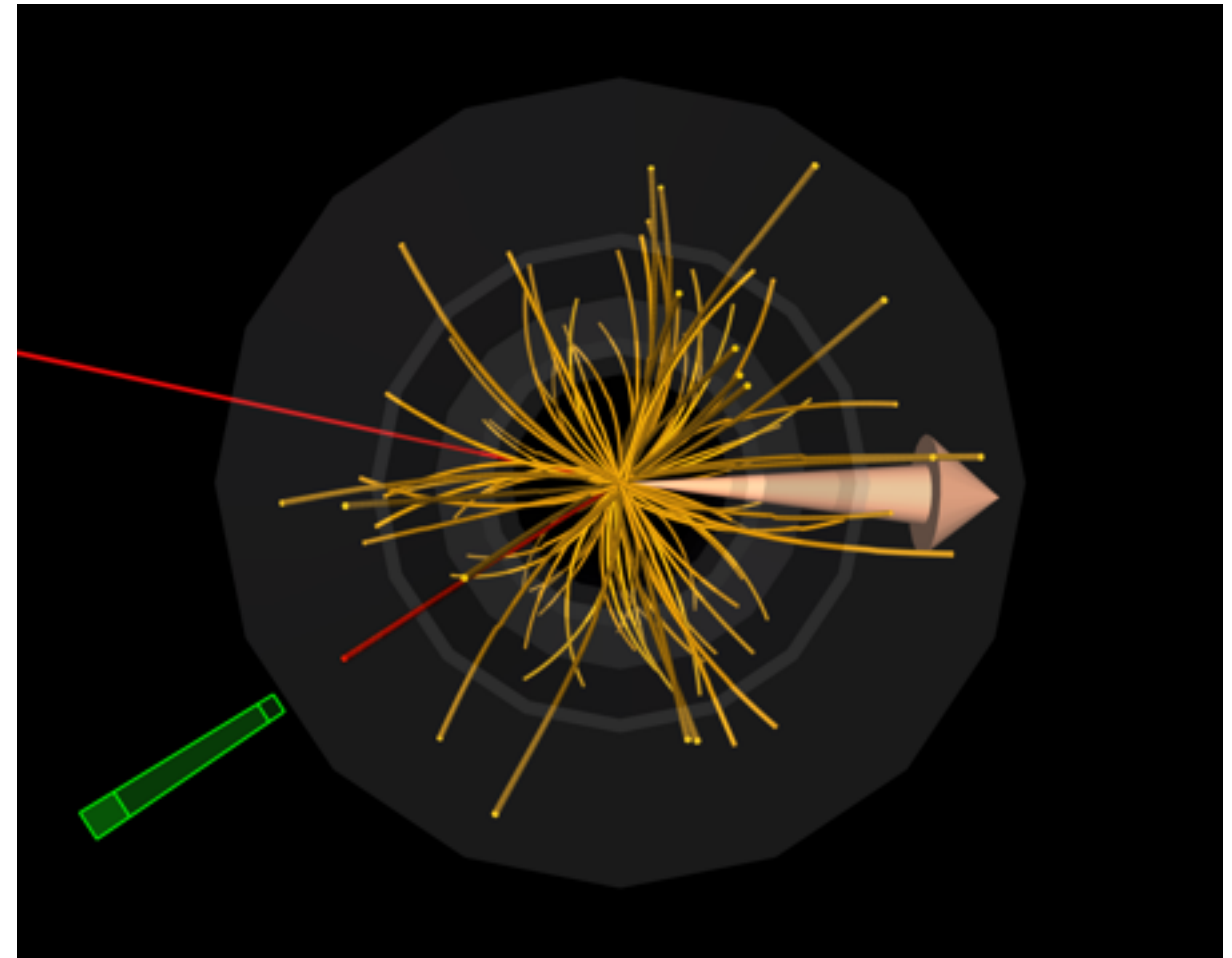
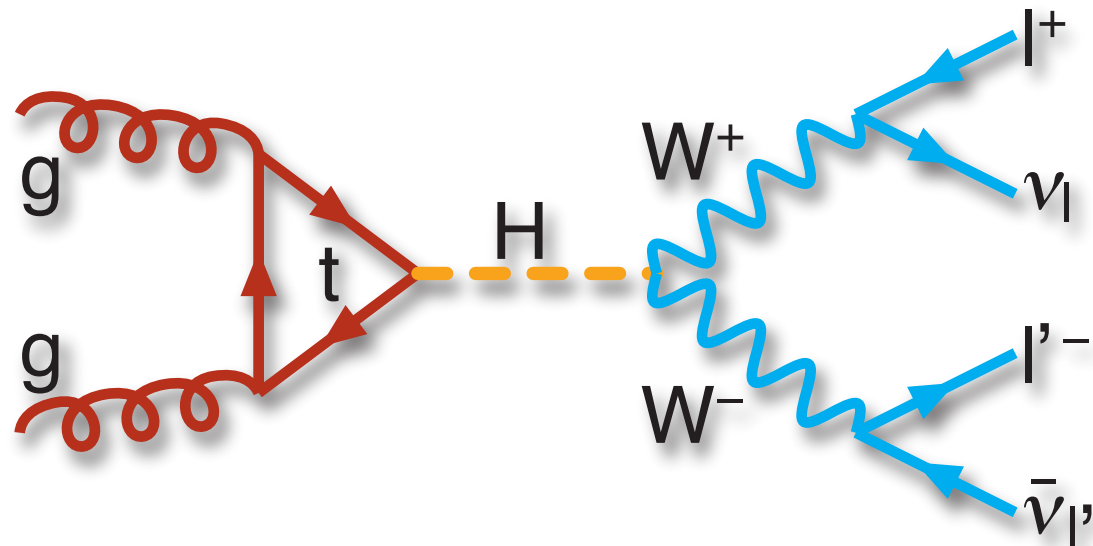
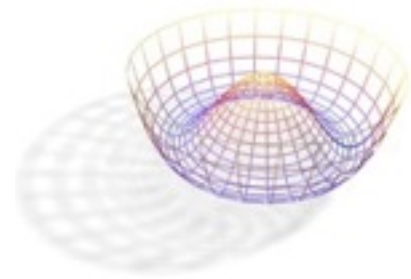
Higgsverval naar twee Z-deeltjes



Zeer zeldzaam \Rightarrow iedere interactie telt!

