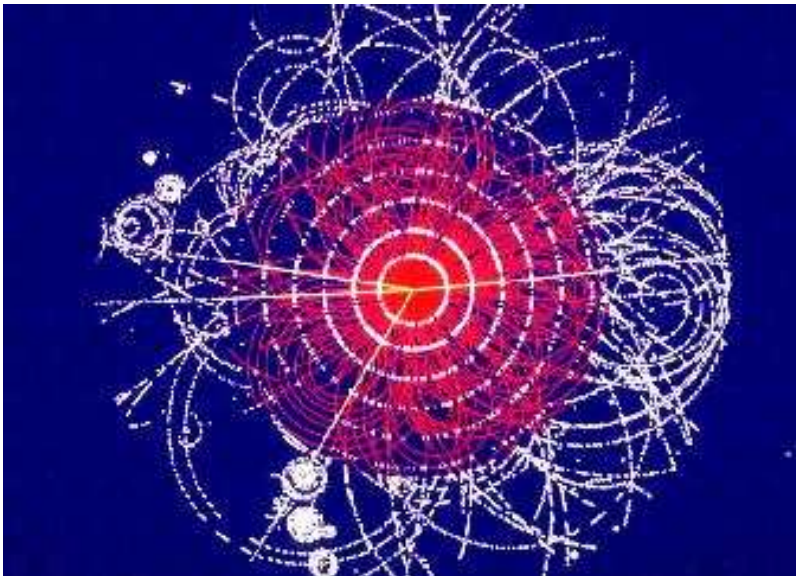


Upptäckten av Higgspartikeln



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

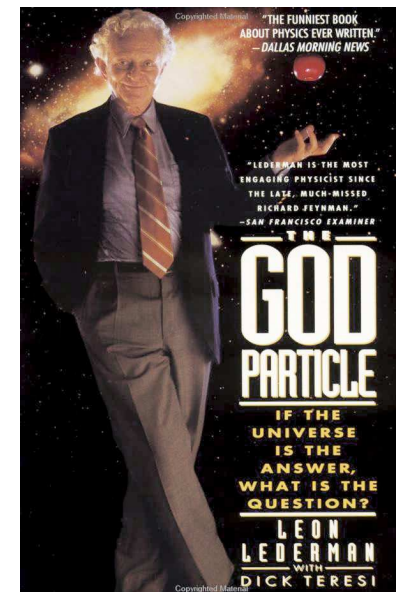
1. Introduktion

- 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 Nobelpriset i fysik förra året.
- Higgspartikeln har till och med fått vara med som fråga i På spåret!
 - Fredrik Lindström berättar att Peter Higgs kände på sig, “så där som man gör”, att det fattas en partikel i universum. 😊
 - Och vilken “Lassie-historia” det är att det hittas nästan 50 år senare. 😊
 - Så hur kan något sådant ske?



Introduktion

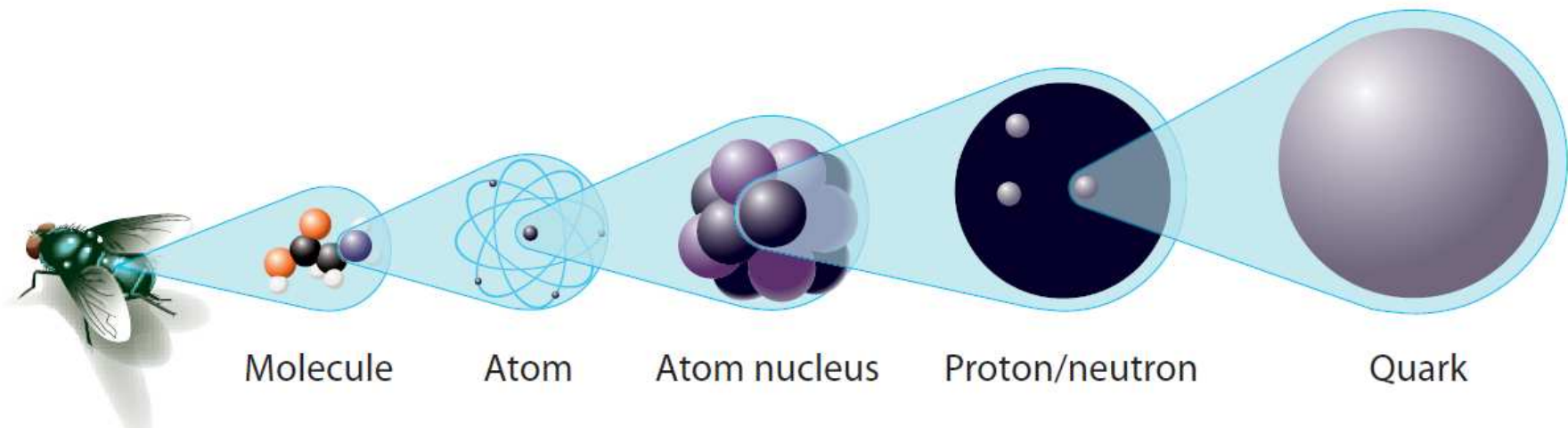
- Higgspartikelns eventuella existens har varit den kanske viktigaste frågan i partikelfysik de senaste 40 åren.
 - Den främsta anledningen till att den stora hadronkollideraren LHC vid CERN byggdes.
- I detta föredrag ska vi titta lite på hur Higgspartikeln och dess upptäckt kan förstås:
 - Hur kan 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?



2. Standardmodellen för partikelfysik

Partikelfysik - vad är det?

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



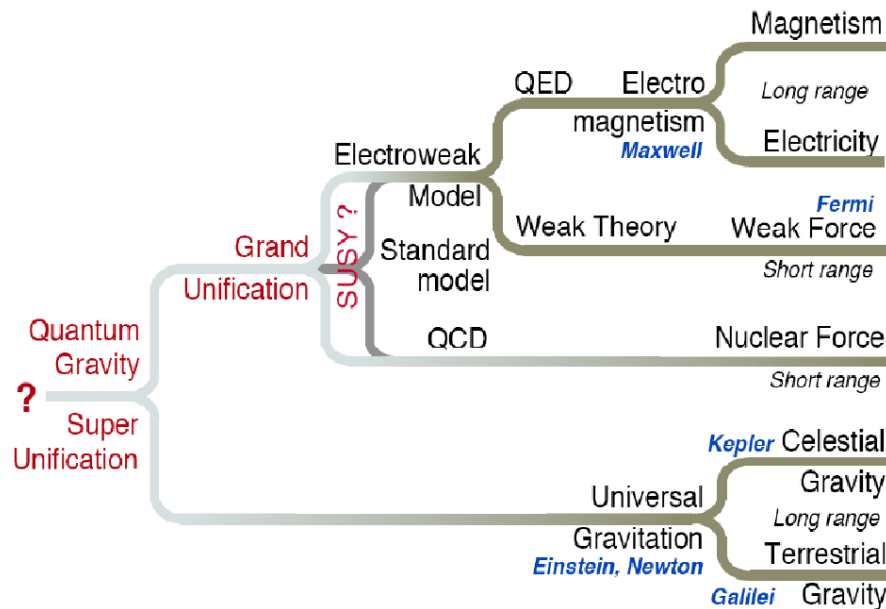
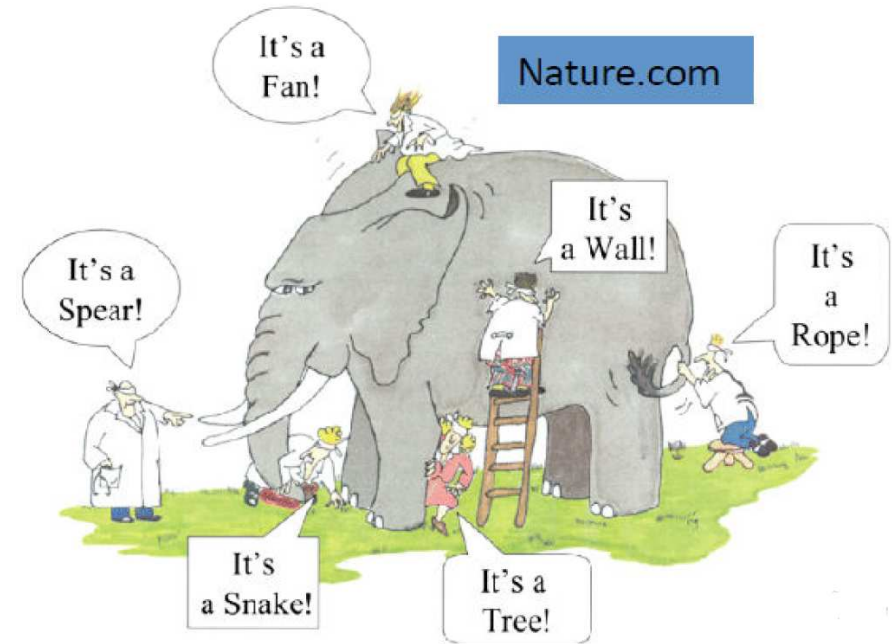
- En så kallad elementarpartikel är en odelbar partikel.
 - Men den kan vara instabil och sönderfalla till andra elementarpartiklar.
- Partiklar vi tror är elementära är kvarkar (bygger upp protoner och neutroner) och leptoner (t.ex. elektronen).

