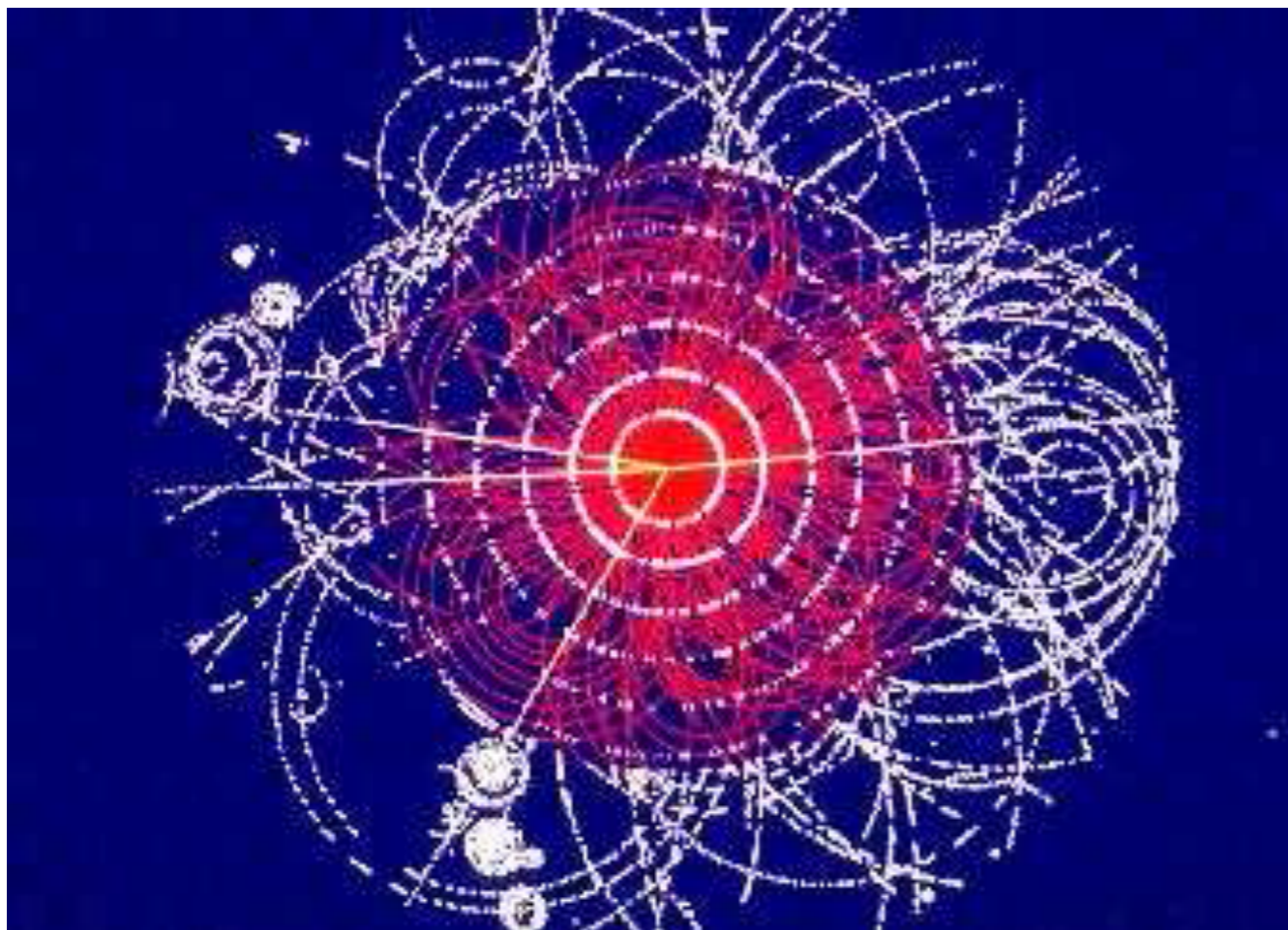


# Upptäckten av Higgspartikeln

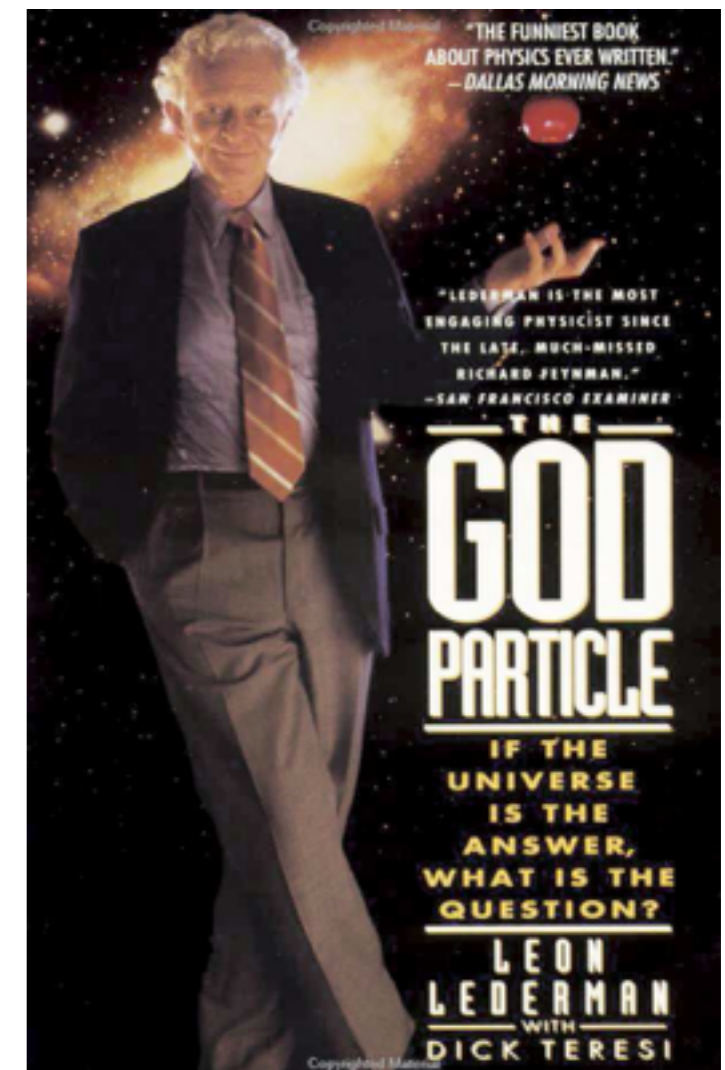


1. Introduktion
2. Partikelfysik
3. Higgspartikeln
4. CERN och LHC
5. Upptäckten
6. Framtiden

- De senaste åren har ni säkert hört talas om den så kallade Higgspartikeln vid minst två tillfällen:
  - När partikeln upptäcktes vid CERN den 4:e juli 2012.
  - I samband med att Francois Englert och Peter Higgs belönades med 2013 års Nobelpris i fysik för sina underliggande teorier.
- Higgspartikeln har till och med fått vara med som fråga i På spåret (förra året):
  - Fredrik Lindström berättar att Peter Higgs kände på sig, “så där som man gör”, att det fattades en partikel i universum. 😊
  - Och vilken “Lassie-historia” det är att den partikeln hittas nästan 50 år senare. 😊
  - Han slår huvet på spiken, hur kan något sådant ske?



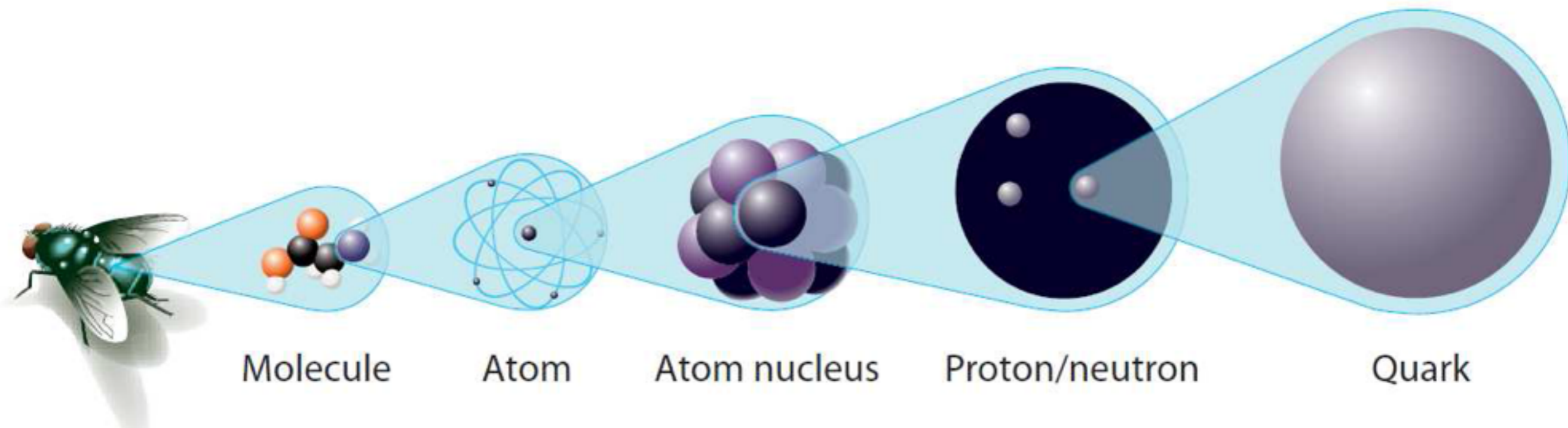
- Higgspartikelns eventuella existens har varit den kanske viktigaste frågan att besvara i partikelfysiken de senaste 40 åren.
  - Den främsta anledningen till att den stora hadronkollideraren LHC vid CERN byggdes.
- I detta föredrag ska vi titta lite på hur Higgspartikeln och dess upptäckt kan förstås:
  - Hur kan man förutsäga existensen av en ny partikel som man aldrig har sett?
  - Vad är denna Higgspartikel?
  - Hur hittar man en ny partikel?
  - Vad kommer att hända nu?
- Fast Leon Lederman har inte rätt (även om han själv hävdar att han inte kallat den så).



Vad den inte är...