• maak de selectie zo efficiënt mogelijk

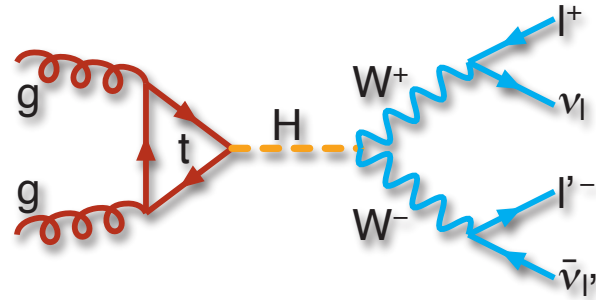
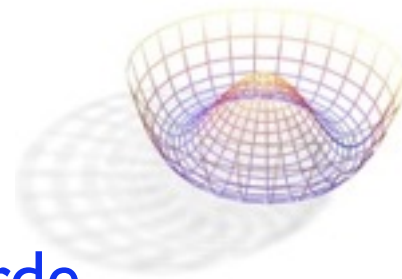
Higgsverval naar twee W-deeltjes



Veel soorten achtergrond!

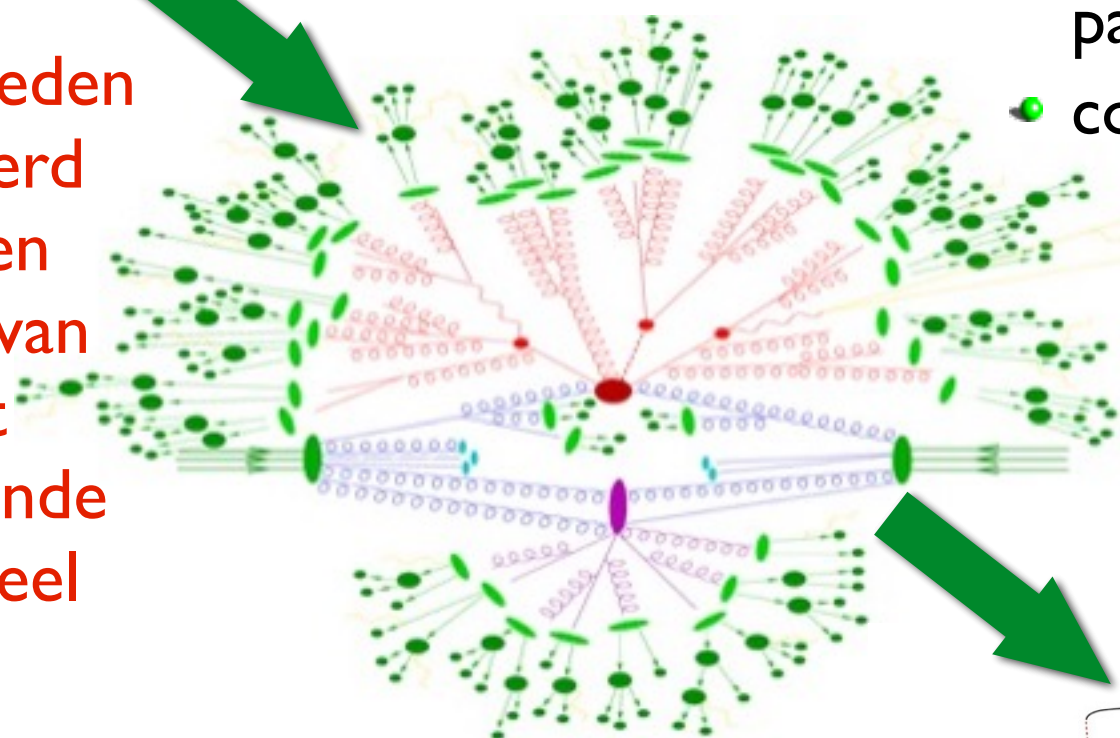
- gesimuleerd maar heeft ook controle met data nodig

Systematische onzekerheden



Begrip van het “inbedden” van de harde interactie in de proton-proton botsing als geheel (extra “jets”; “zachte” effecten)

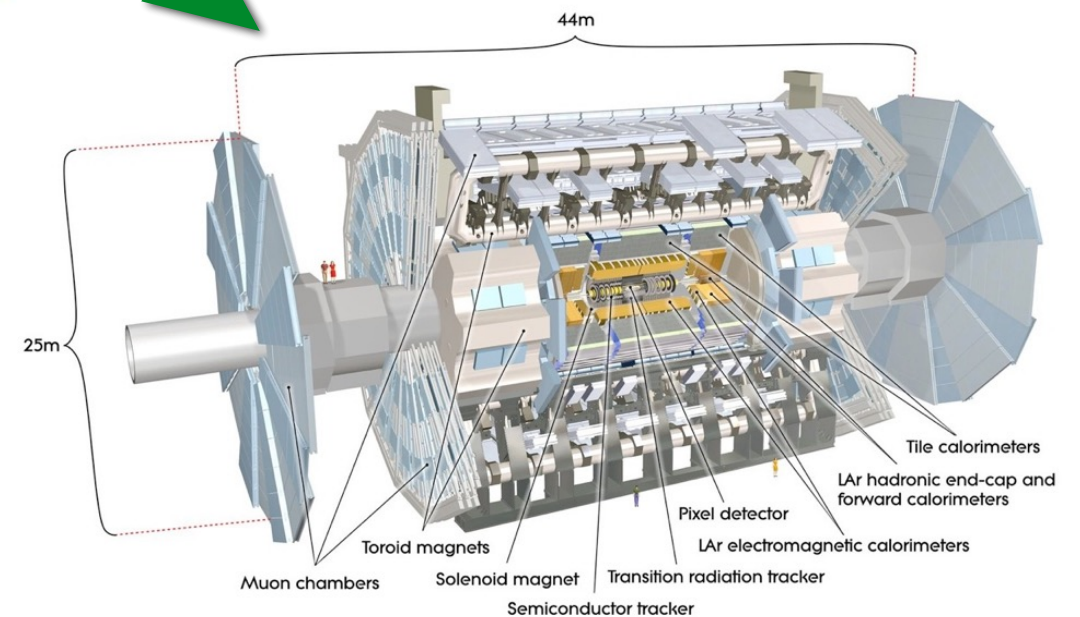
Vele onzekerheden die gemodelleerd moeten worden vóór het zien van het signaal: het meest tijdrovende gedeelte van veel data-analyses!



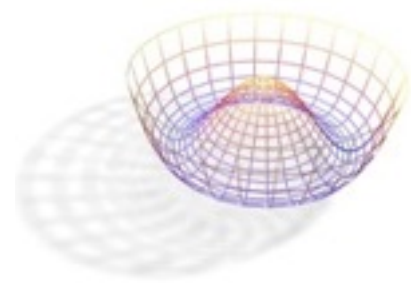
- verschillende programma's / parameters
- controle-gebieden in de data (lijken veel op maar met net andere eigenschappen dan het gezochte signaal)

Begrip van de detector-respons (bijvoorbeeld ν !), extra proton-proton interacties en effecten van de data-reconstructie

- metingen van respons voor diverse “objecten” in de data



Statistische analyse (I)



Voorspelde achtergrond significant \implies statistische analyse nodig.