Krafterna - sociala etikettsregler för partiklar

- Man kan säga att krafterna bestämmer vilket uppförande som är tillåtet när partiklar träffas. De bestämmer hur allting rör sig (gravitationen t.ex) och vad händer om partikel A och B möts.
- 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 i radioaktiva sönderfall.
 - Den elektromagnetiska kraften: Verkar mellan alla partiklar med 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 elementarpartiklar.

Förenandet av krafterna i universum

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



- Partikelfysikens heliga graal är att lyckas förena de fyra krafterna.
 - Kraften vid universums början.
 - Den elektro-svaga föreningen sker vid "låg" energi (10^{15} °C).

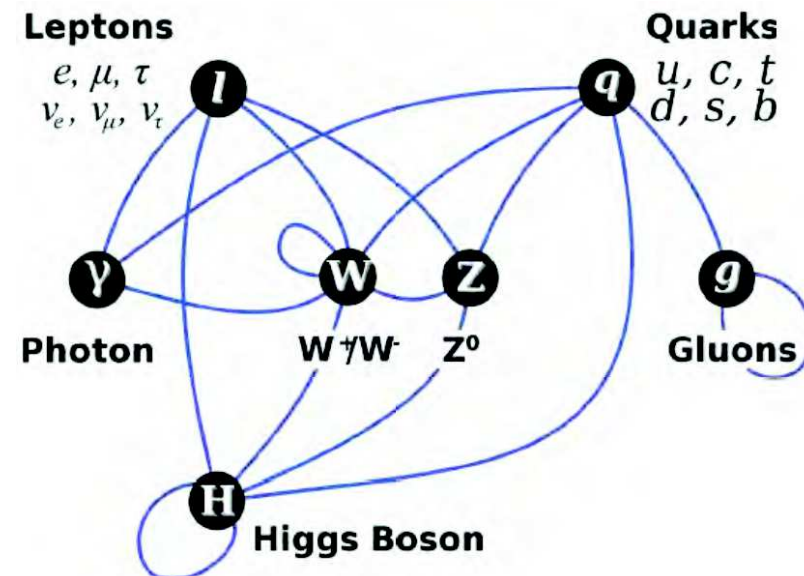
Standardmodellen för partikelfysik

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

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	42 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
Leptons	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)



3. Higgspartikeln och Higgsmekanismen

En Ny Teori

- 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 (som bygger upp protonen och neutronen).
 - Kunde beskriva den elektromagnetiska och den svaga kraften.
- Det fanns emellertid ett stort problem, om elementarpartiklarna hade någon massa blev resultaten 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 elementarpartiklarna erhålla massa utan att teorin gav nonsens.

Förutsägelser av Higgspartikeln

- En av fysikerna som postulerade det nya fältet var Peter Higgs.
 - Peter Higgs gick ett steg längre än de övriga och visade att en konsekvens av det nya fältet var 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 skulle ha.
 - Det enda teorin inte kunde säga var exakt vilken massa Higgspartikeln själv har, annars är allt bestämt.
- Higgsmekanismen bevisade också att den elektromagnetiska och den svaga kraften bara var två sidor av en och samma kraft.

Lite om fält och partiklar

- 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. Detta är vad elementarpartiklarna är.
 - 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.



Hur partiklar erhåller massa

- Med Higgspartikeln kommer alltså existensen av ett fält, Higgsfältet, som genomsyrar hela universum.
- När partiklar 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.



- Higgspartikeln själv är en störning i Higgsfältet.



Ett rykte sprids på partyt. Det bildas klungor runt ryktet. *Fältet blir exiterat.*

- Så om man visar att Higgspartikeln finns har man också visat att Higgsfältet finns.

4. LHC och ATLAS

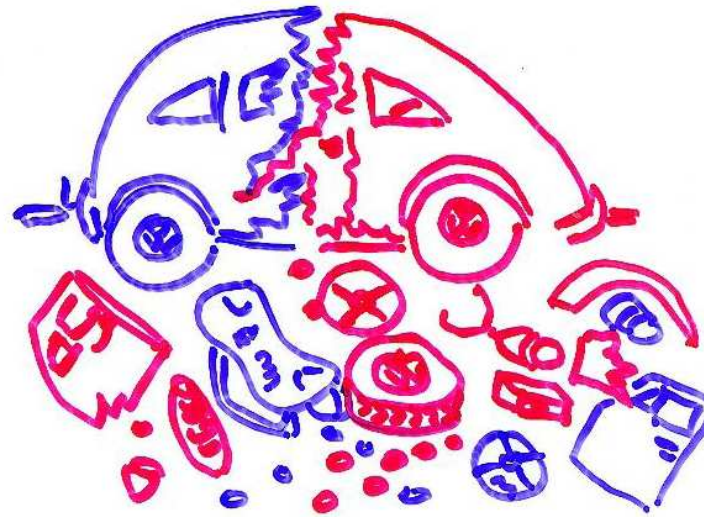
Att observera Higgspartikeln

- 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 miljarddels-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.