# **Standardmodellen för partikelfysik**

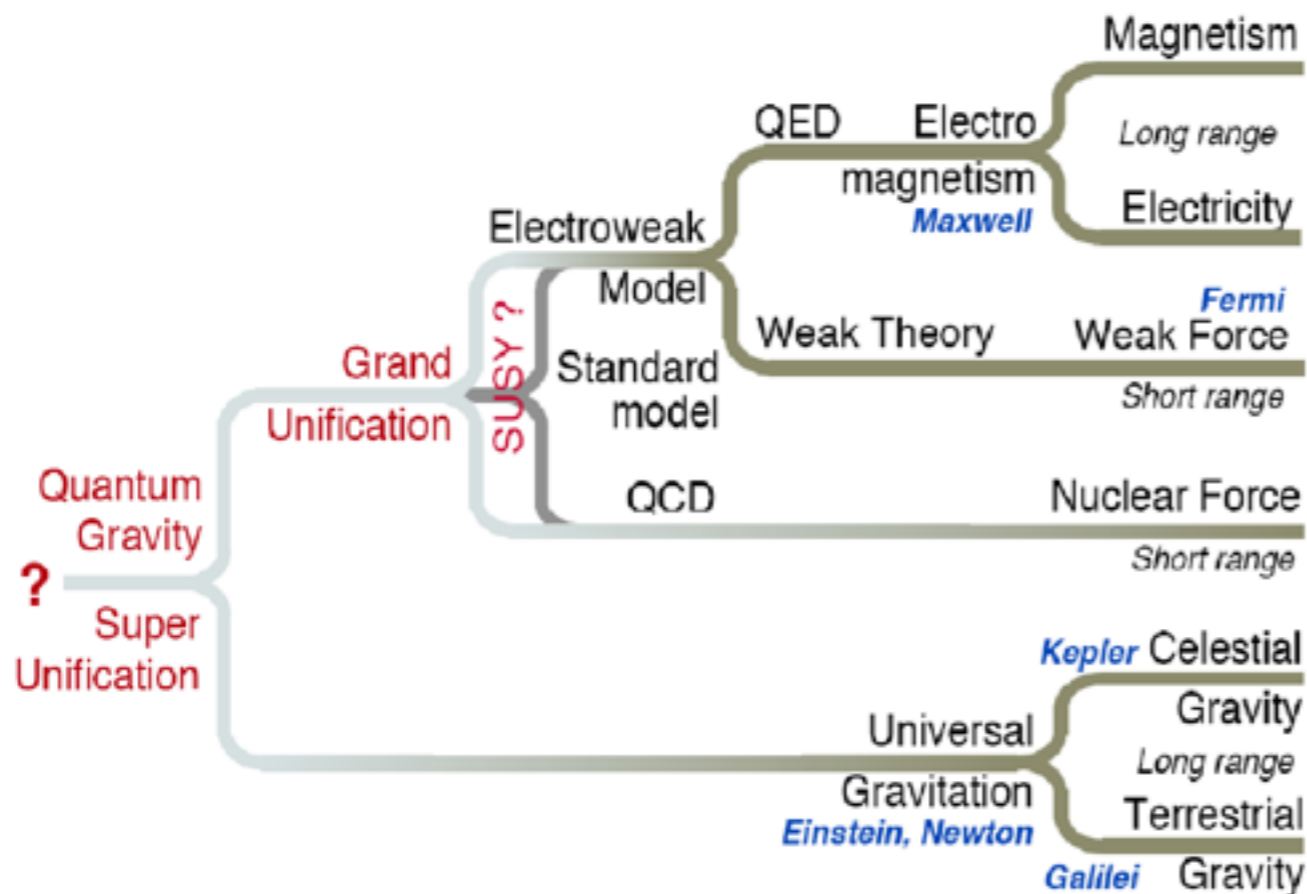
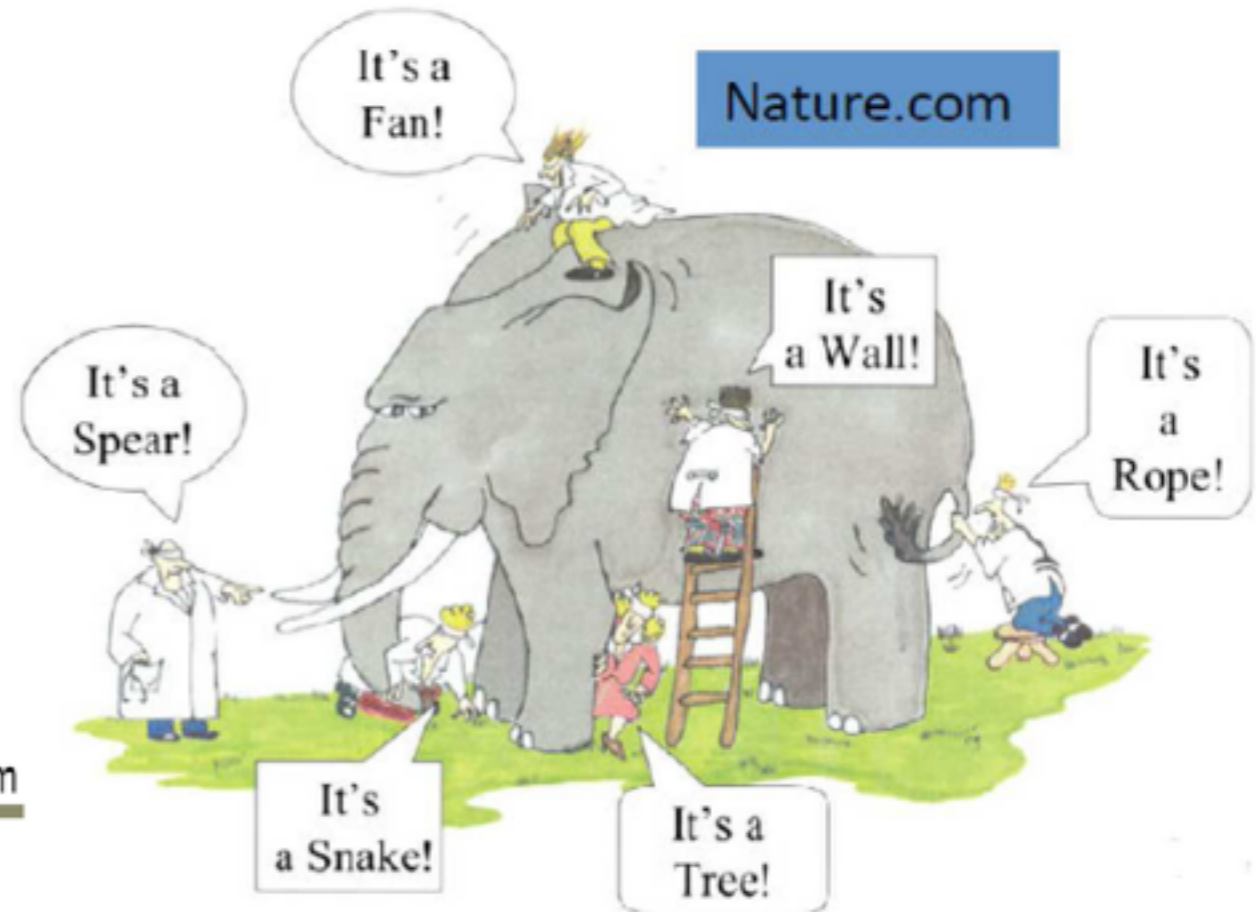
- Partikelfysiken försöker identifiera materians minsta beståndsdelar och de krafter som verkar mellan dem.



- En så kallad elementarpartikel är en odelbar partikel.
  - Men den kan faktiskt vara instabil, om det finns en eller flera lättare elementarpartiklar som den kan sönderfalla till.
- Partiklar som vi tror är elementära är kvarkar (som bygger upp protoner och neutroner) och leptoner (till exempel elektronen).

- Man kan säga att krafterna bestämmer hur allting rör sig, och vad som kan hända om partikel A och partikel B möts.
  - Om man känner till vilka elementarpartiklar som finns, och vilka krafter som påverkar dem, kan man beräkna allt som kan hända.
- Vi känner till fyra “fundamentala” krafter i universum:
  - Den starka kraften: Verkar mellan kvarkar, inuti protoner och neutroner till exempel. Håller ihop atomkärnan.
  - Den svaga kraften: Omvandlar tyngre partiklar till lättare, till exempel sker detta i radioaktiva sönderfall.
  - Den elektromagnetiska kraften: Verkar mellan alla partiklar som har elektrisk laddning, håller ihop atomen bland annat.
  - Gravitationen: Verkar mellan alla partiklar med massa. Den klart svagaste kraften, omöjlig att se genom att bara studera krafterna mellan enskilda elementarpartiklar.

- Varför finns det 'fyra' krafter i universum, och inte bara en?
- Krafternas styrka ändras som en funktion av energin.
  - Vad som kan verka vara skilda fenomen förenas.



- Partikelfysikens heliga graal är att förena de fyra krafterna.
  - Kraften vid Big Bang.
  - Den elektrosvaga föreningen sker vid "låg" energi ( $10^{15}$  C).

- Vår nuvarande kunskap i partikelfysik är sammanfattad i den så kallade standardmodellen. Inkluderar alla kända elementarpartiklar.
  - Beskriver tre av fyra krafter, gravitationen är för svag för att detekteras på partikelnivå och är inte del av standardmodellen.
- Än så länge har standardmodellen lyckats beskriva alla experiment.

## Fermions matter particles

### Quarks



### Leptons



## Gauge bosons force carriers



## Higgs boson origin of mass



### Leptons

$e, \mu, \tau$   
 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$



### Quarks

$u, c, t$   
 $d, s, b$



Photon



$W^+W^-$



$Z^0$



Gluons



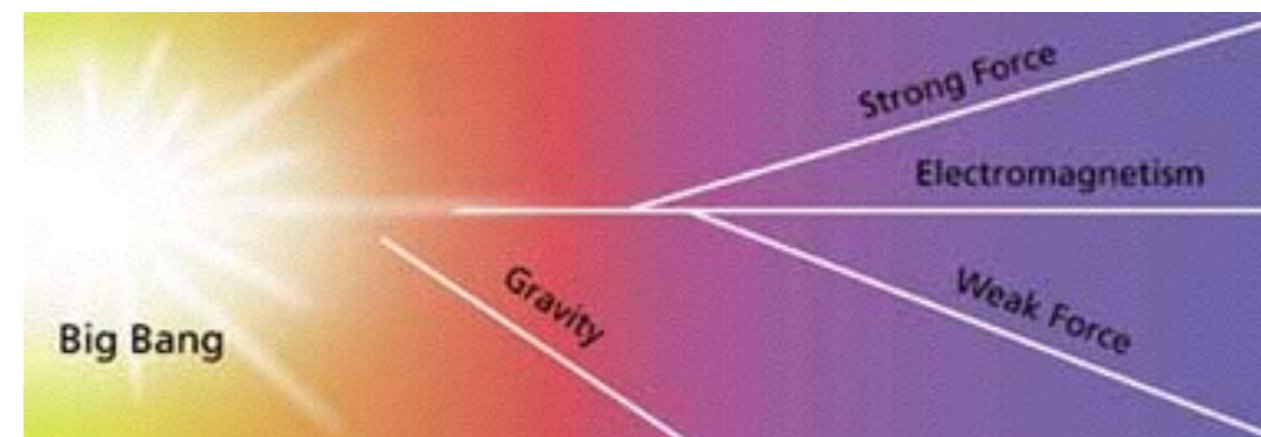
Higgs Boson



# Higgspartikeln och Higgsmekanismen

- I mitten av 60-talet började de teorier för partiklar och krafter som vi idag kallar standardmodellen växa fram:
  - Man insåg kvarkarnas existens, materian består av leptoner (elektroner) och kvarkar (i protonen och neutronen).
  - Kunde beskriva den elektromagnetiska och den svaga kraften.
- Det fanns emellertid ett stort problem, om elementarpartiklarna hade någon massa blev resultatet nonsens!
- Lösningen på problemet hämtade inspiration från supraledning.
  - Magnetiska och elektriska fält kan inte tränga in i en supraledare. Fasövergång ger fotonerna en effektiv massa inuti supraledaren.
- Tre grupper av fysiker lade, oberoende av varandra, fram en teori om att man kunde införa ett nytt fält i teorin.
  - Om detta fält hade speciella egenskaper kunde det ge massa till elementarpartiklarna utan att teorin gav nonsens.

- En av fysikerna som postulerade det nya fältet var Peter Higgs.
  - Han gick ett steg längre än de övriga och visade att en konsekvens av det nya fältet skulle vara att det också måste existera en ny och ännu upptäckt partikel.
  - Denna partikel kom att kallas Higgspartikeln, och teorin med det nya fältet kom att kallas Higgsmekanismen.
- Higgsmekanismen var väldigt specifik när det gällde vilka egenskaper Higgspartikeln måste ha.
  - Det enda teorin inte kunde säga var exakt vilken massa Higgspartikeln själv hade, annars var allt förutbestämt.
- Higgsmekanismen bevisade också att den elektromagnetiska och den svaga kraften bara var två sidor av en och samma kraft.



- Ett fält är något som genomsyrar hela universum, och som vi inte kan känna av (så länge det är i grundtillståndet).
  - Ungefär som luften omkring oss.
- Det vi kan detektera är störningarna, eller vågorna, i fälten. De är vad som är verkligt, och dessa vågor är elementarpartiklarna.
  - Ungefär som att vi kan känna när vinden blåser, det vill säga vi kan känna av luftens rörelser.
- Genom att detektera störningarna, partiklarna, så kan vi påvisa att fälten existerar.
- Inte bara Higgspartikeln har ett fält, alla partiklar har det.
  - Så det finns ett elektronfält till exempel, och alla elektroner är som små vågor i elektronfältet.



- Med Higgspartikeln kommer alltså existensen av ett fält, Higgsfältet, som genomsyrar hela universum.
- När partiklarna rör sig genom Higgsfältet “klibbar det fast” på partikeln som då rör sig trögare.
  - Denna tröghet är detsamma som att säga att partikeln har massa. Olika partiklar rör sig olika lätt genom fältet.



Ett rum med fysiker representerar fältet. En känd fysiker får svårt att röra sig.

- Higgspartikeln själv är en störning i Higgsfältet.



Ett rykte sprids i rummet. Det bildas klungor runt ryktet. *Fältet blir exiterat.*

- Så om man visar att Higgspartikeln finns så har man också visat att Higgsfältet finns.
- En annan analogi är att tänka sig Higgsfältet som ett stort snöfält som alla partiklar måste ta sig igenom.