Algemene aanname: geen interferentie tussen signaal en achtergrond

$$f(\vec{x}) = \mu f_s(\vec{x}) + f_b(\vec{x})$$

Likelihood gebaseerd op gebinde (H \rightarrow WW) dan wel ongebinde data (H \rightarrow ZZ, $\gamma\gamma$)

- beschrijving m.b.v. gebinde data (Poisson statistiek), nuisance parameters

$$L = \prod_i P(n_i | \mu s_i + b_i) \implies L = \prod_i P(n_i | \mu s_i(\vec{\theta}) + b_i(\vec{\theta})) \prod_j G(\theta_j)$$

Statistische analyse gebaseerd op profile likelihood ratio

$$\lambda(\mu) = L\left(\mu, \hat{\vec{\theta}}(\mu)\right) / L\left(\hat{\mu}, \hat{\vec{\theta}}\right)$$

\uparrow
constraints

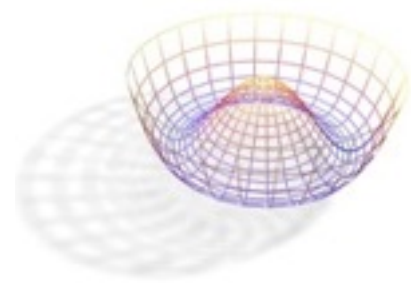
- noemer: globale maximum L; teller: nuisance parameters voor gegeven μ

Test statistic voor ontdekking (uitsluiten $\mu=0$):

$$q_0 \equiv \begin{cases} -2 \ln \lambda(0) & \hat{\mu} \geq 0 \\ 0 & \hat{\mu} < 0 \end{cases}$$

$\mu < 0$ onfysisch;
enkelzijdige test

Statistische analyse (2)



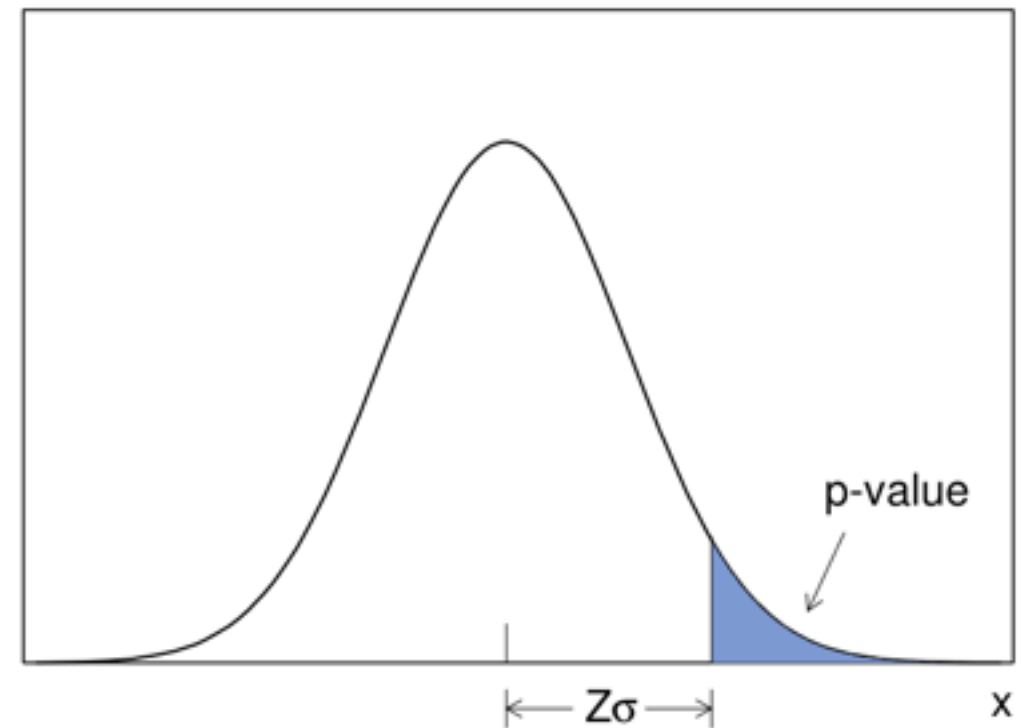
p-waarde voor gemeten q_0 :

$$p = \int_{q_{0,obs}}^{\infty} f(q_0|0) dq_0$$

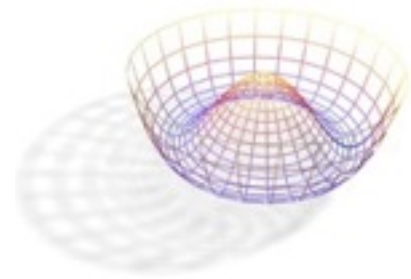
- $f(q_0|\mu')$: verdeling van q voor werkelijke waarde μ'

Probleem: hoe $f(q_0|0)$ te schatten?

- gebruikelijke frequentistische manier: “toy experiments”
- statistische fluctuaties t.o.v. verwachtingen voor $\mu=0$, $\hat{\theta}(\mu=0)$
- conventie in deeltjesfysica: ontdekking van een nieuw deeltje / effect kan pas geclaimd worden bij een significantie van $5\sigma \implies$ p-waarde $3 \cdot 10^{-7}$
- genereer $\sim 10^7$ toy experiments (met duizenden interacties / experiment)?



Statistische analyse (3)



Resultaat van Wald: asymptotisch gedraagt $\lambda(\mu)$ zich als

$$-2 \ln \lambda(\mu) = (\mu - \hat{\mu})^2 / \sigma^2$$

- $\hat{\mu}$ normaal verdeeld rond werkelijke waarde μ' , met breedte σ

Laatste probleem: schatting σ . Truc: “Asimov dataset” (Isaac Asimov, “Franchise”)