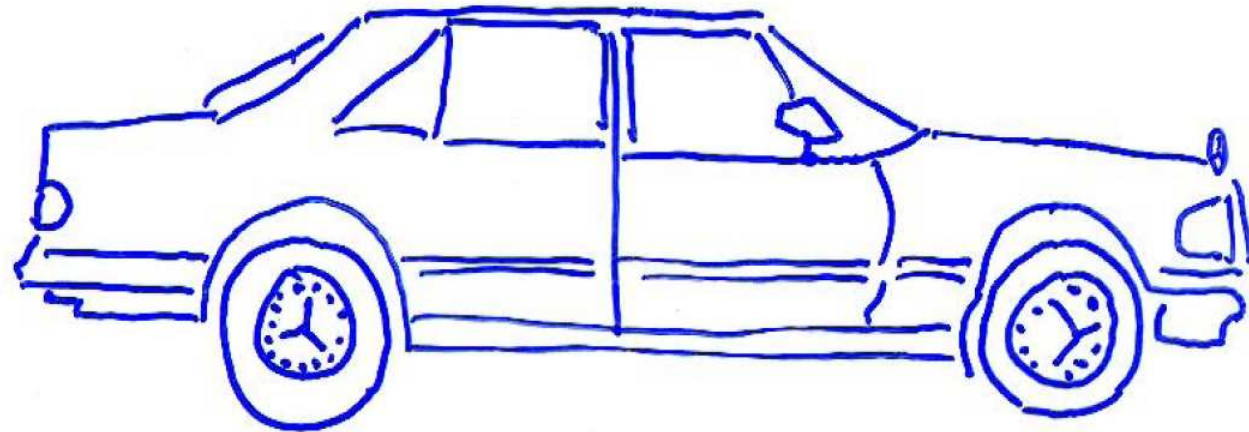
Användbarheten av $E = mc^2$



Ta två helt vanliga protoner ...



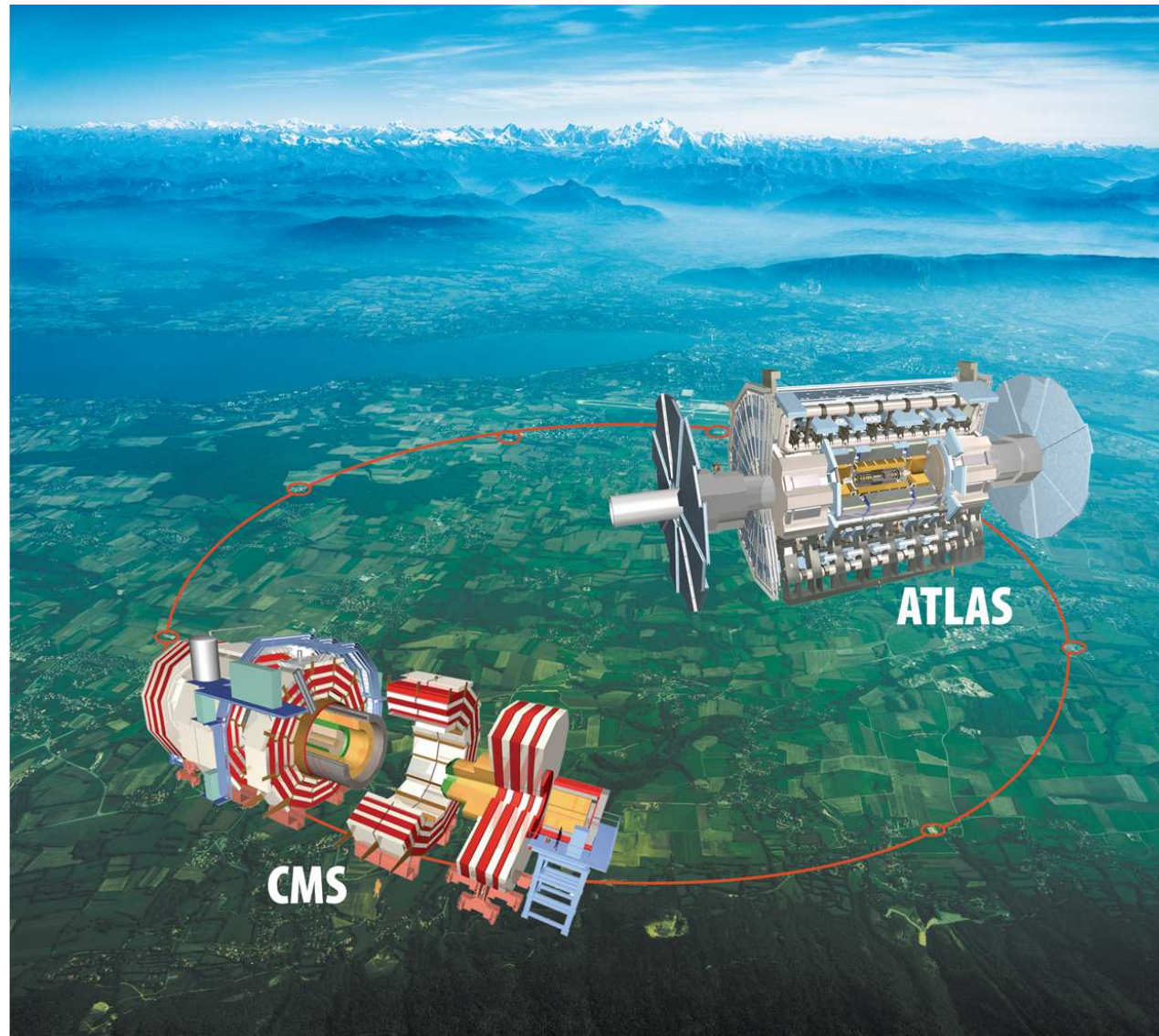
... och kollidera dem vid enormt höga energier ...



Claus Grupen

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

Acceleratorn och detektorerna



LHC - En proton-proton kolliderare

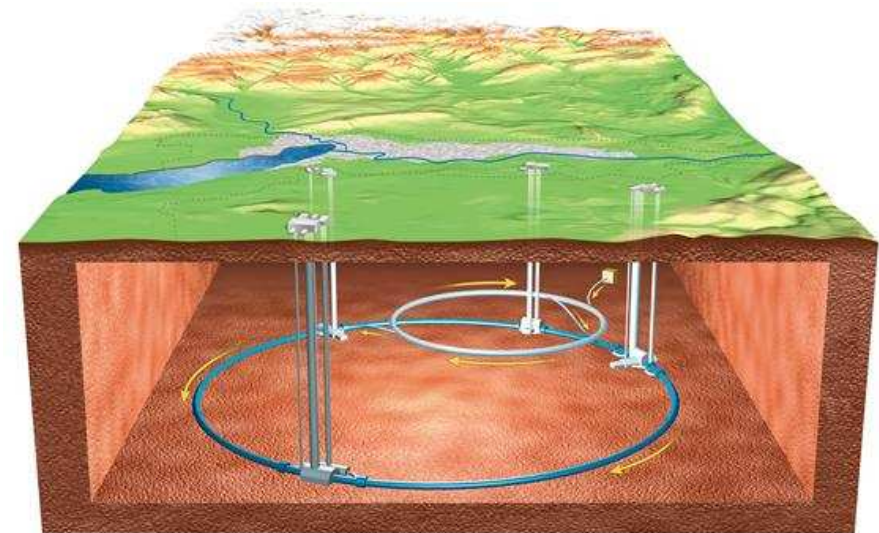
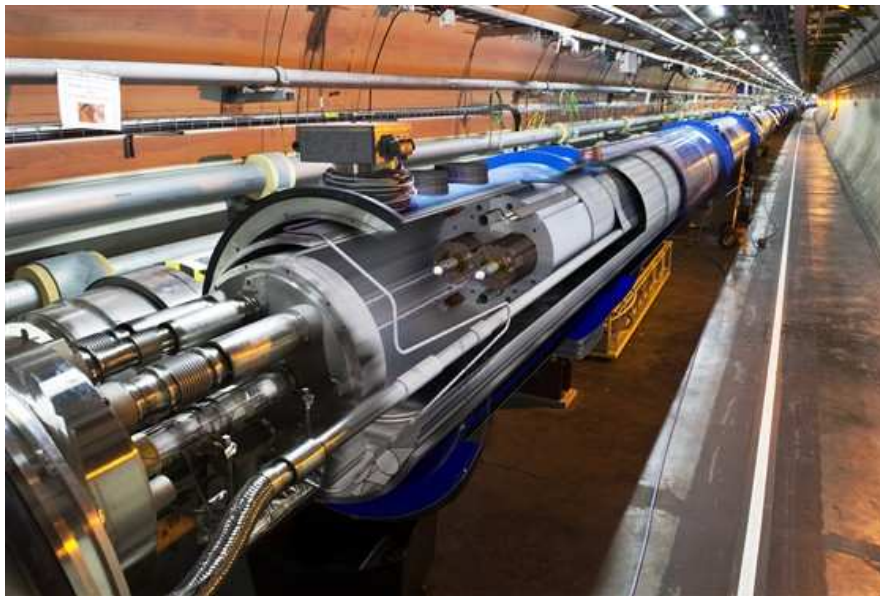
- LHC är designad för att kollidera protoner nära ljusets hastighet.
 - Sju gånger högre energi än sin föregångare i USA.
 - LHC har hittills kört vid halv maxenergi.
 - Nu nedstängd till 2015 för att dubbla kollisionsenergin.
- Förutom den höga energin spelar det roll hur många kollisioner man får.
 - Ju fler kollisioner desto större chans att hitta något som är väldigt ovanligt.
- Det finns fyra experiment som registrerar kollisionerna vid LHC.
 - ATLAS, CMS, Alice och LHCb.