**LHC och ATLAS**

- Så allt som återstår är att hitta Higgspartikeln för att bekräfta ett av de största framstegen i fysiken någonsin.
- Hur hittar man då en partikel som bara existerar en miljondedels-miljarddels-miljarddels sekund?
  - Först måste man ha tillräckligt med energi för att skapa en Higgspartikel, energin måste överstiga Higgspartikelns massa.
  - Sedan måste man veta hur Higgspartikeln sönderfaller, och lyckas detektera exakt den signalen (de partiklarna).
- För att få det slutgiltiga svaret på frågan om Higgspartikelns existens har den Stora Hadronkollideraren LHC byggts vid CERN.
  - Kollisionerna levererar den nödvändiga energin för att en Higgspartikel ska kunna skapas.
  - Stora detektorer har byggts (som stora digitalkameror) som registrerar partiklarna som kommer ut från kollisionerna.

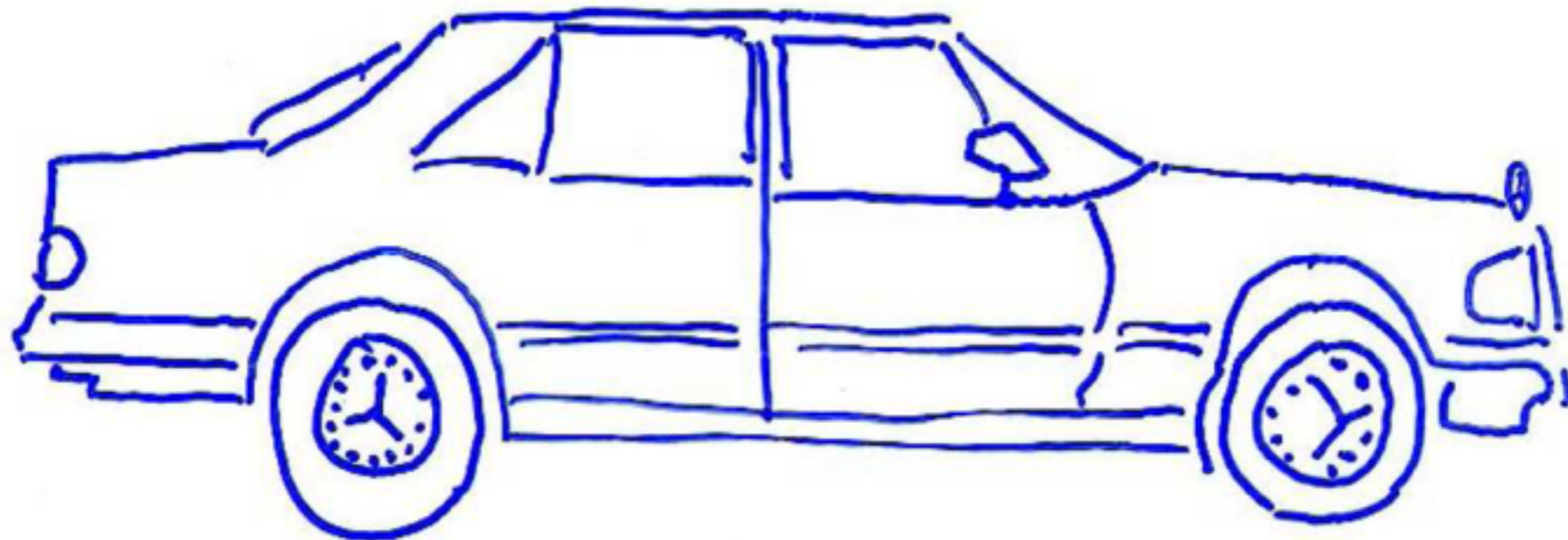




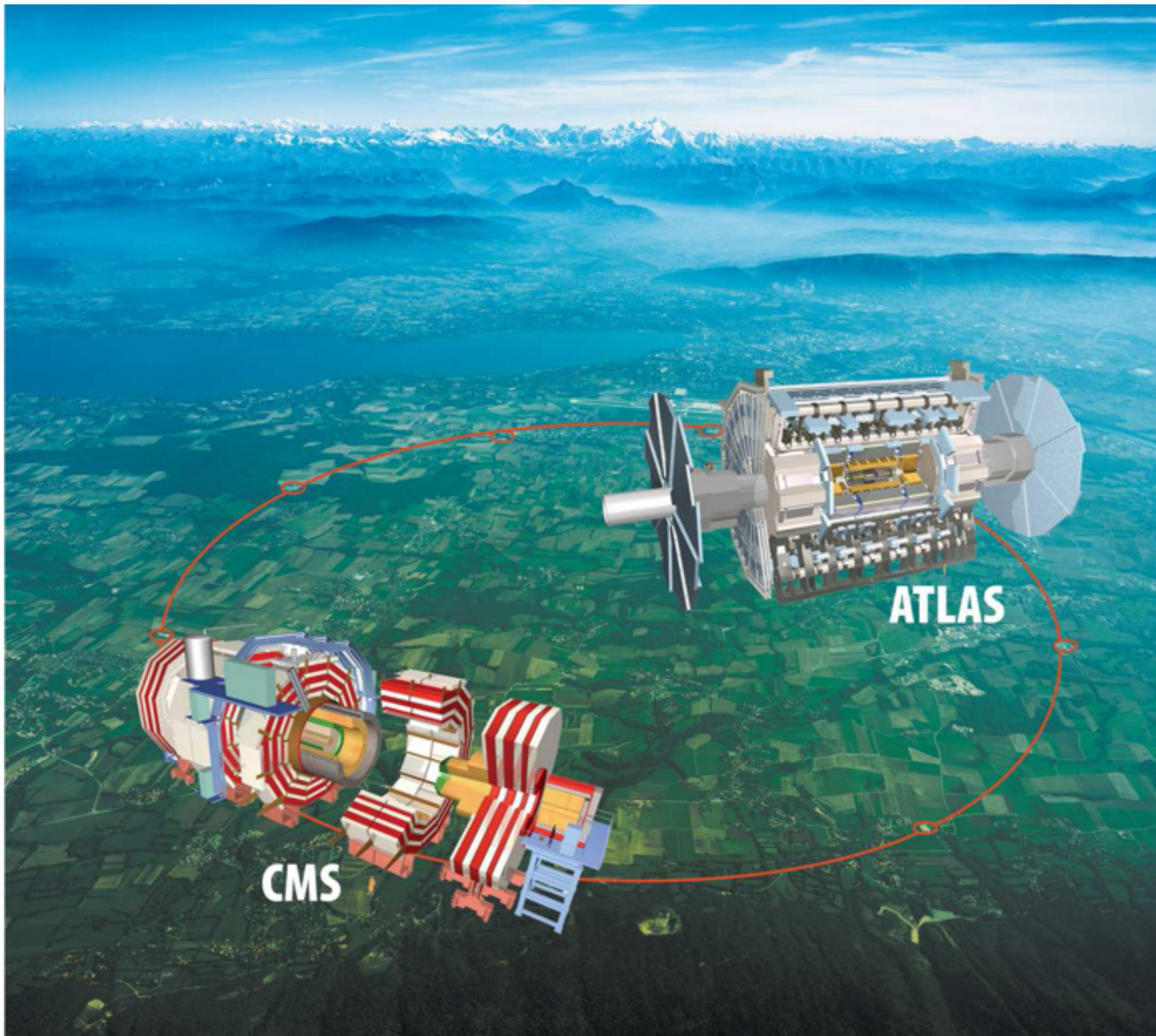
Ta två helt vanliga protoner ...



... och kollidera dem vid enormt höga energier ...



... så skapas ibland en Mercedes (eh, Higgspartikel)!

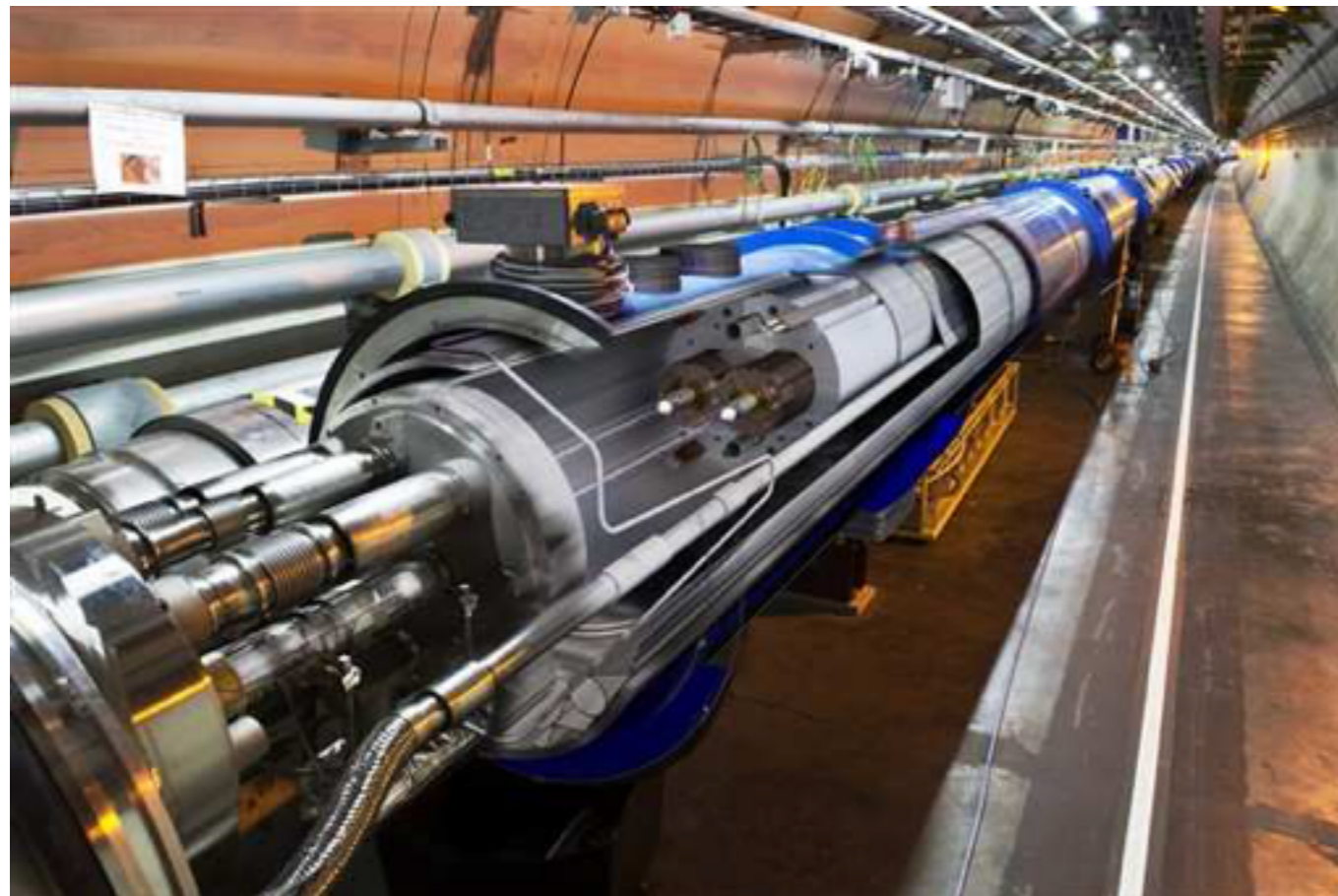
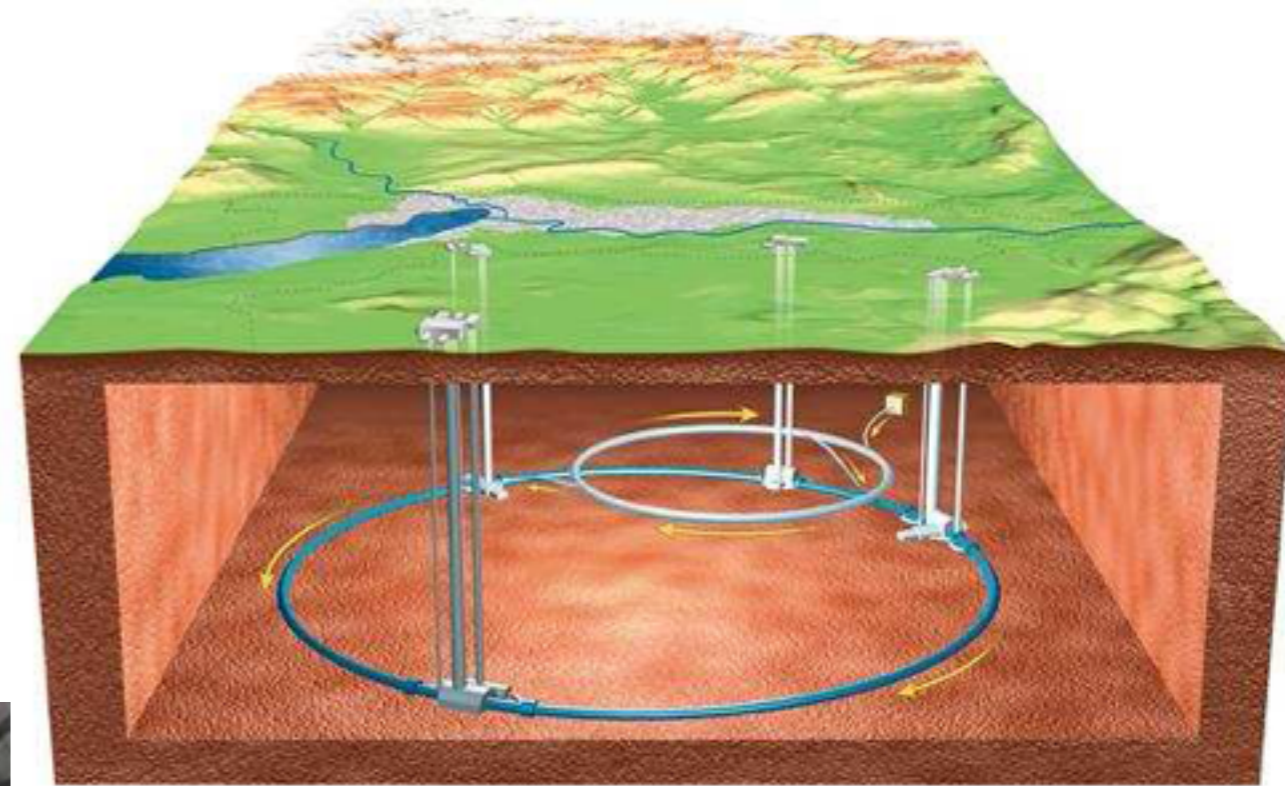