- genereer kunstmatige dataset met

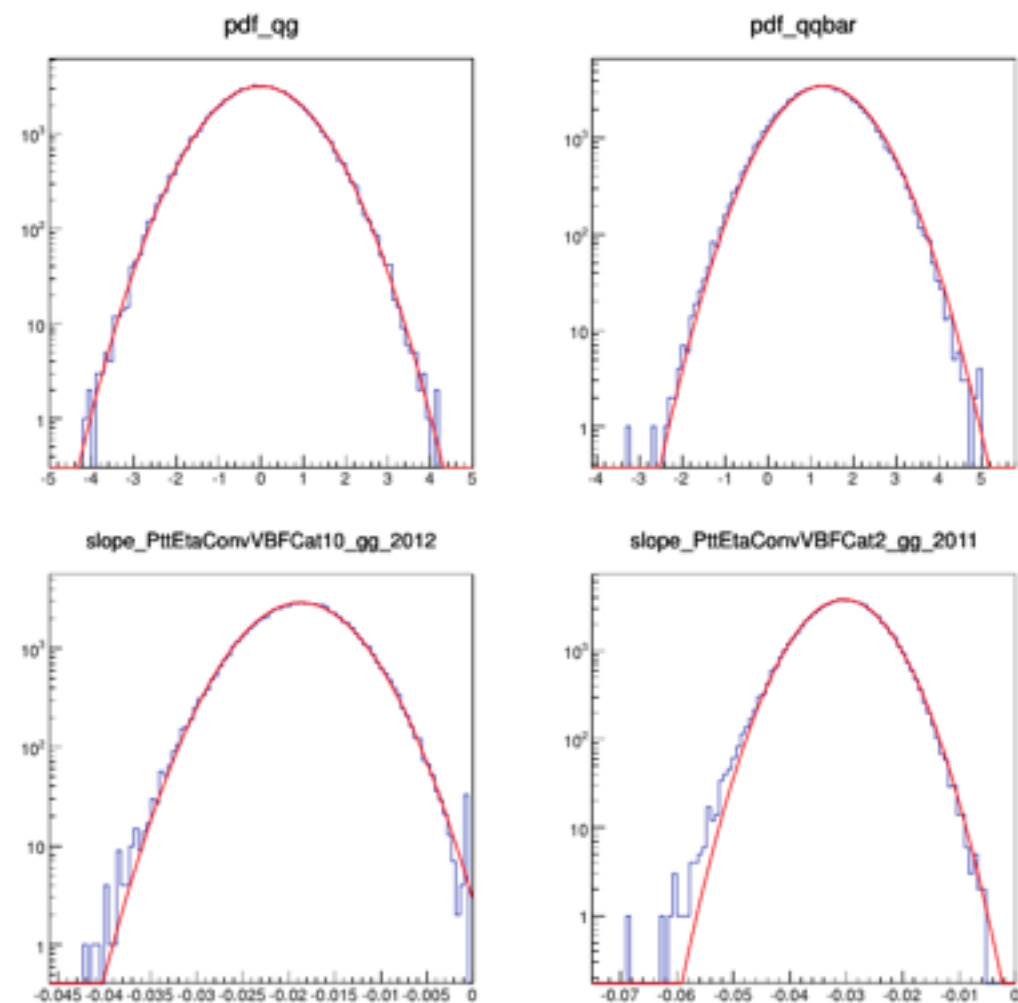
$$n_{i,A} = \mu' s_i(\hat{\theta}(\mu')) + b_i(\hat{\theta}(\mu'))$$

- zelfde asymptotische gedrag, dus (voor hypothese $\mu=0$, μ' uit fit aan data)

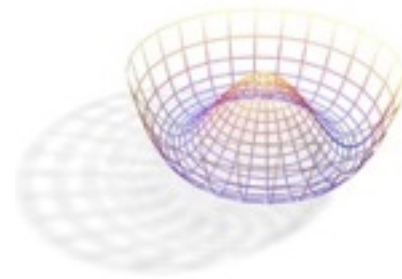
$$-2 \ln \lambda_A(0) = \mu'^2 / \sigma^2$$

- uitgebreide verificatie

- dat de asymptotische benadering werkt
- dat de nuisance parameters zich “netjes” gedragen