Alla protoner som behövs för hela LHC:s livstid.

LHC-acceleratorn

- Belägen 100 m under jord och är 27 km i omkrets.
- De mest intrikata delarna är dipolmagneterna.
 - Ett magnetiskt fält på 8,4 T skapas av en ström på 11 700 A.



- Använder 10 080 ton flytande N för att kyla magneterna till 80 K.
 - Ytterligare 60 ton flytande He för att kyla dem till 1,9 K.
- Kolliderar protoner som färdas vid $0,999999c$ var 50 ns.

Byggandet av LHC

- En av de 1232 dipolmagneterna.



ATLAS Detektorn - Ett Flaskskepp

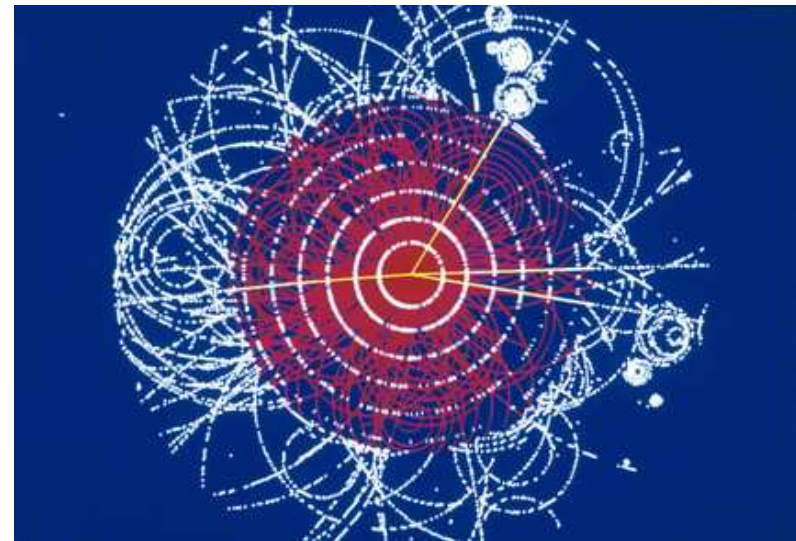


Berg-rummet (flaskan) är stort nog att rymma hela Notre Dame.

5. Upptäckten av Higgspartikeln

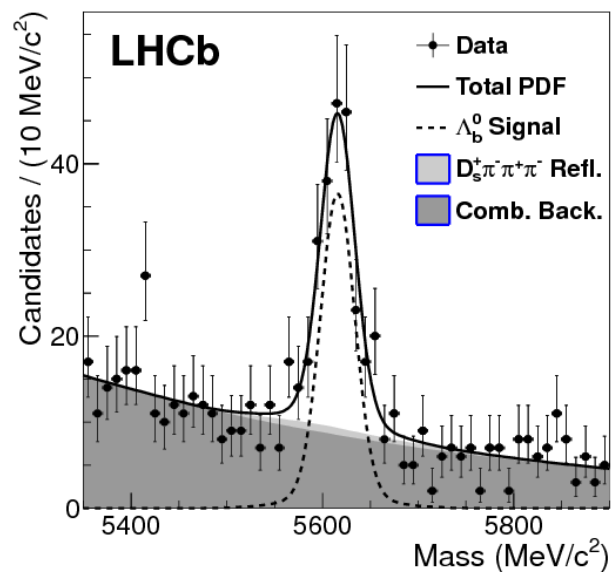
Hur Higgspartikeln ser ut i detektorn

- 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.
- Partikelfysik är som en deckare, genom att studera spåren på brottsplatsen kan man sluta sig till vad som verkligen hände.



Signal och bakgrund

- Förutom Higgspartikeln finns andra, redan kända, fysikprocesser som också resulterar i fyra elektroner eller två fotoner.
 - Sådana processer kallas bakgrundsprocesser.
- Genom att mäta energin hos sönderfallsprodukterna kan man sluta sig till vilken massa moder-partikeln (om sådan finns) hade.



- Signelhändelserna kommer alla att samlas runt en massa.
- Bakgrundshändelserna kommer att vara utspridda överallt.
 - Genom att hitta en topp ovanpå den kontinuerliga bakgrunden kan man identifiera en ny partikel.