- LHC är designad för att kollidera protoner nära ljusets hastighet.
  - Sju gånger högre energi än sin föregångare i USA.
  - LHC har hittills kört vid drygt halva sin maxenergi.
  - Har varit nedstängd i två år, börjar ta data igen senare i vår.
- Förutom den höga energin vill man också ha många kollisioner.
  - Ökar chansen att hitta något väldigt ovanligt.
- Fyra experiment vid LHC:
  - ATLAS, CMS, Alice och LHCb.



Alla protoner som behövs för hela LHCs livstid.

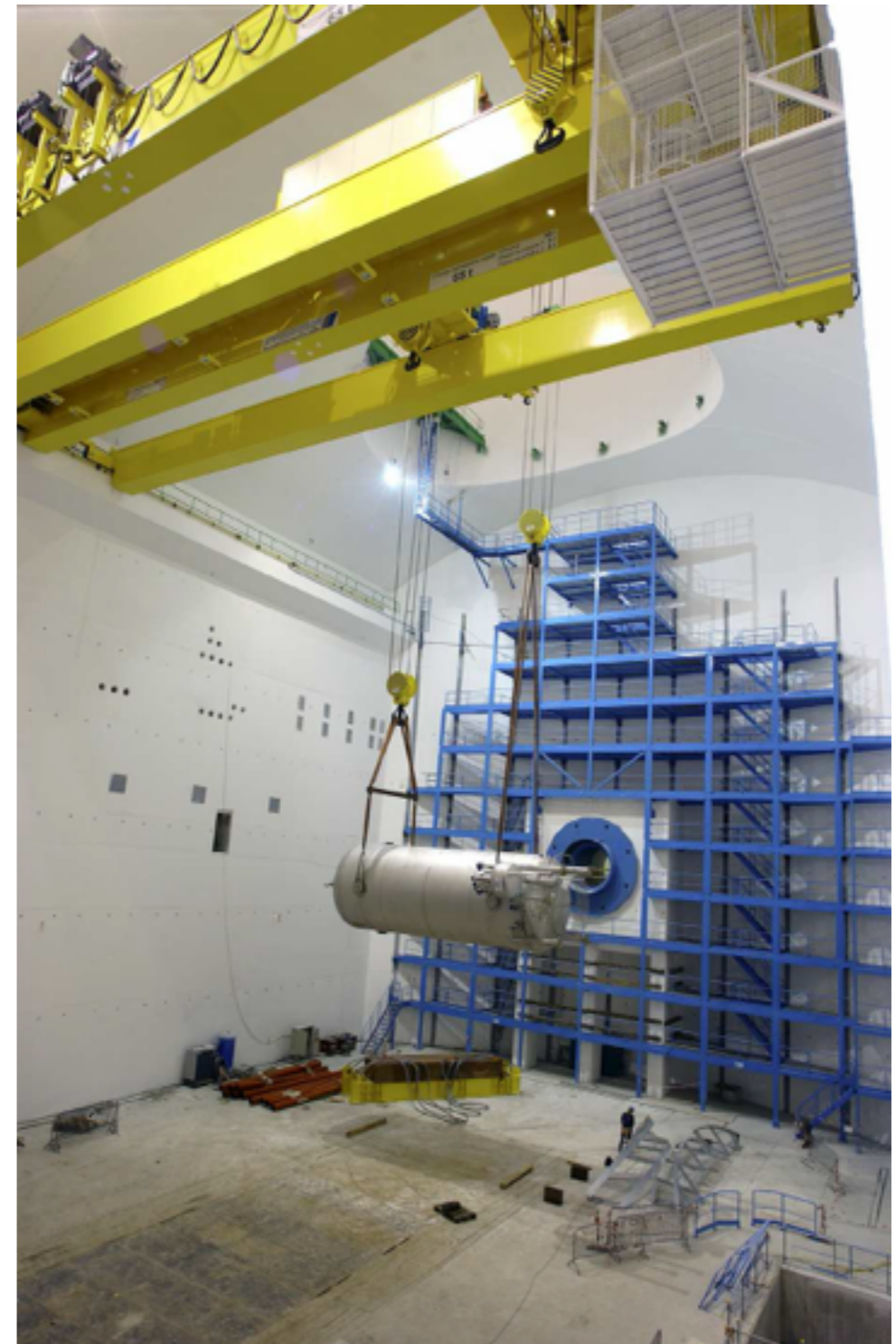
- Belägen 100 m under jord och är 27 km i omkrets.
- De begränsande faktorerna är dipolmagneterna.
  - Ett magnetiskt fält på 8,4 T skapas av en ström på 11700 A.



- 10080 ton flytande N kyler ner magneterna till 80 K.
  - Ytterligare 60 ton flytande He för att kyla dem till 1,9 K.
- Kolliderar protoner som färdas vid  $0,9999999c$  varje 25 ns.

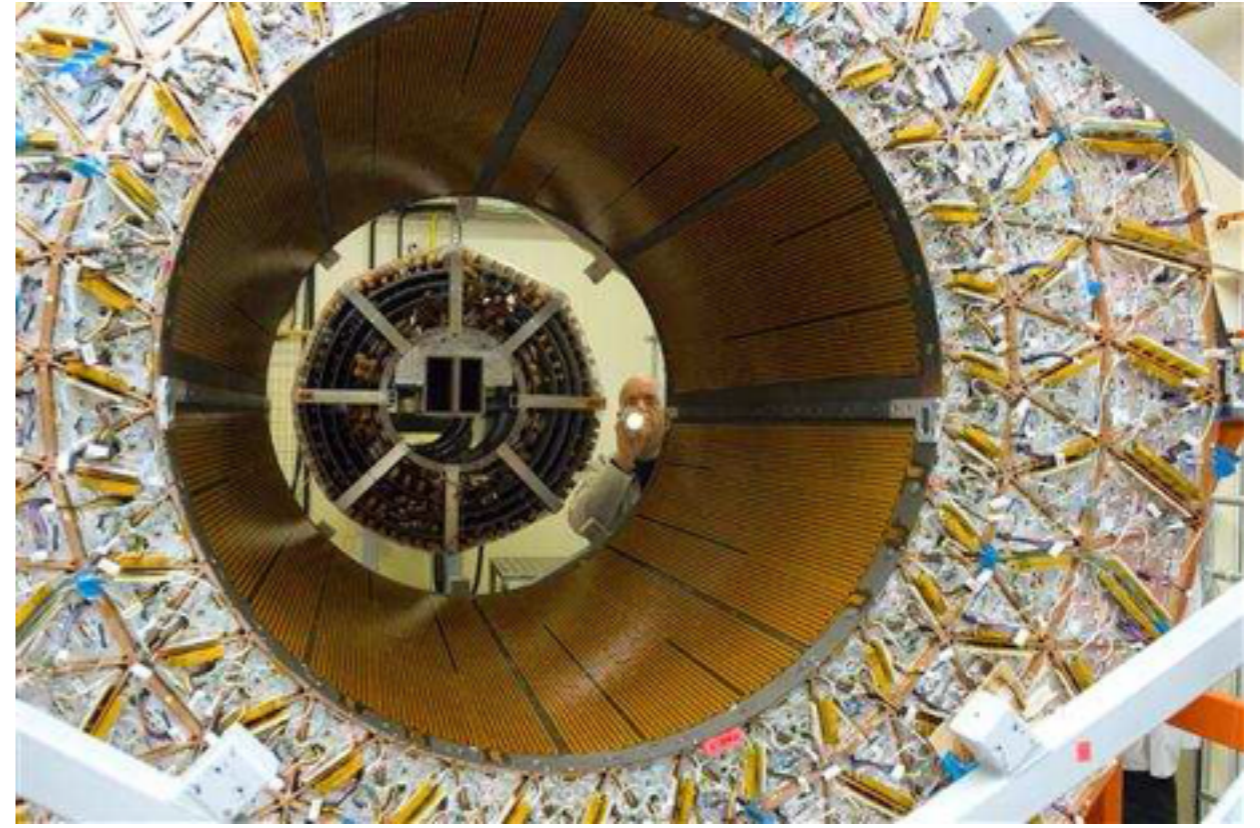
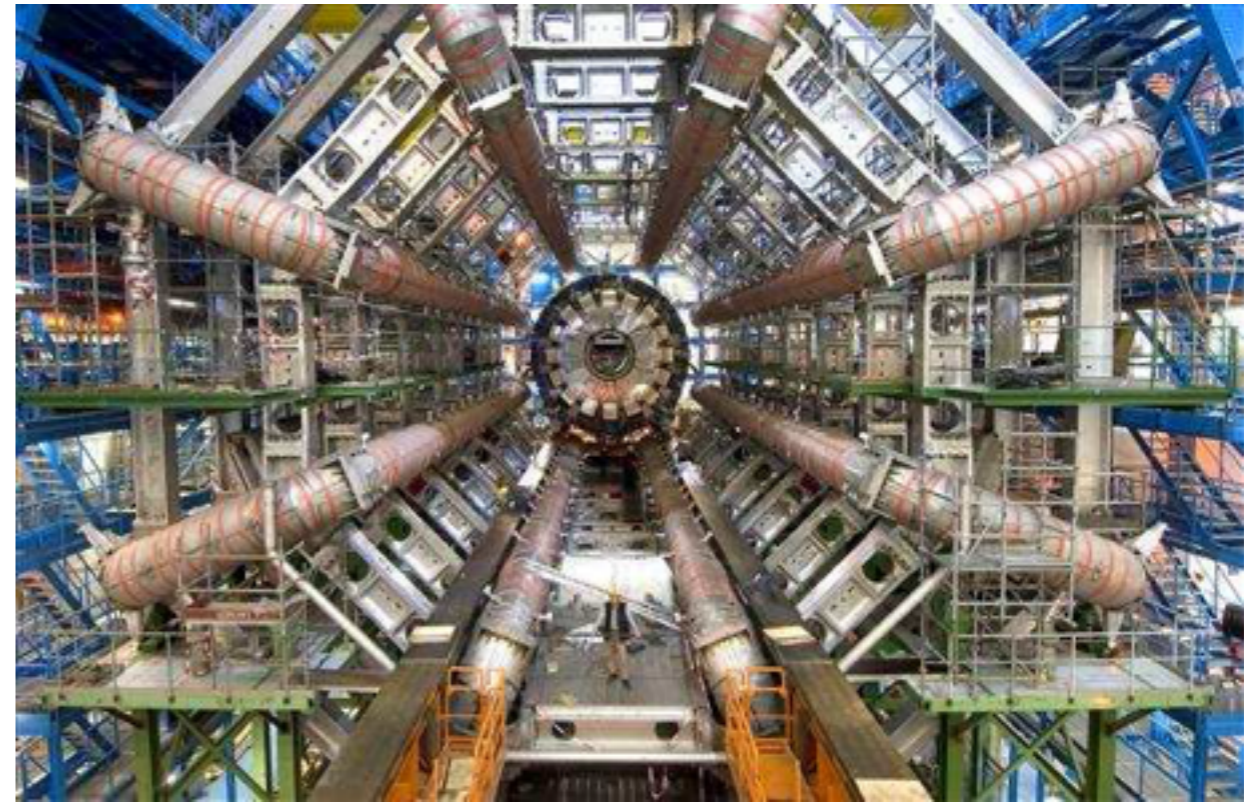
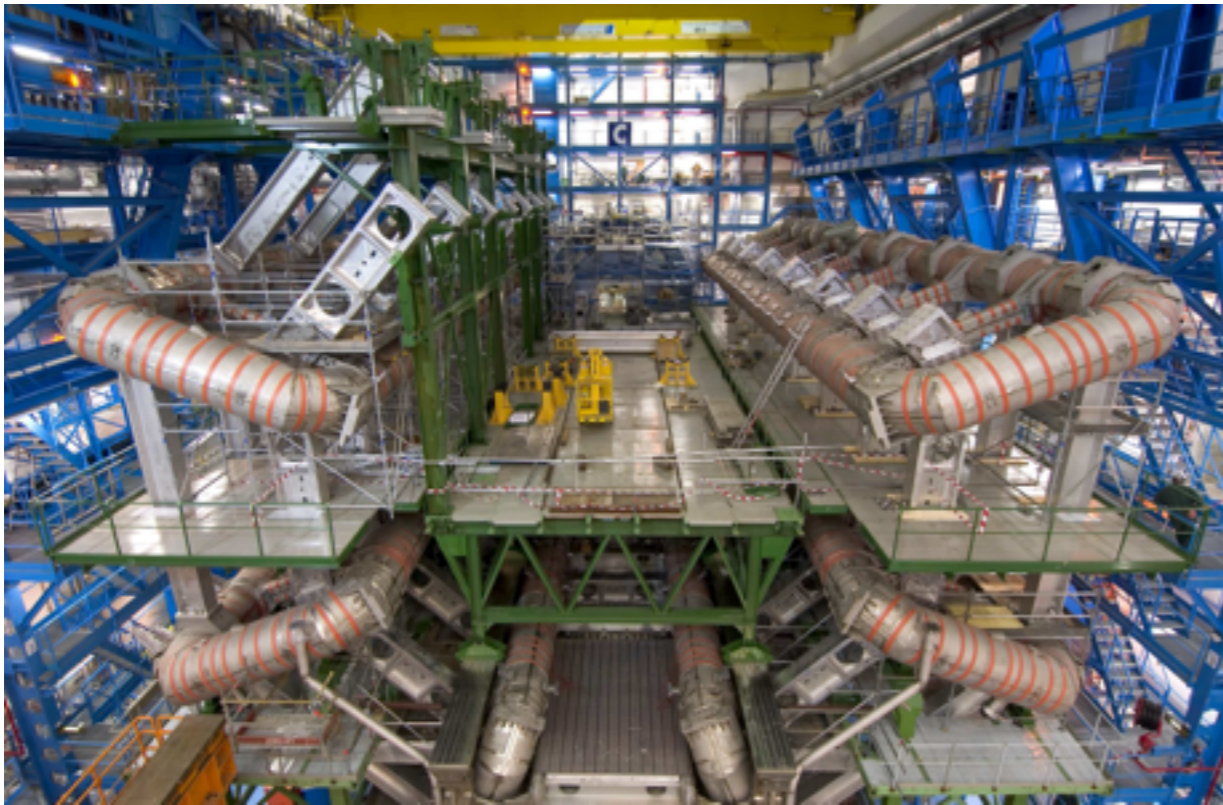
- En av de 1232 dipolmagneterna.