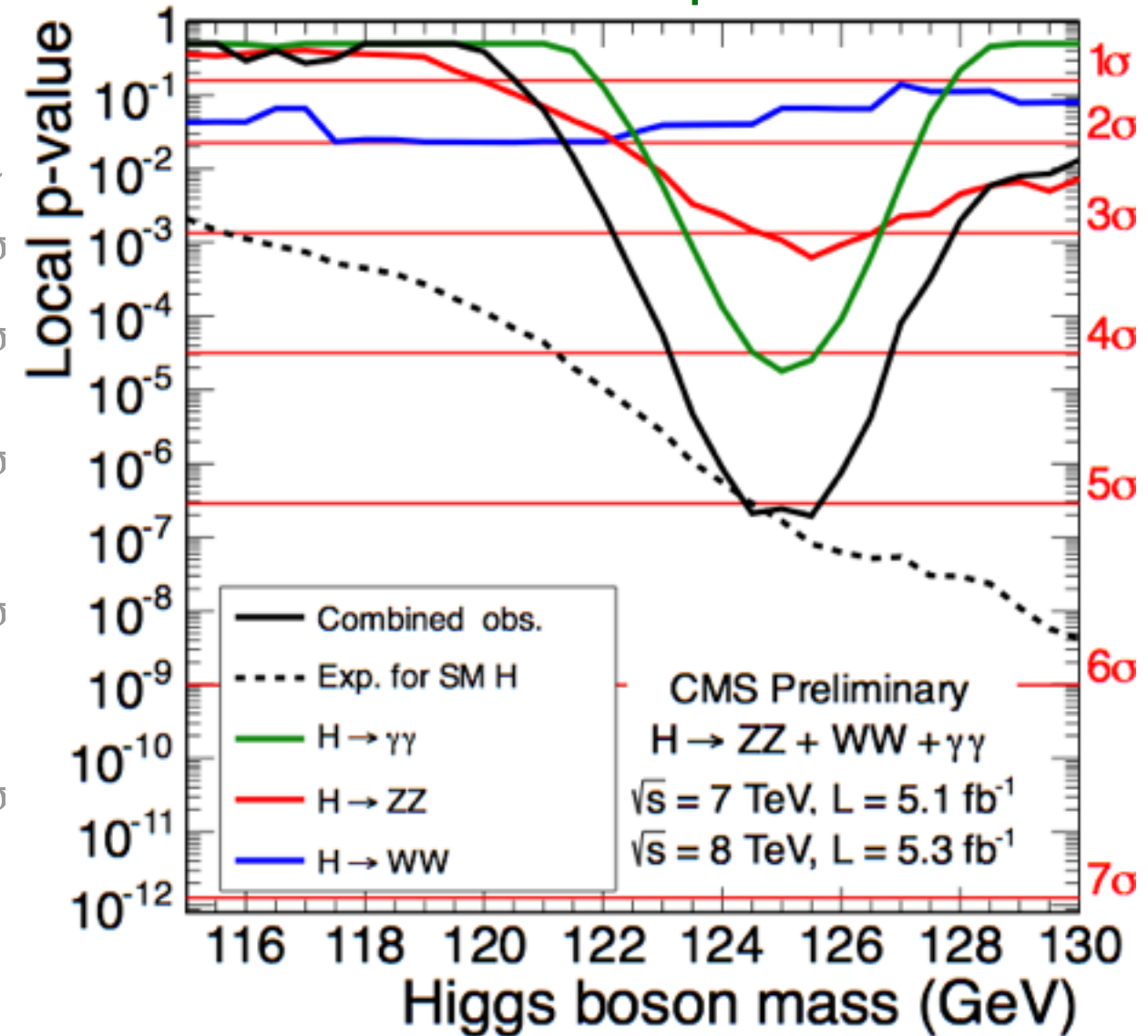
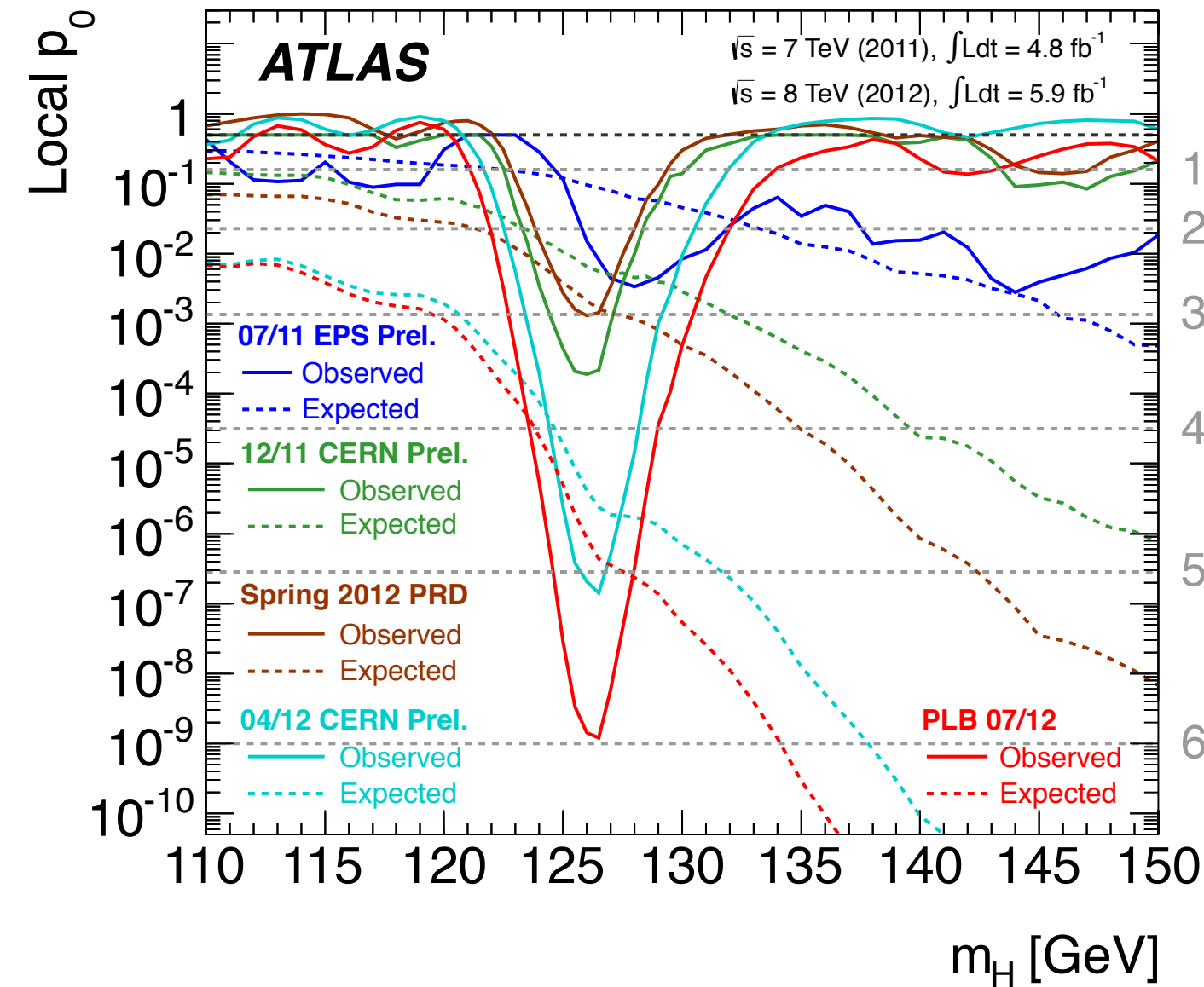


De ontdekking!

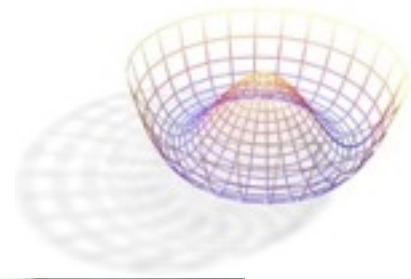


Massa a priori onbekend, dus moet in principe voor alle mogelijke massa's bekeken worden