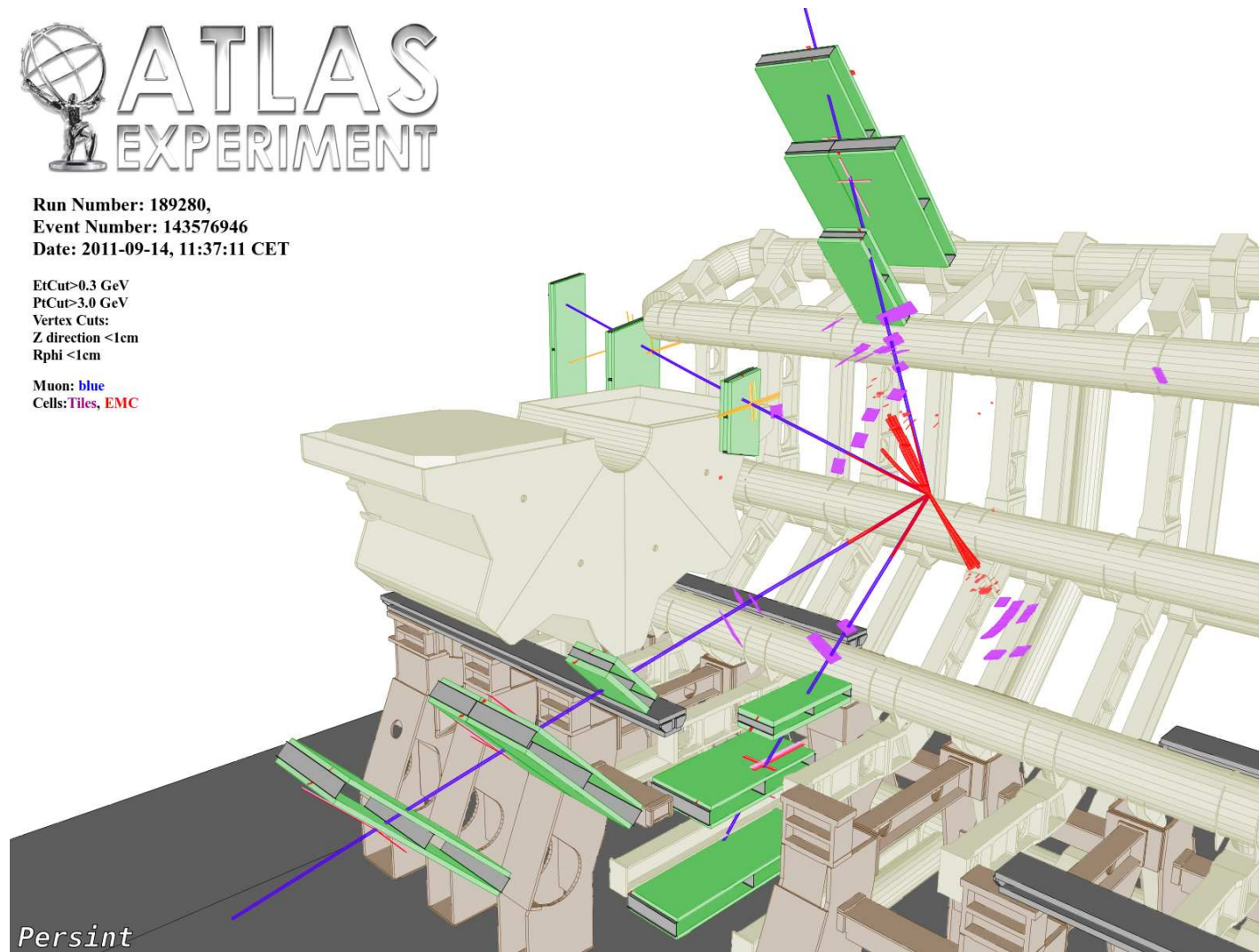
En riktig kollision från ATLAS



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



Presskonferens den fjärde juli 2012

- 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 (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 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

En världsnvyhet



Upptäckstens betydelse

Kungl. 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 CERN:s 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.



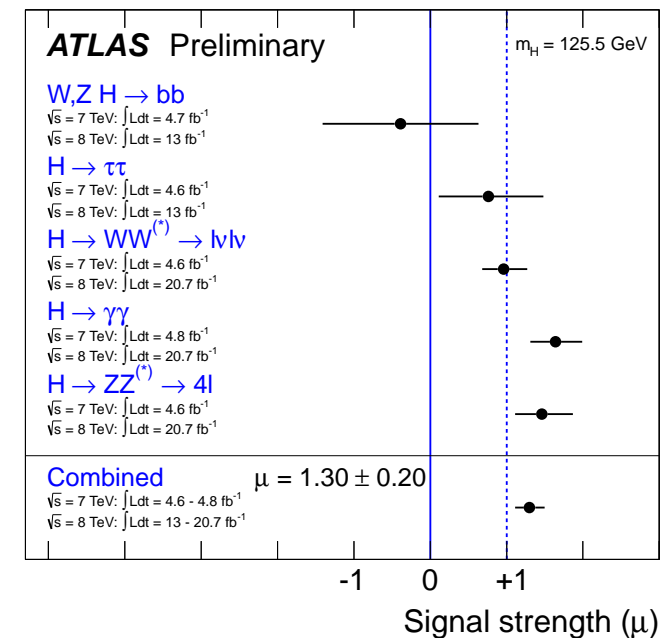
6. Vad har hänt sedan dess?

Efter upptäckten

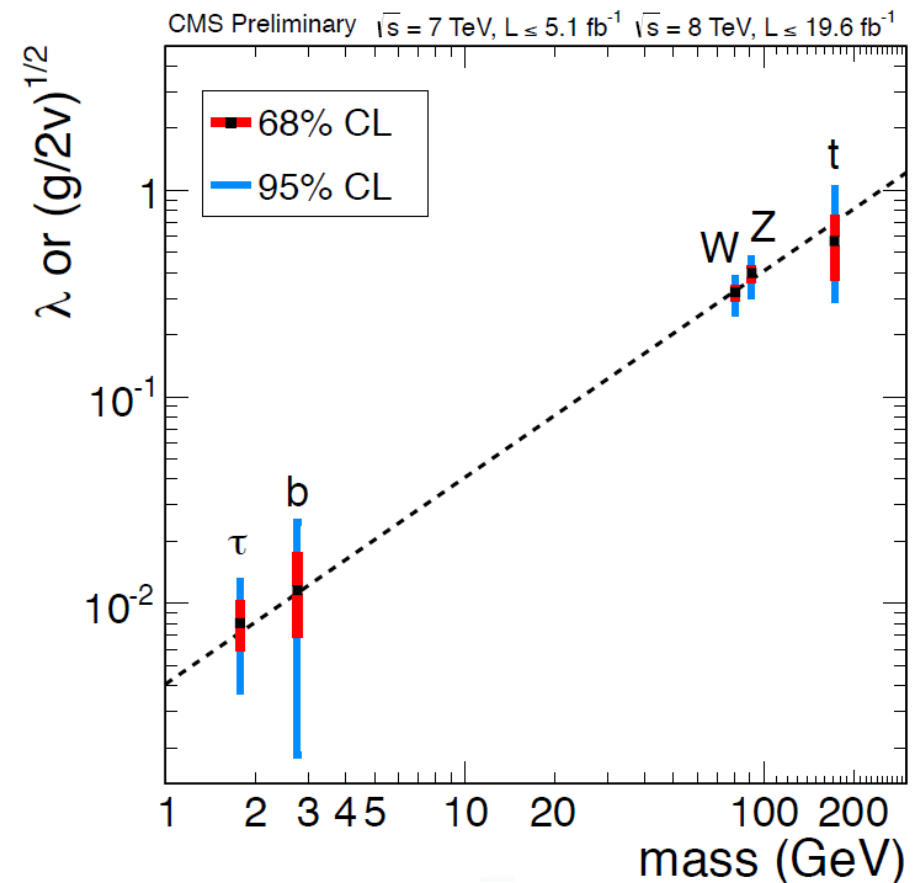
- Det är nu ett och ett halvt år sedan vi upptäckte Higgspartikeln.
- Med upptäckten av Higgspartikeln är Standardmodellen komplett, vid de energier som vi har undersökt i våra experiment.
- Vad har vi ägnat oss åt sedan dess?
 - Är den partikel vi upptäckt verkligen den Higgspartikel som Peter Higgs och hans kollegor förutsade?
 - Har den nya partikeln exakt dom egenskaper som teorin förutsäger? I stora drag vet vi att den har det, men även små avvikelser är indikationer på ny fysik.
 - Kanske kan precisionsmätningar av Higgspartikeln säga oss om det finns andra partiklar kvar att upptäcka.

Higgspartikelns sönderfall

- 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 händer precis så ofta som man förväntar sig.
 - En signalstyrka = 0 betyder att ett visst sönderfall inte händer alls.
 - Ser signalstyrkor kompatibla med ett i våra data.