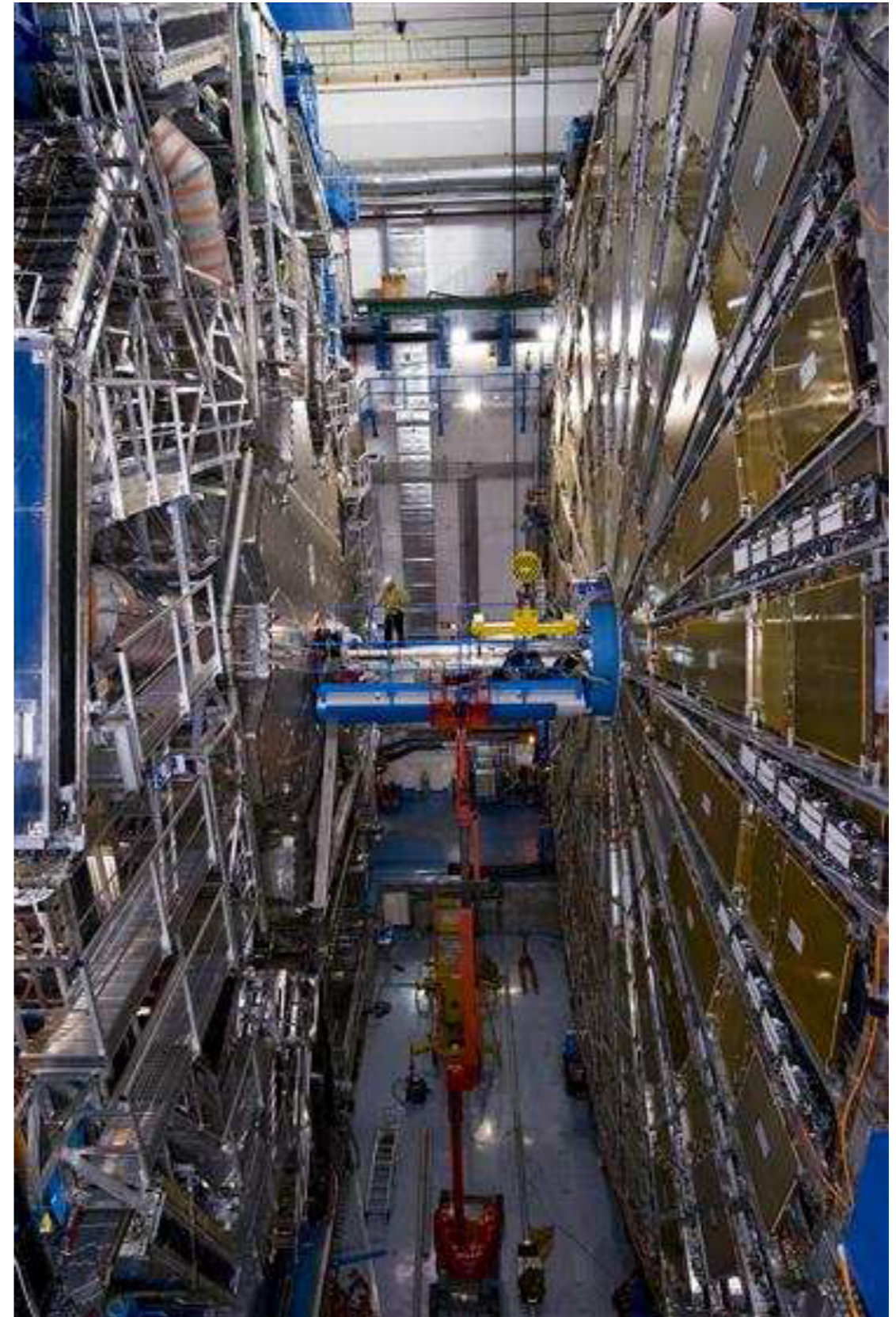
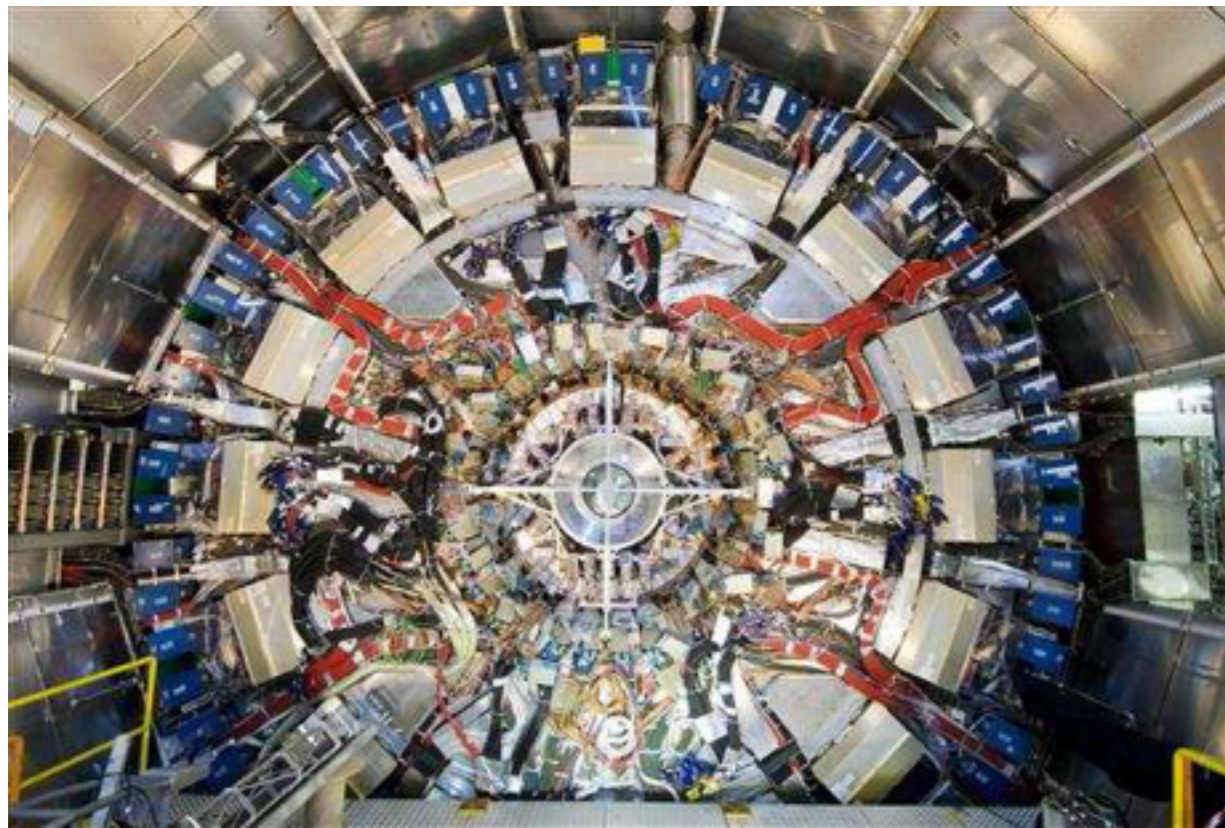