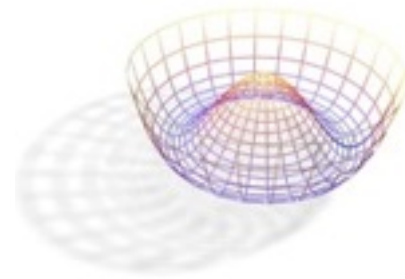
De competitie



4 juli 2012

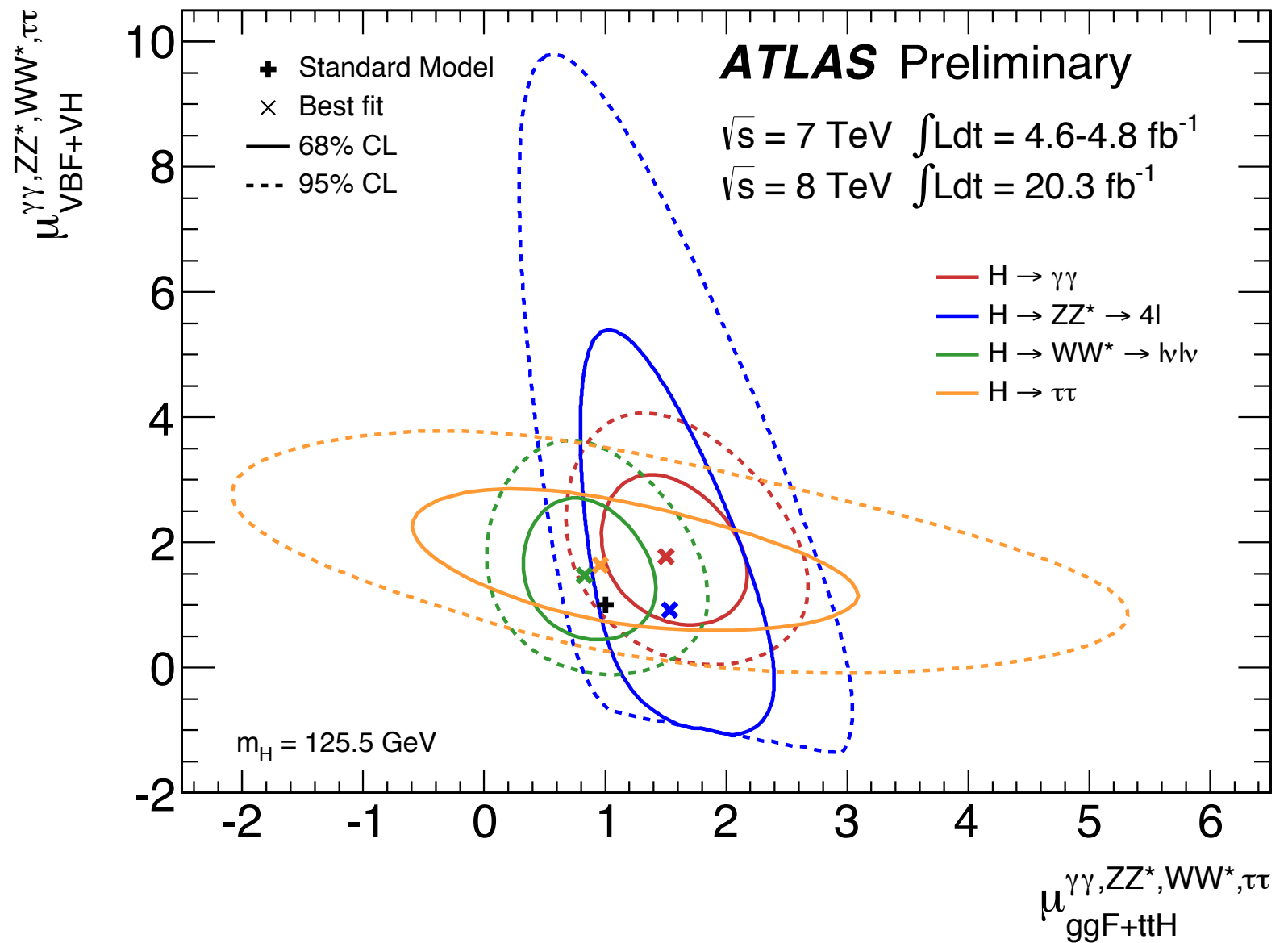
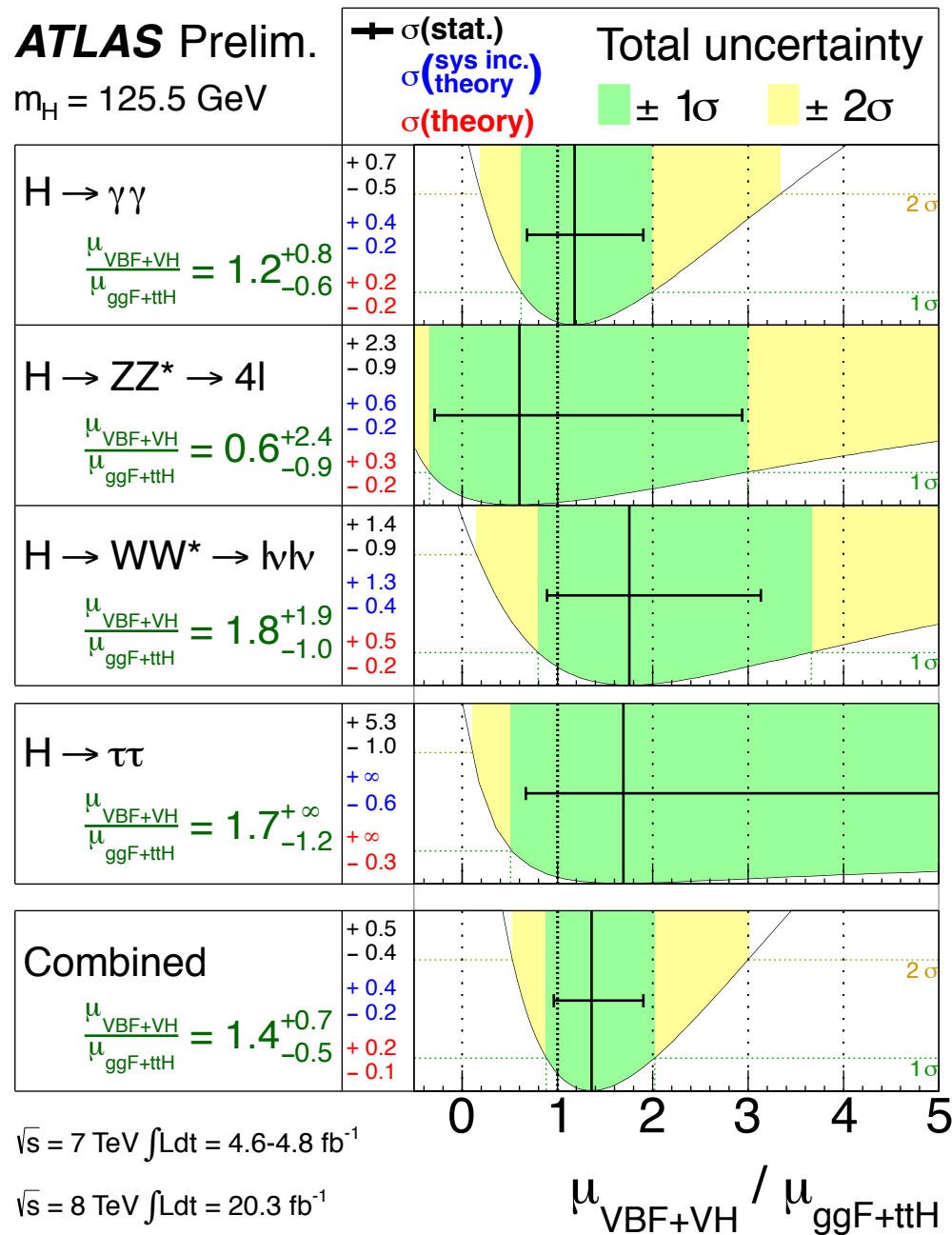


Huidige status (I)

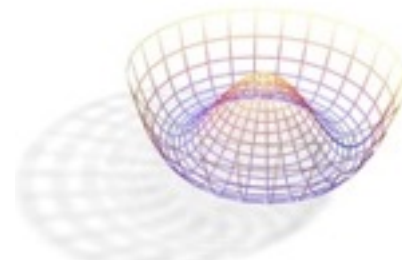


Ten tijde van de ontdekking werden alleen verschillende verschillende vervalskanalen afzonderlijk gezien

• hoe zit het met de productiemechanismes?