- Hur starkt Higgspartikeln kopplar till andra partiklar avgörs av partiklarnas massor.
- 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.

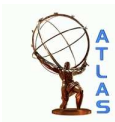


Sammanfattning

- Den fjärde juli 2012 gick experimenten ATLAS och CMS vid CERN ut och berättade att man slutligen hittat Higgspartikeln.
 - Slutet på ett 50 år långt sökande efter denna partikel.
 - Bekräftar att Higgsmekanismen är den korrekta beskrivningen.
 - En av de största upptäckterna i fysikens historia.
- Sedan dess - mätt Higgspartikelns egenskaper.
 - Minsta avvikelse från vad teorin förutsäger är en indikation på att det finns mer ny fysik att upptäcka.
- Än så länge stämmer alla mätningar med våra förutsägelser.
- År 2015 börjar vi ta data vid dubbla kollisionsenergin.



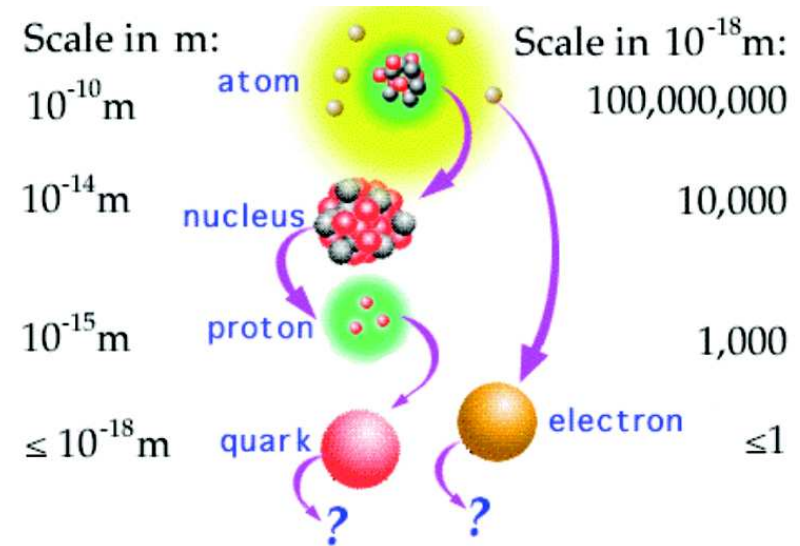
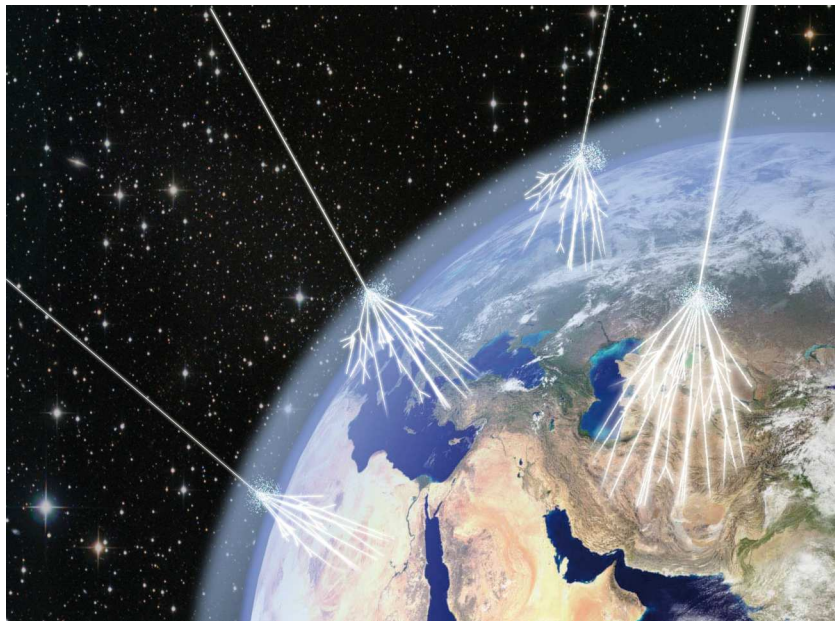
Fortfarande många spännande resultat att vänta från LHC!



Backup

Partikelfysikens historia

- Startade med upptäckten av elektronen år 1897.
- Inom några år upptäcktes flera "elementarpartiklar".
 - $p, n, e^+, \mu, \pi, K \dots$



- Partikelacceleratorer byggdes för att kunna studera partiklarna under kontrollerade former.
 - Dessa partiklar skapas bara vid väldigt höga energier och existerar bara en bråkdel av en sekund.