**Bergrummet (flaskan) är stort nog att rymma hela Notre Dame.**

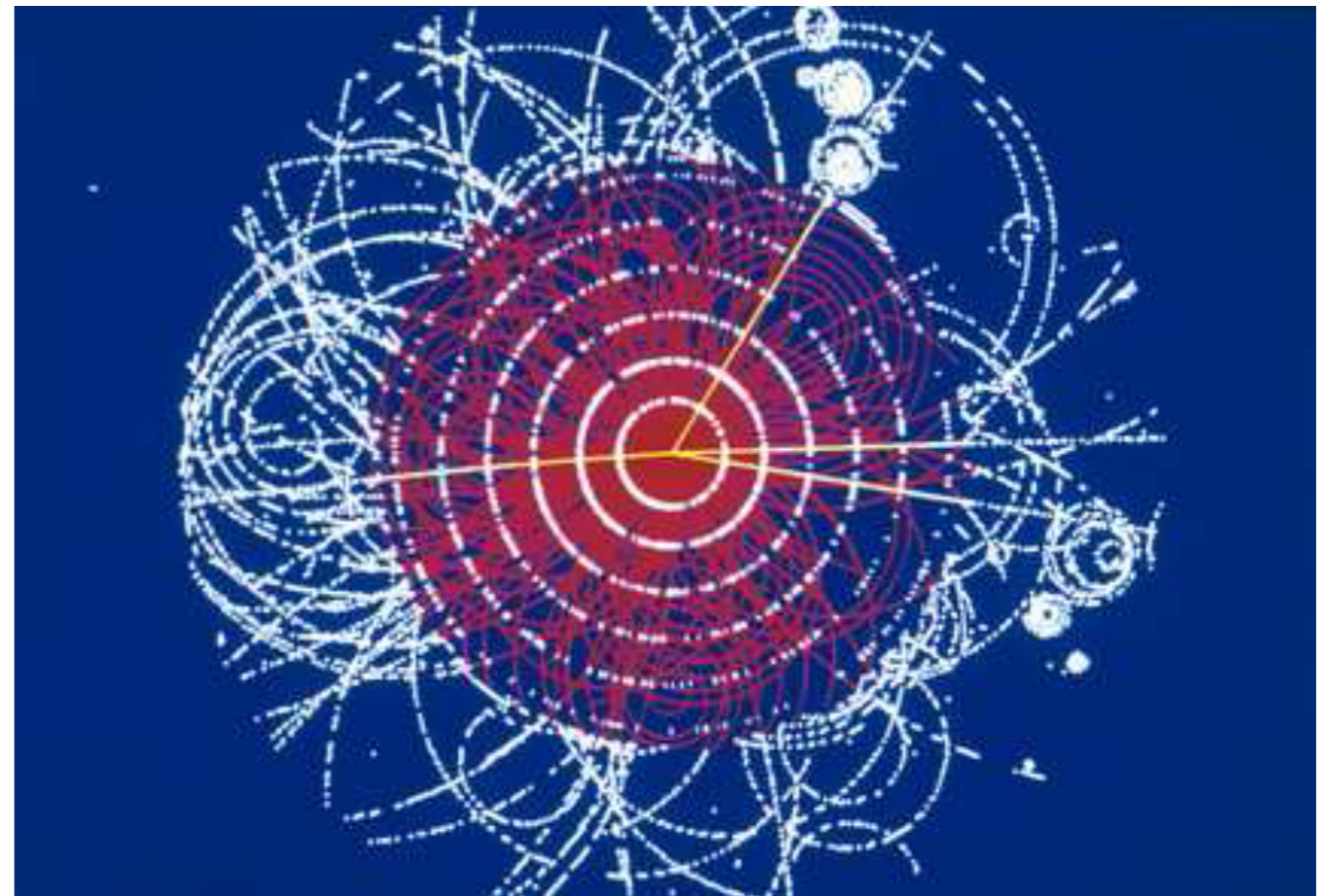


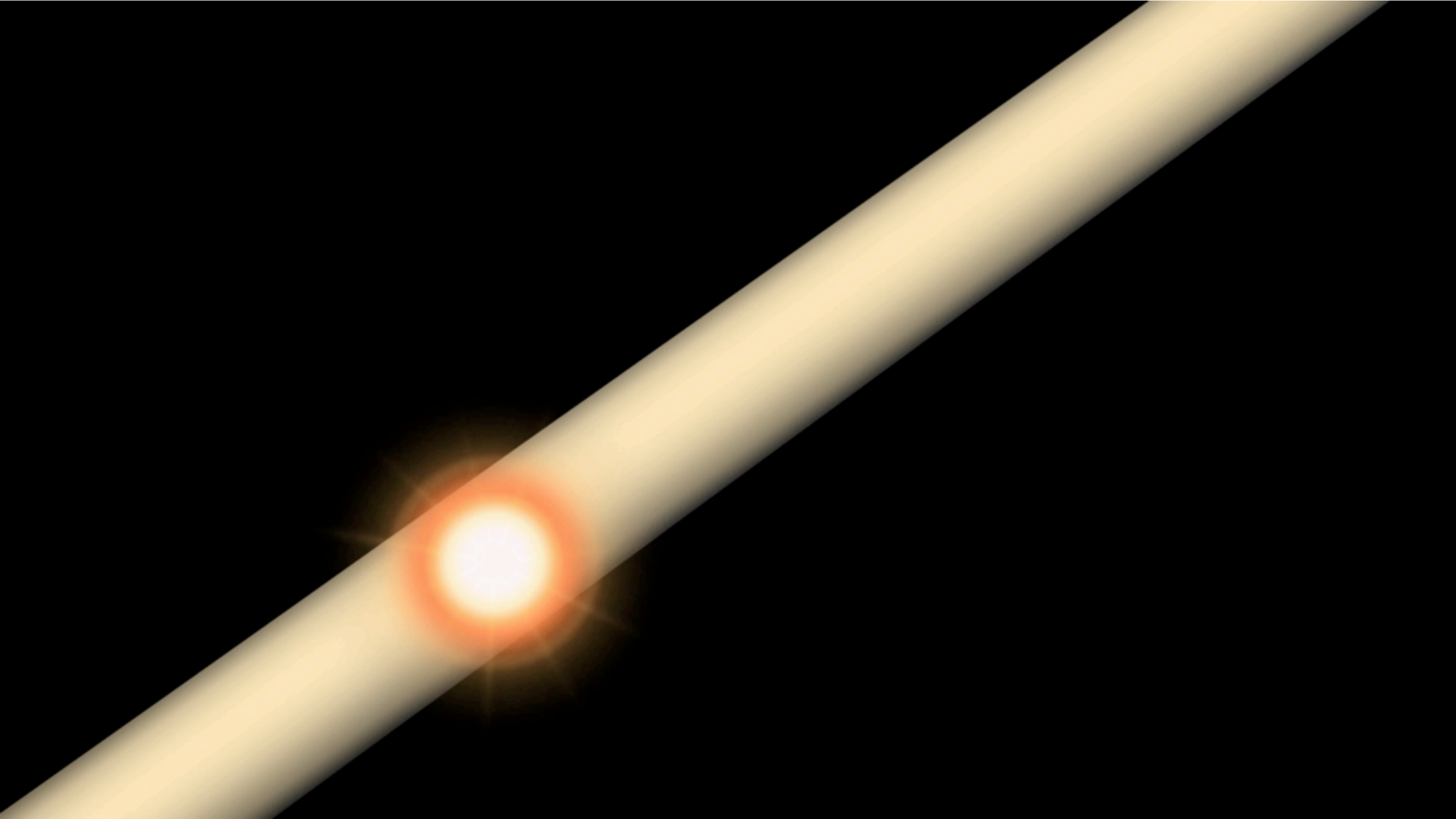




# Upptäckten av Higgspartikeln

- Vi kan aldrig se Higgspartikeln direkt, den sönderfaller genast till andra partiklar (flera olika sönderfall är möjliga).
  - Genom att hitta tillräckligt många sådana typiska sönderfall kan vi sluta oss till att Higgspartikeln existerar.
- De tydligaste signalerna är när Higgspartikeln sönderfaller till någon av dessa två:
  - Fyra elektroner eller myoner (som på bilden till höger, myoner i gult).
  - Två ljuspartiklar, fotoner.
- Partikelfysikanalys är som detektivarbete, genom att studera spåren på brottsplatsen kan man sluta sig till vad som verkligen hände efter att protonerna kolliderat.



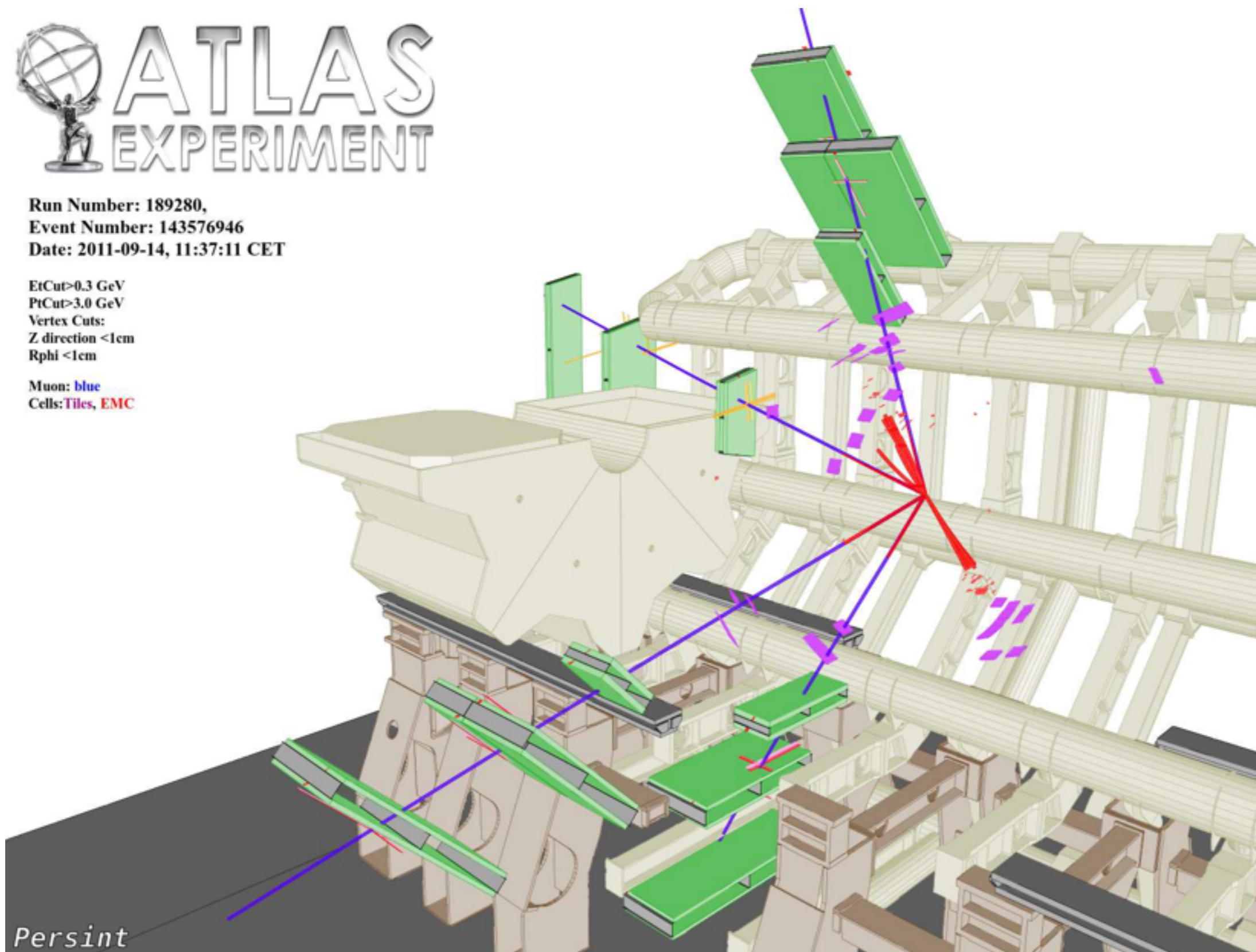




Run Number: 189280,  
Event Number: 143576946  
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

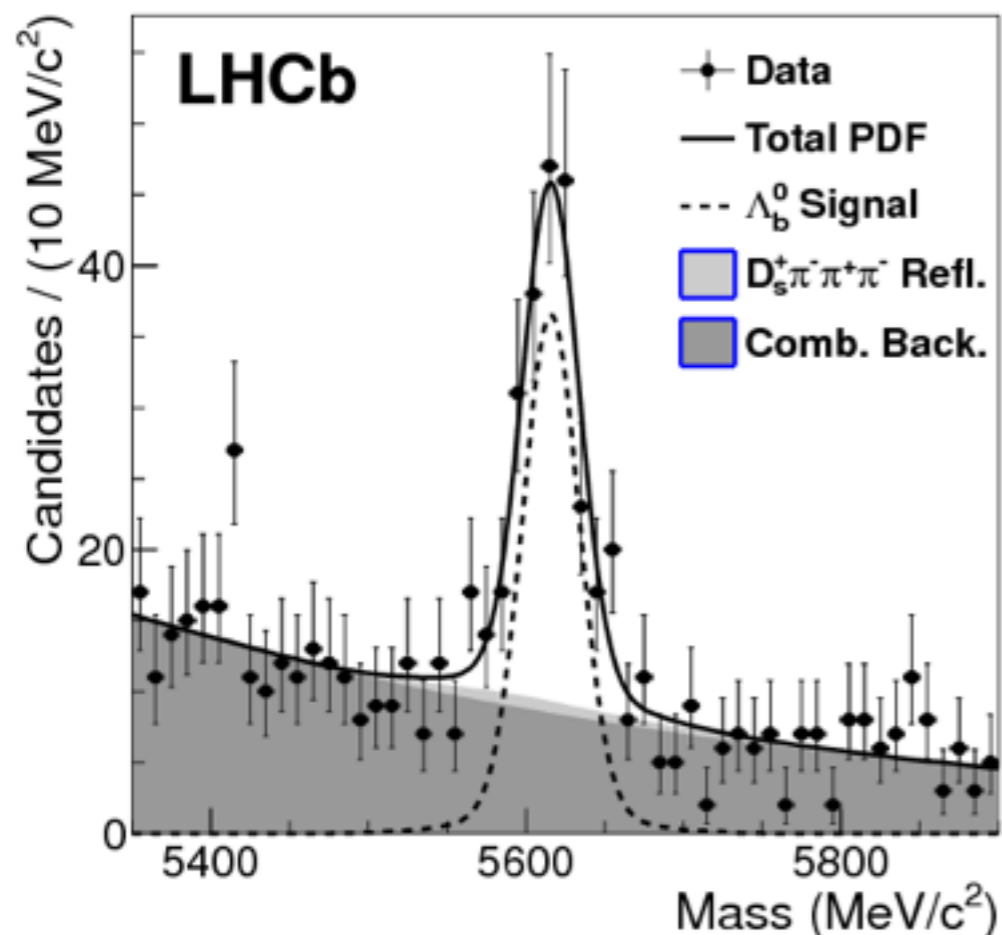
EtCut > 0.3 GeV  
PtCut > 3.0 GeV  
Vertex Cuts:  
Z direction < 1cm  
Rphi < 1cm