Huidige status (2)



De koppelingssterkte van het (lichtste) Higgsdeeltje in supersymmetrische modellen is in het algemeen anders dan in het Standaardmodel

- nog niet voldoende data om al deze koppelingssterktes afzonderlijk te meten, maar met redelijke aannames zijn al vergelijkingen te maken
- precisie van $\sim 10\%$ is nodig om echt interessant te worden!

Ook: het Higgsdeeltje heeft andere meetbare quantummechanische eigenschappen

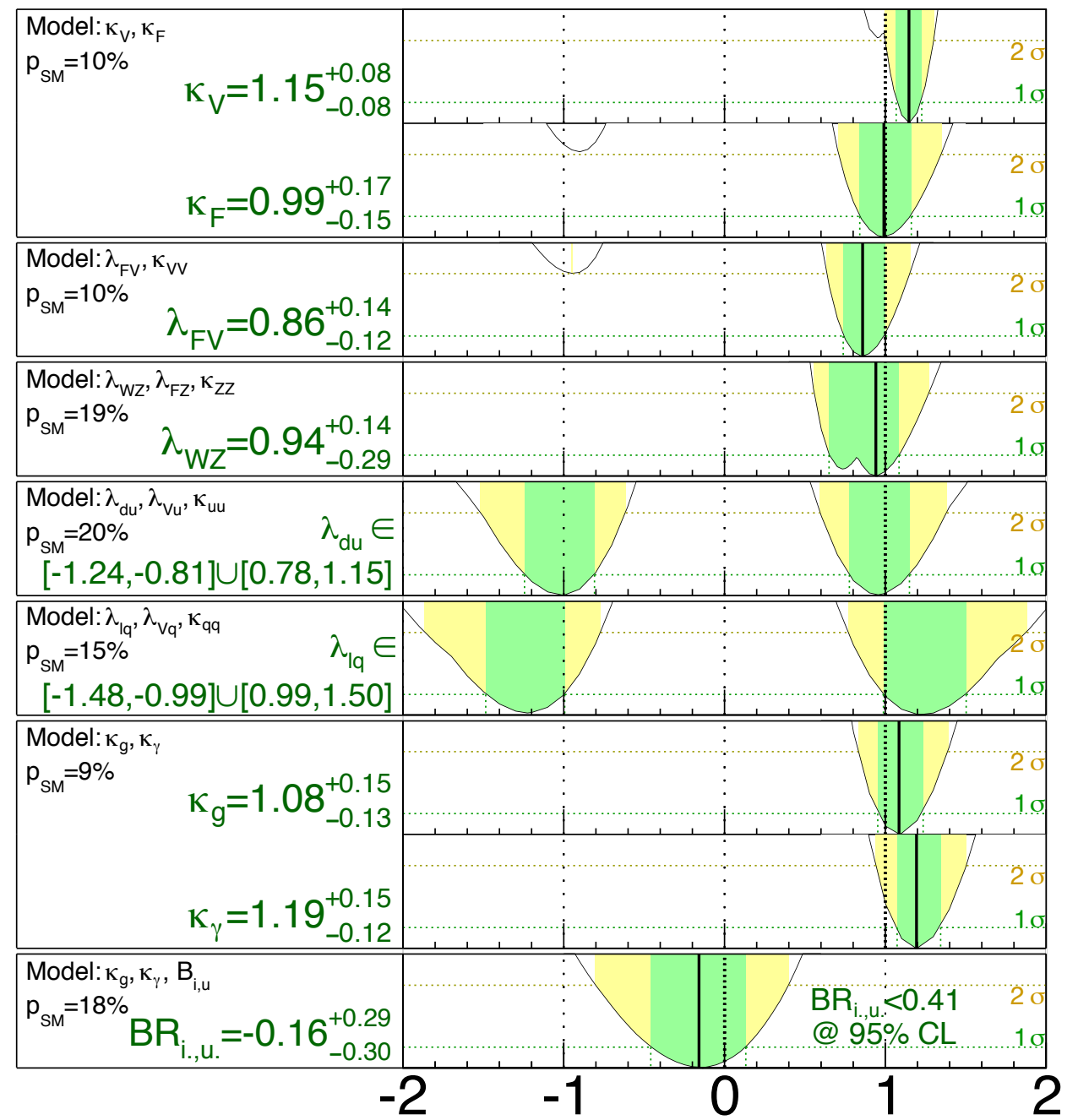
- spin en pariteit
- alle alternatieven dan verwacht zijn zo goed als uitgesloten

ATLAS Preliminary

$m_H = 125.5 \text{ GeV}$

Total uncertainty

■ $\pm 1\sigma$ ■ $\pm 2\sigma$

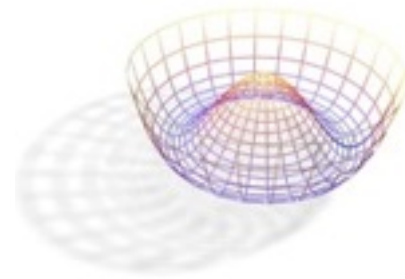


$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV } \int L dt = 4.6-4.8 \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV } \int L dt = 20.3 \text{ fb}^{-1}$

Parameter value

Huidige status (3)