Sökandet efter materiens minsta beståndsdelar



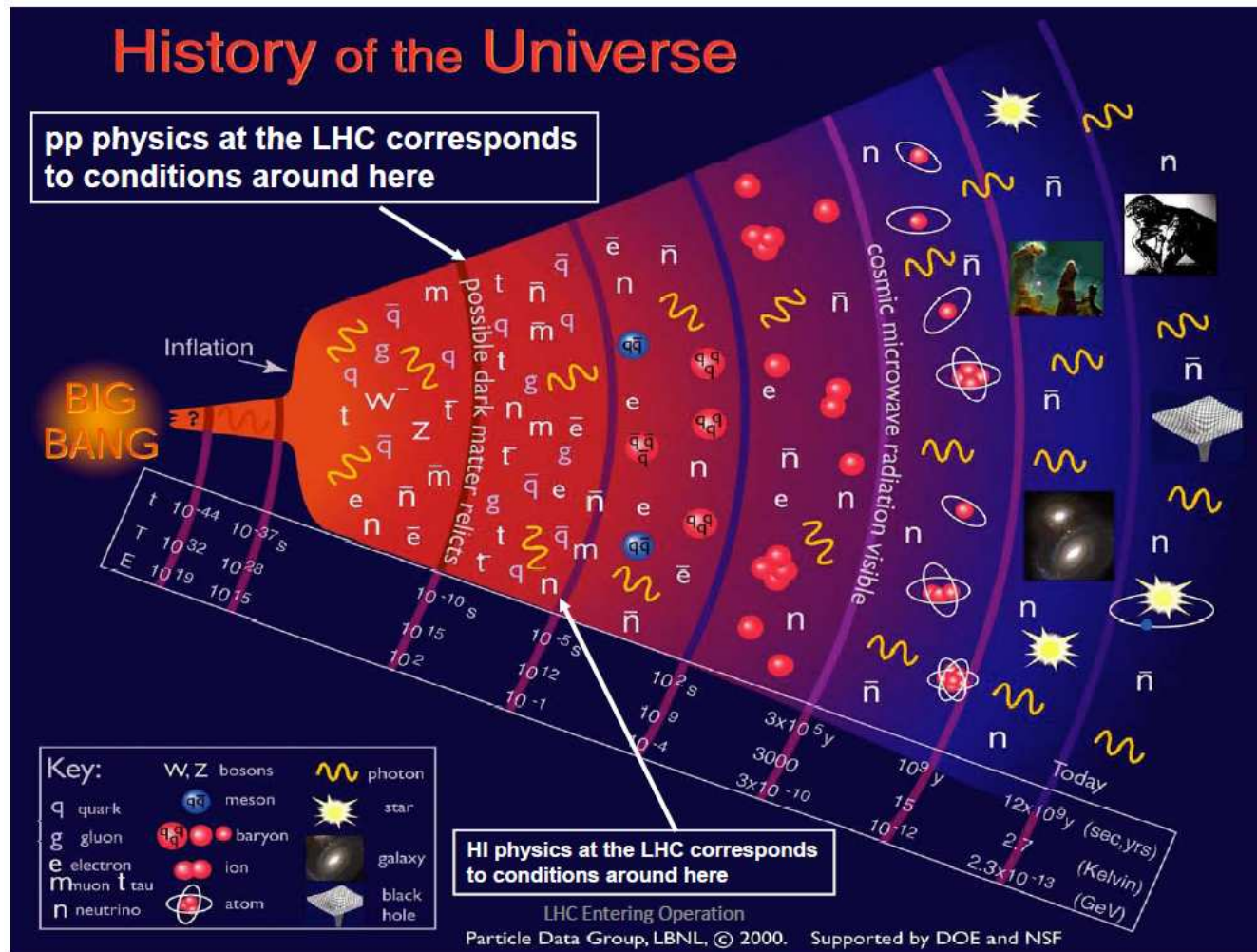
Massa och Energi

- Energin i universum är konstant och kan aldrig skapas eller förintas. Däremot kan energin överföras eller ändra skepnad.
 - Möjligtvis med ett undantag kopplat till universums expansion.
- Massa (hos en partikel till exempel) är också en form av energi.
- Detta insågs först av Einstein, som också hittade formeln som relaterar en viss massa med den motsvarande energin:

$$E = mc^2$$

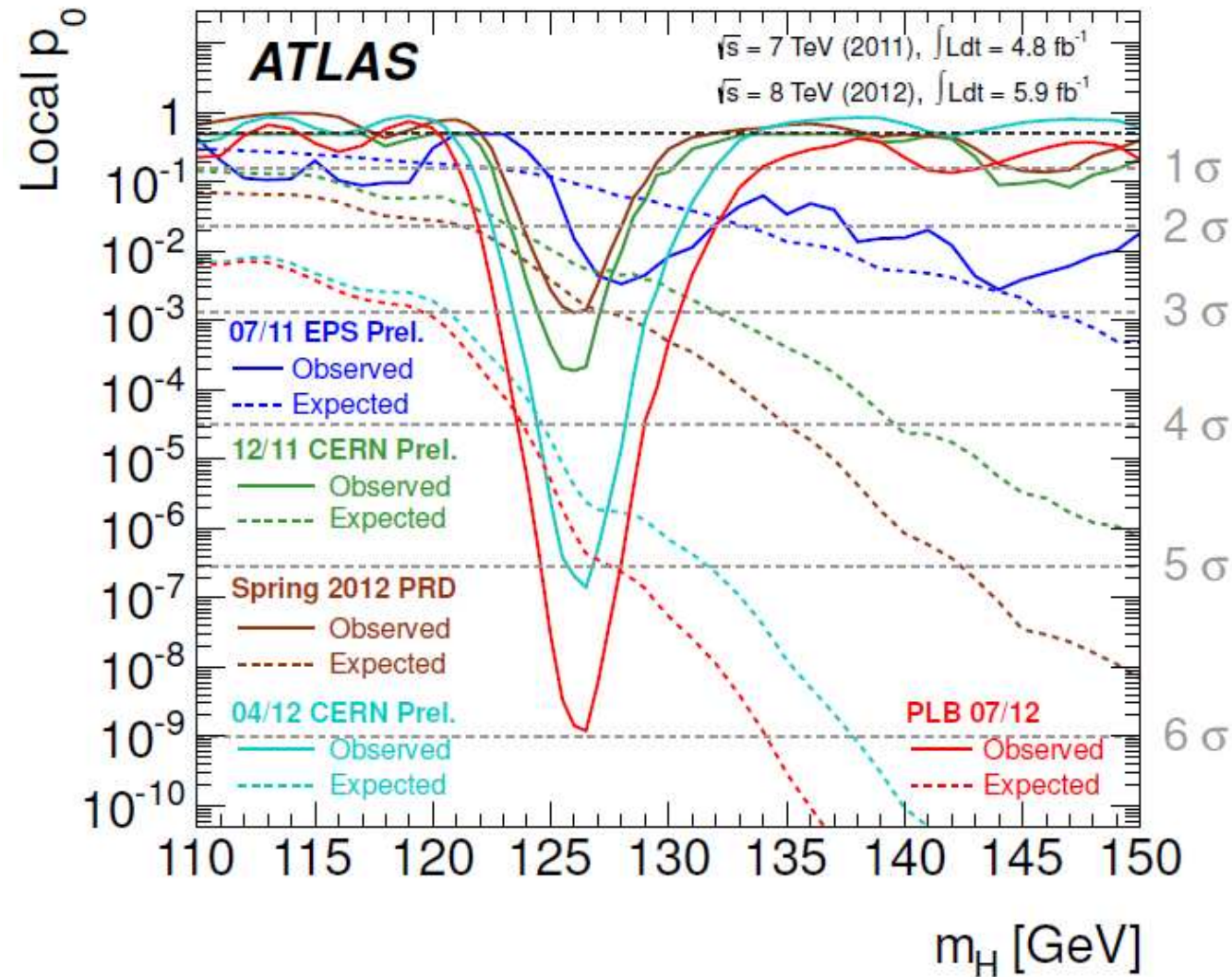
- En tung partikel kan sönderfalla till lättare partiklar och mellanskillnaden i massa omvandlas då till rörelseenergi.
- Om man har tillgång till energi (som kan omvandlas till massa), kan man skapa en tung och instabil partikel ur intet.

LHC återskapar universums begynnelse



Energikoncentrationen är densamma som när universum var väldigt litet.

Bevisvärdet för Higgspartikeln med tiden



Higgspartikelns spin

- I klassisk fysik finns något som heter rörelsemängdsmoment, L :

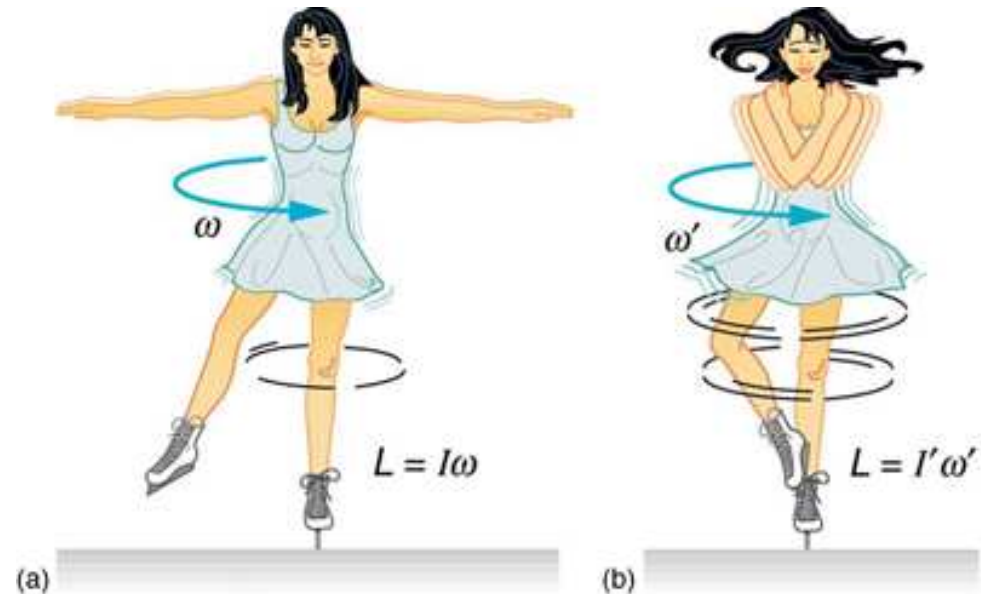
$$L = I\omega \quad I = \text{tröghetsmoment}, \omega = \text{vinkelhastighet}$$

- Tröghetsmomentet, I , talar om hur "trögt" det är att snurra.