Muon: blue  
Cells: Tiles, EMC

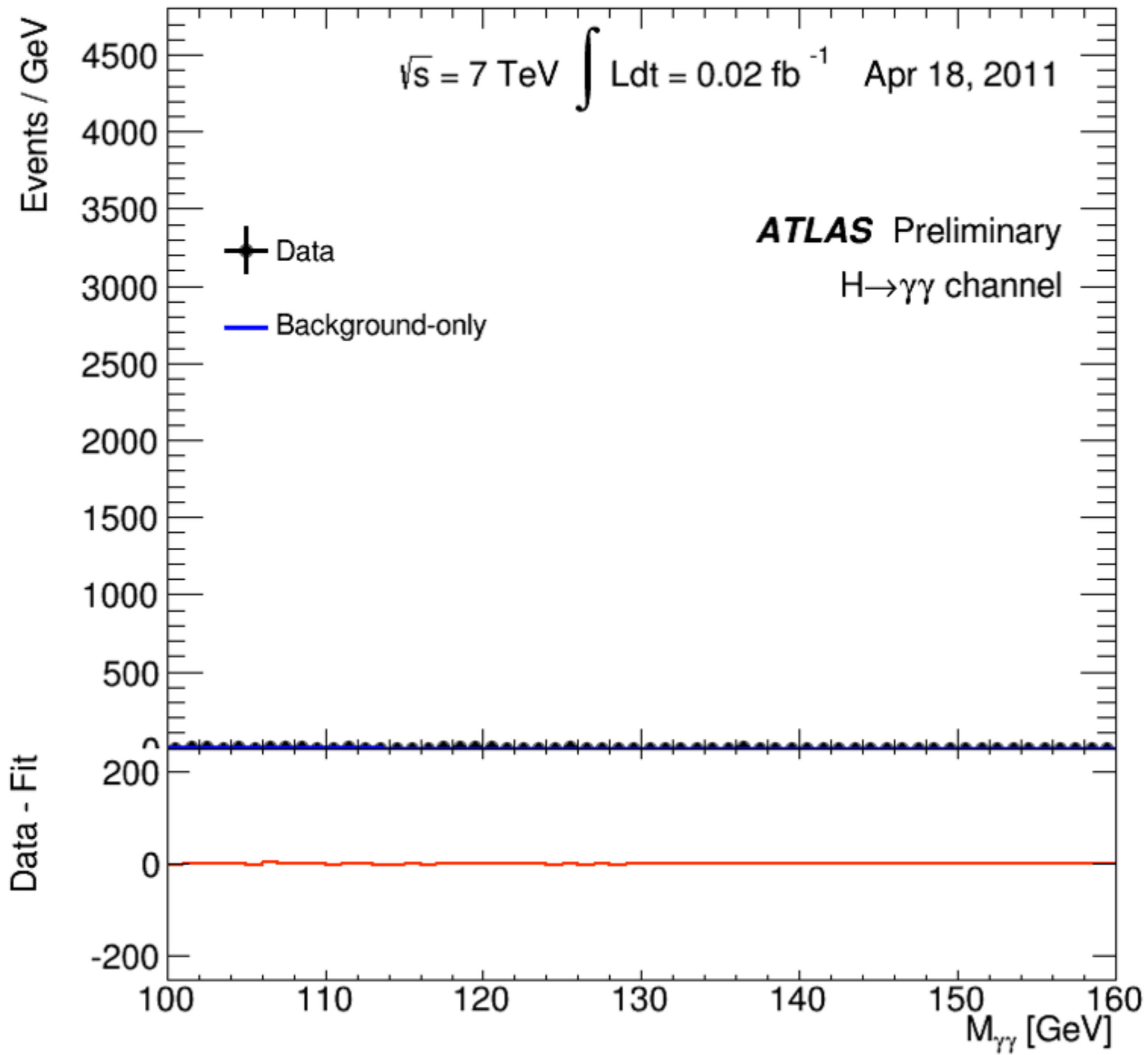


Persint

- Förutom Higgspartikeln finns andra, redan kända, fysikprocesser som också kan resultera i fyra myoner till exempel.
  - Sådana processer kallas bakgrundsprocesser.
- Genom att mäta energin hos sönderfallsprodukterna kan man sluta sig till vilken massa moderpartikeln (om sådan finns) hade.

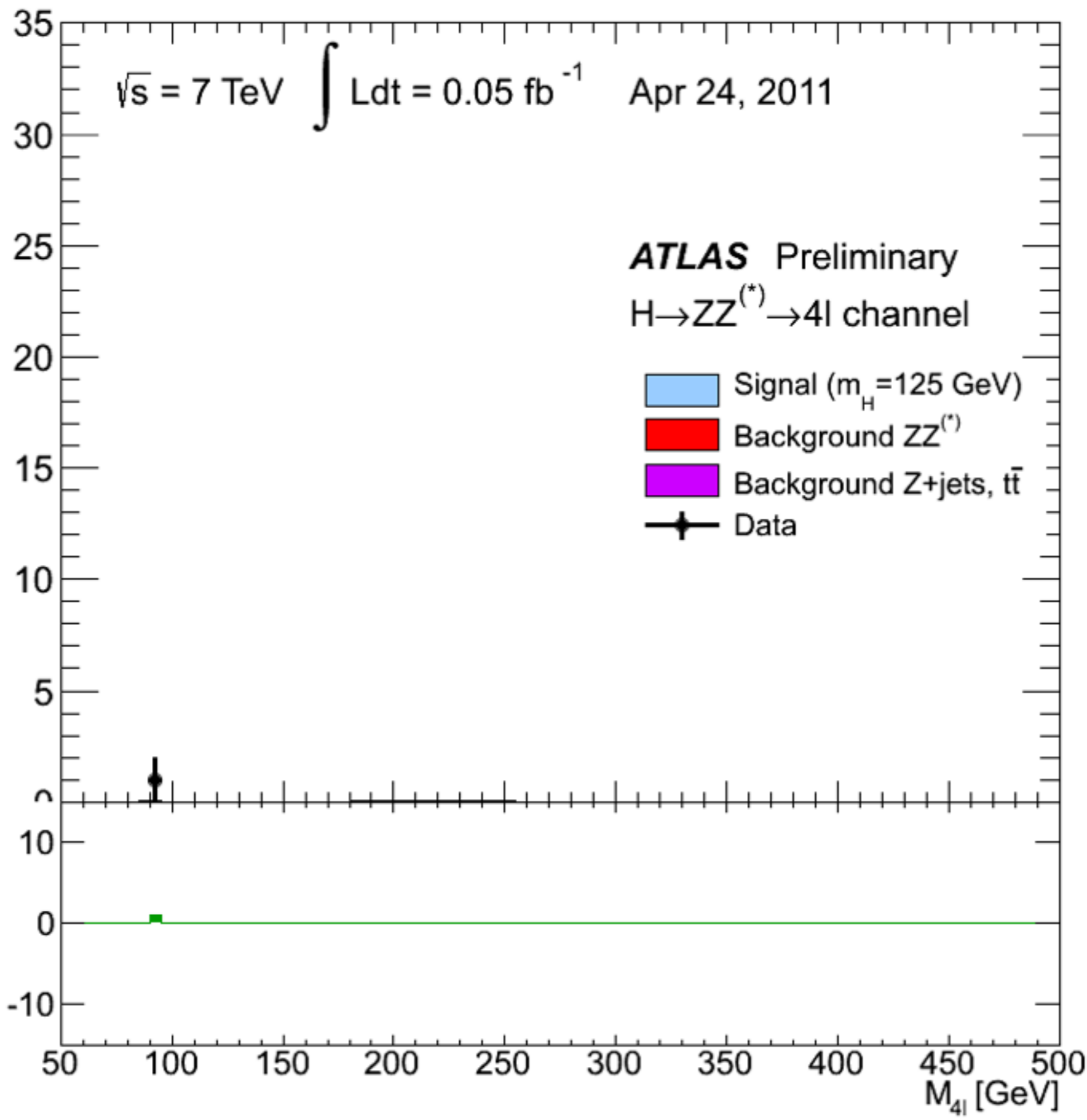


- Signalhändelserna kommer att samlas runt massan hos moderpartikeln.
- Bakgrundshändelserna kommer att vara jämnt utspridda överallt.
  - Genom att hitta en topp ovanpå den kontinuerliga bakgrunden kan man identifiera en ny partikel.
- Till vänster ses ett exempel, där en topp ligger på den grå bakgrunden.



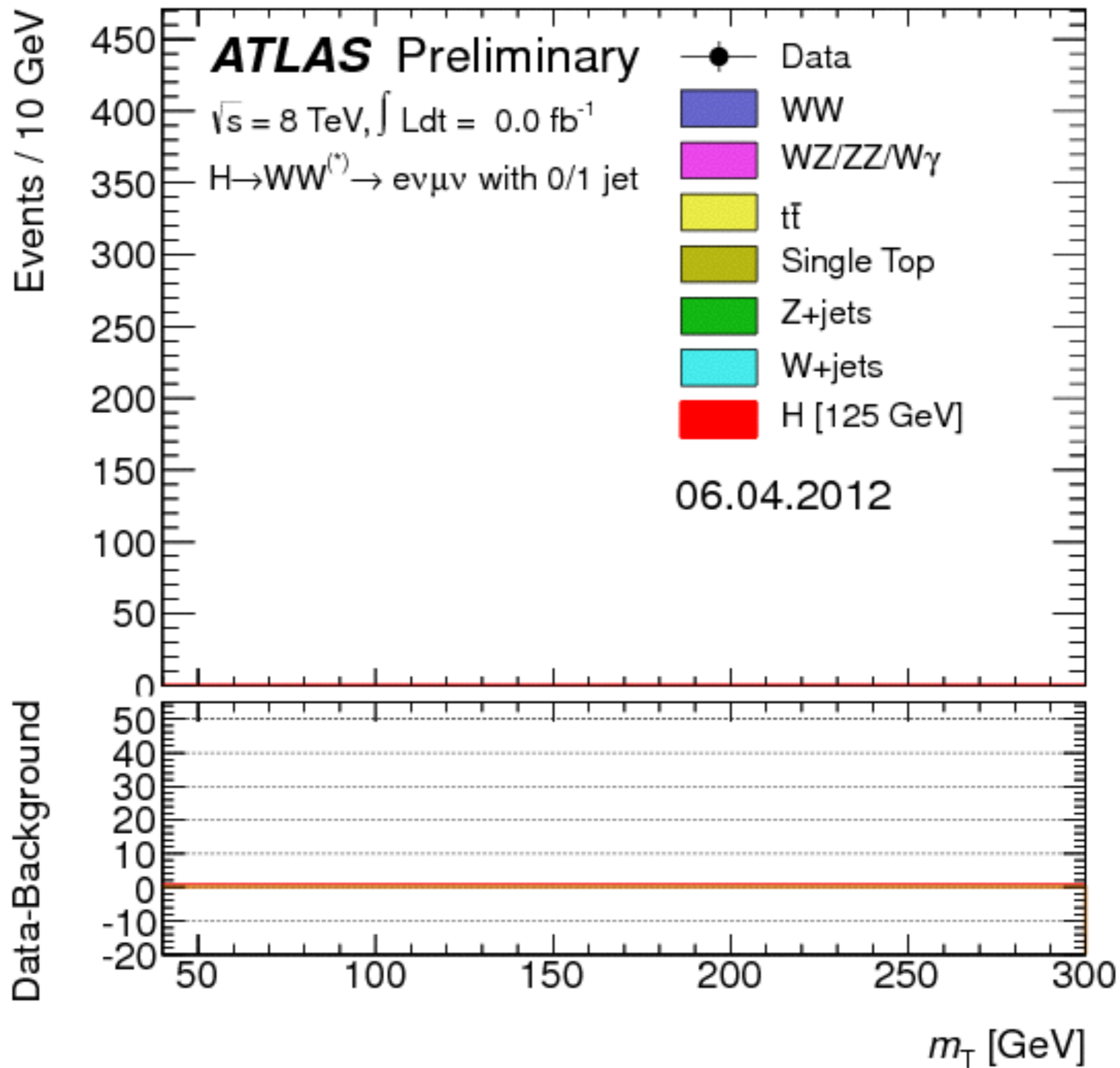


Events / 5 GeV



Data - Background

$M_{4l}$  [GeV]