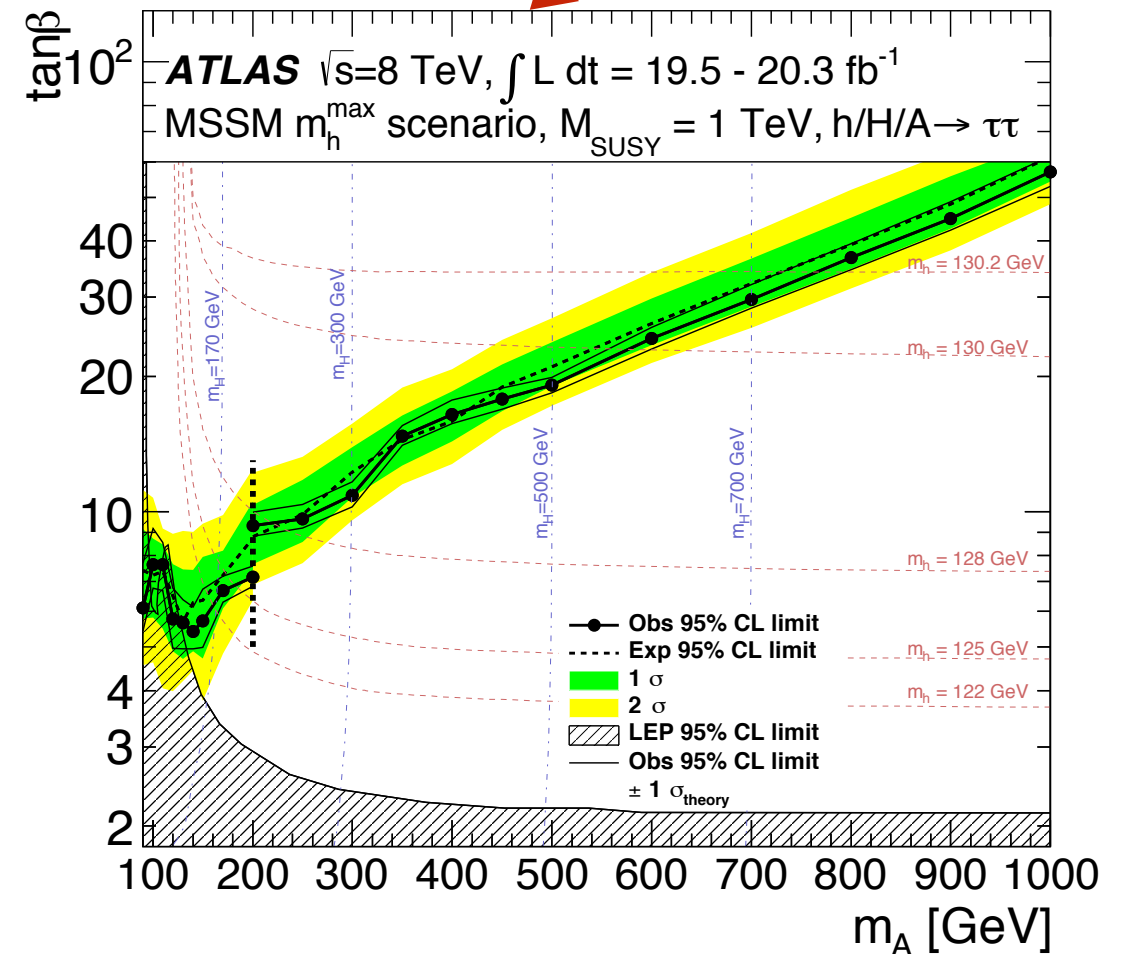
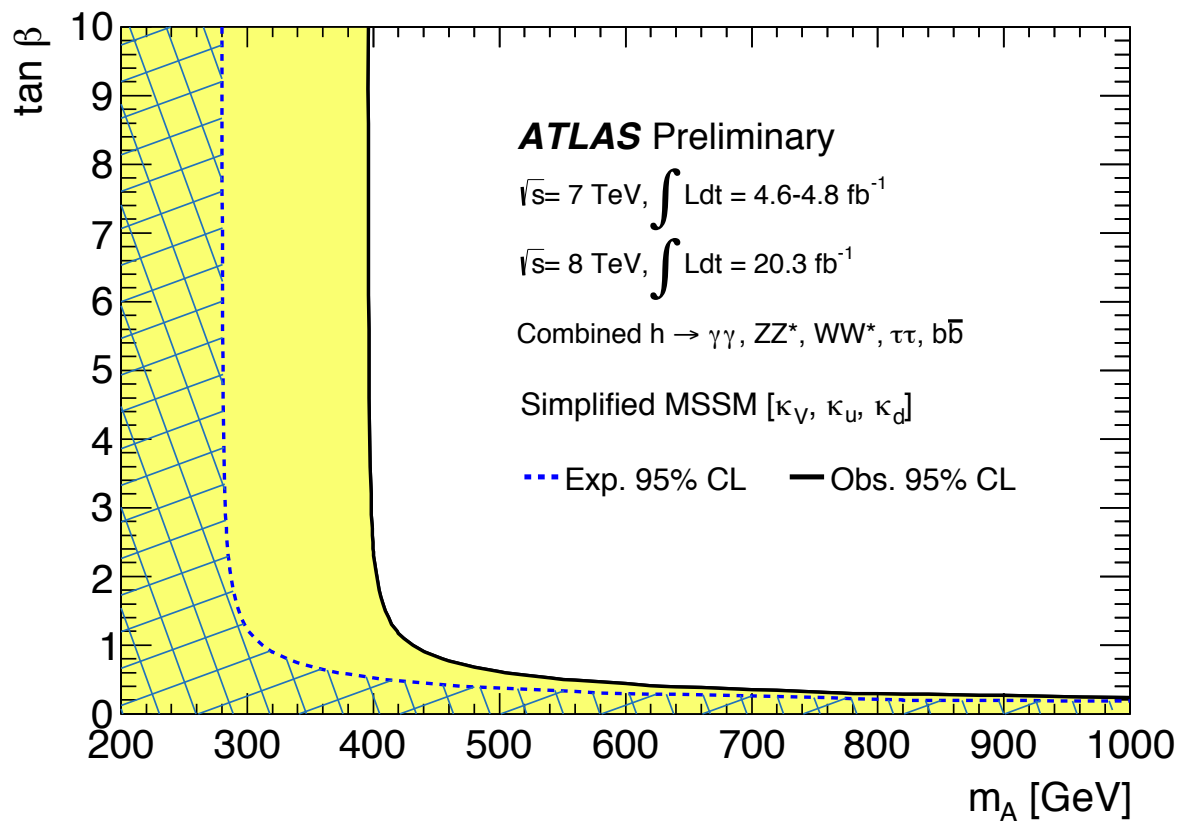


Supersymmetrie voorspelt het bestaan van meerdere Higgsdeeltjes

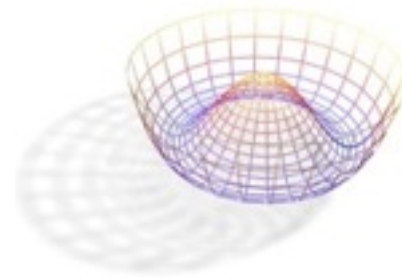
- 5 in het meest eenvoudige geval (MSSM); met het lichtste Higgsdeeltje \sim het ene Higgsdeeltje in het Standaardmodel

De massa's en koppelingssterktes van de extra Higgsdeeltjes zijn gekoppeld aan de eigenschappen van het lichtste Higgsdeeltje, en hun eigenschappen hangen ook af van de minste parameters \implies twee manieren om te zoeken:

- via de koppelingen van het bekende deeltje en "direct"



Vervolg



Nog lang niet alle mogelijke processen zijn waargenomen

- veel werk voor volgende stadium van de LHC (bij hogere energie, te beginnen over enkele maanden)
- in het bijzonder: het Higgsdeeltje zou ook aan zichzelf moeten koppelen
- ultieme test bij een volgende versneller!

De zoektocht naar andere (zwaardere) Higgsdeeltjes gaat door!

- en naar andere aanwijzingen in tegenspraak met het Standaardmodel