- Lite drygt två år efter att LHC startat, rådde det inte längre något tvivel om att Higgspartikeln existerade.
  - Både ATLAS och CMS hade, oberoende av varandra, hittat en ny partikel med en massa av 125 GeV (ca 125 protonmassor).
  - CERN kallade till presskonferens och bjöd in de teoretiker som var med och formulerade teorin för femtio år sedan.
- LHC levererade sin första stora upptäckt bara ett par år efter de första kollisionerna.
  - Mer än tjugo års förberedelser ligger dock bakom.
  - En triumf för grundforskning och internationellt samarbete.



Fabiola Gianotti och Peter Higgs



- Kungliga vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2013 till Francois Englert och Peter W. Higgs

*“för den teoretiska upptäckten av en mekanism som bidrar till förståelsen av massans ursprung hos subatomära partiklar, och som nyligen, genom upptäckten av den förutsagda fundamentala partikeln, bekräftats av ATLAS- och CMS-experimenten vid CERNs accelerator LHC”.*

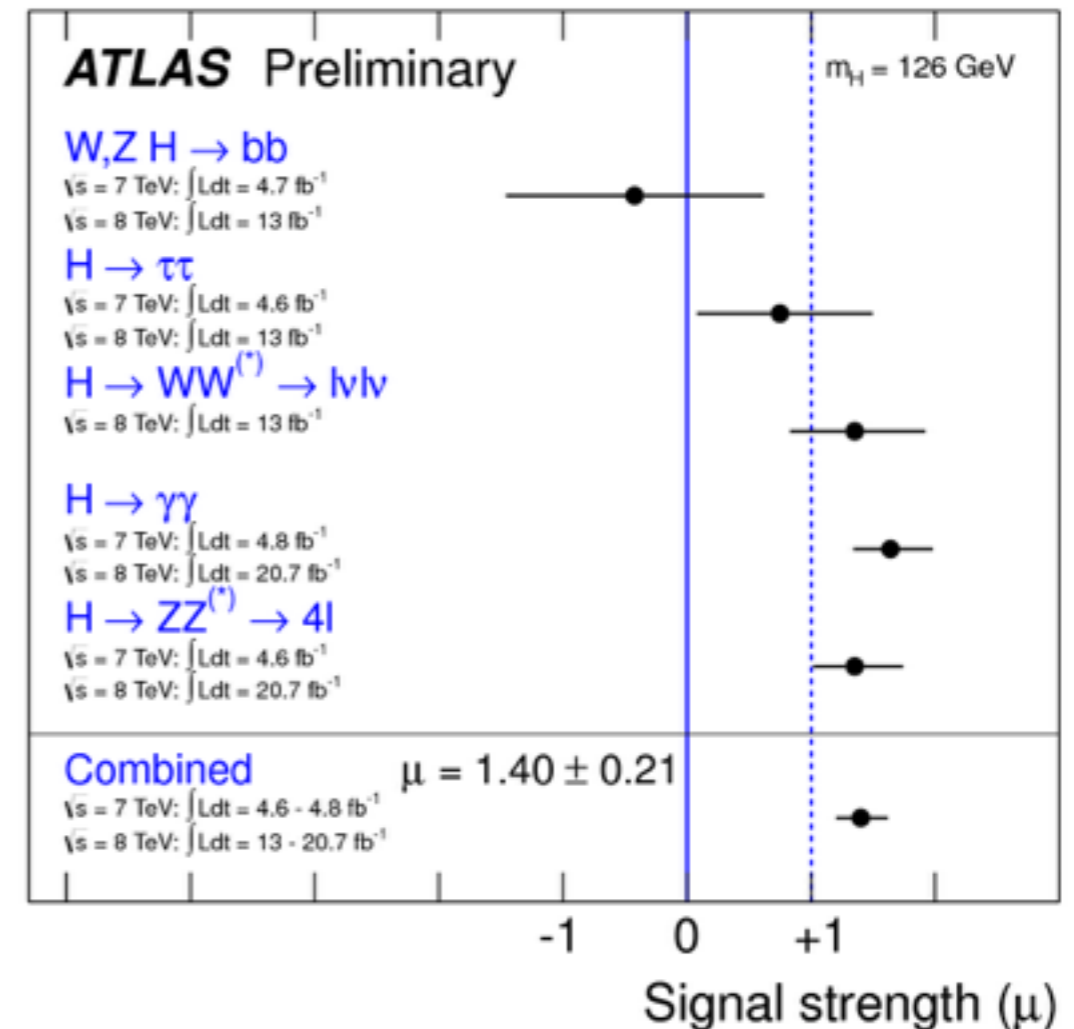
- Higgspartikelns upptäckt bekräftar:
  - Att vi vet hur elementarpartiklarna erhåller massa.
  - Att två av de fyra krafterna i universum i själva verket är en kraft.
  - Att vi förstår hur man bygger teorier som beskriver naturen.



**Vad har hänt sedan dess?**

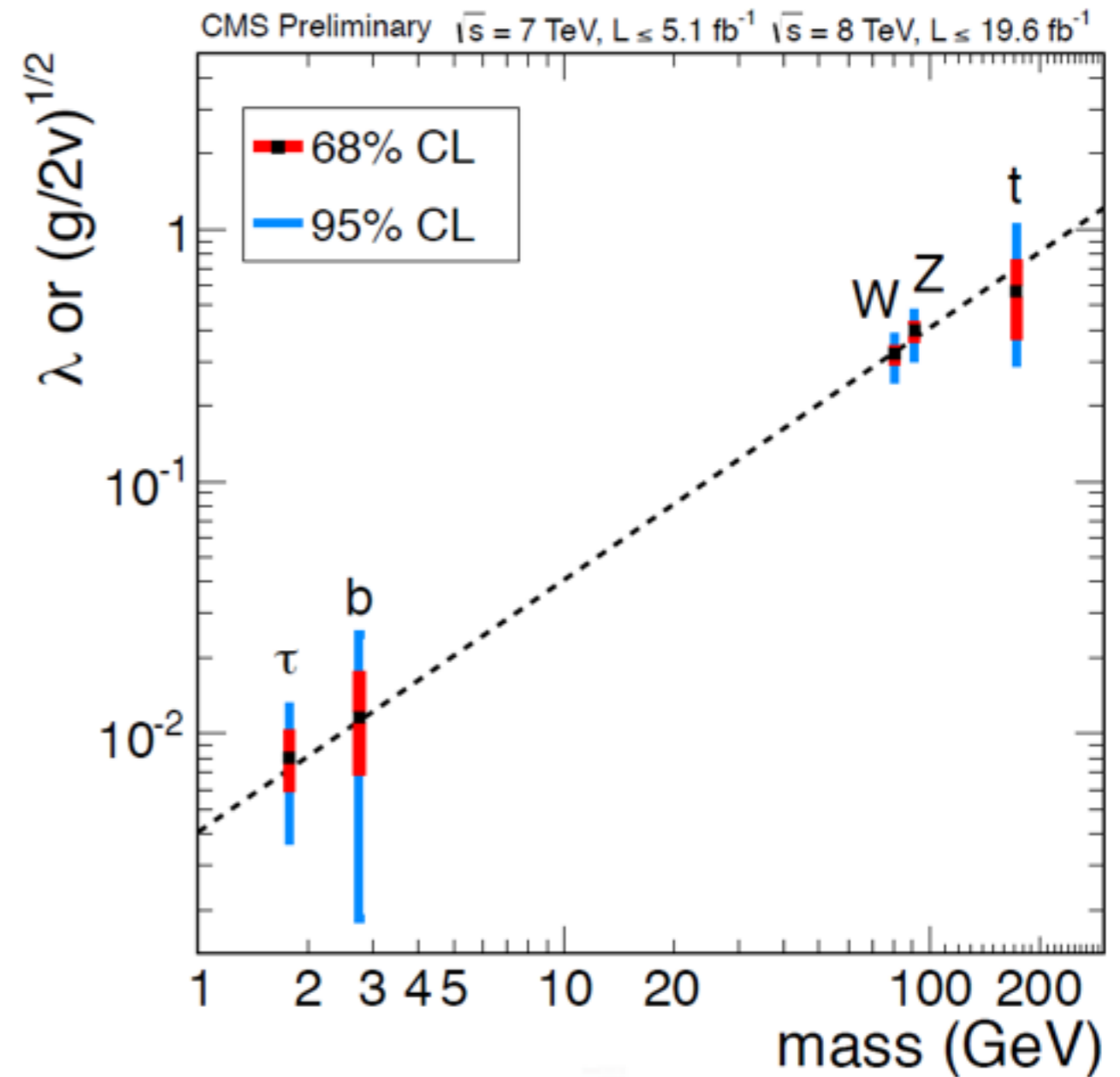
- Det har nu gått nästan tre år sedan vi upptäckte Higgspartikeln.
  - Fast ingen ny data sedan slutet 2012.
- Med upptäckten av Higgspartikeln är standardmodellen komplett, vid de energier vi hittills har undersökt vid våra acceleratorer.
  - Samtidigt vet vi att standardmodellen inte kan beskriva allt vi ser.
- En upptäckt av en ny partikel är bara början på en ny resa.
  - Som att hitta en ny kontinent, nu vill man utforska den!
- Vad har vi ägnat oss åt sedan upptäckten?
  - Är den partikel vi hittade exakt den Peter Higgs et al. förutsade?
  - Har den några avvikande egenskaper, som kan vara de första tecknen på ny fysik?
  - Precisionsmätningar av Higgspartikeln kan säga oss något om det finns fler andra partiklar kvar att upptäcka.

- Enligt teorin är Higgspartikelns sönderfallsmöjligheter helt bestämda om man vet dess massa.
- Nu har vi mätt massan med bättre än 1% precision.
- Stämmer andelen sönderfall av en viss typ med det förväntade?
- Mäter det vi kallar signalstyrka.
  - En signalstyrka = 1 betyder att ett visst sönderfall sker precis så ofta som man förväntar sig.
  - En signalstyrka = 0 betyder att ett visst sönderfall inte sker alls.
  - Ser signalstyrkor som är kompatibla med ett i data.





- Hur starkt Higgspartikeln kopplar till andra partiklar avgörs av partiklarnas massa.
- Det är en helt unik egenskap hos Higgspartikeln.
- Vi ser att kopplingen mellan Higgspartikeln och andra partiklar är proportionell mot deras massor - precis som förväntat.



- Den fjärde juli 2012 gick experimenten ATLAS och CMS vid CERN ut och berättade att man slutligen hittat Higgspartikeln.
  - Slutet på ett 50 års långt sökande efter denna partikel.
  - Bekräftar Higgsmekanismen som den som ger massa till partiklar.
  - En av de största upptäckterna i fysikens historia.
- Sedan dess - mätt Higgspartikelns egenskaper.
  - Minsta avvikelser från vad teorin förutsäger är en indikation på ny fysik bortom standardmodellen.
- Än så länge stämmer alla mätningar med våra förutsägelser.
- I maj börjar vi ta data igen, vid nästan dubbla kollisionens energin.
  - Ger en chans att upptäcka helt nya saker.

Fortfarande många spännande resultat att vänta från LHC!