- Litet tröghetsmoment
→ snurrar lätt.

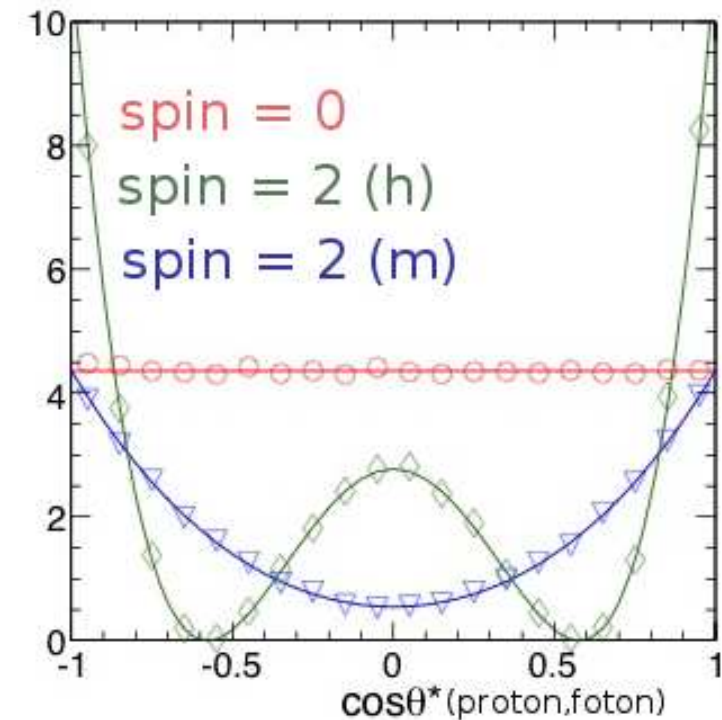
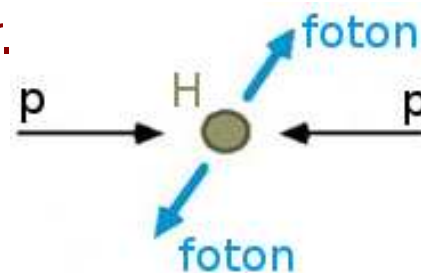
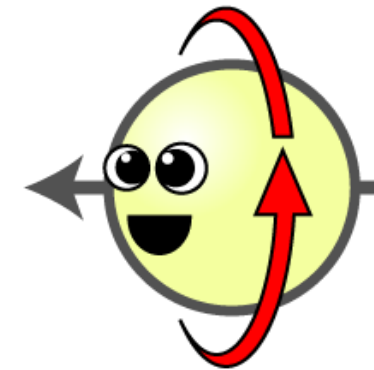
- Stort tröghetsmoment
→ jobbigt att snurra.

- Analogt med massa
(tungta saker jobbiga
att ändra farten på).

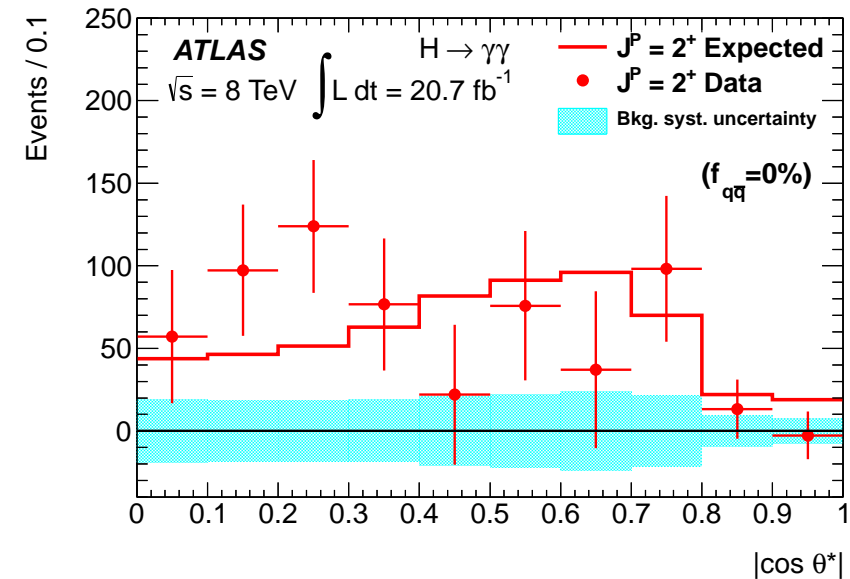
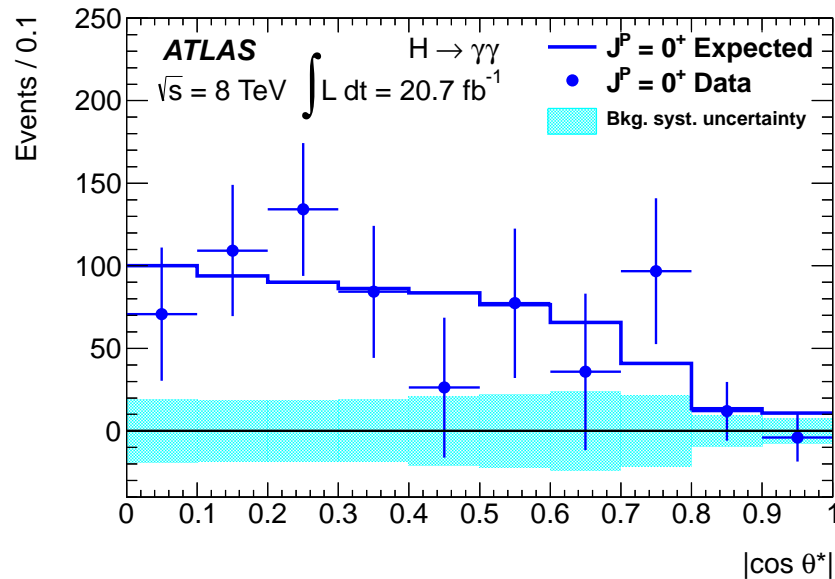


- Vinkelhastigheten, ω , talar om hur snabbt något snurrar.
- Utan extern kraft är rörelsemängdsmomentet bevarat (konstant).

- Elementarpartiklar har ett sorts rörelsemängdsmoment även om de inte snurrar!
- Kallas spin och är en inneboende egenskap hos en partikel.
- Higgspartikeln är den enda partikel vi känner till som inte har något spin.
- Viktigt att bevisa att den partikel vi upptäckt saknar spin.
- Det kan vi göra genom att titta på vinklarna mellan Higgspartikelns sönderfallsprodukter.



- Titta på vinklarna i våra data.



- Data stämmer bättre överens med spin-0- än spin-2-scenariot.
- Mer precist: bara en chans på 150 att vårt data skulle se ut som det gjorde om den partikel vi hittat hade spin 2.
- Men för att vara helt säkert kräver vi en chans på tre miljoner.

Betydelsen för den teoretiska fysiken

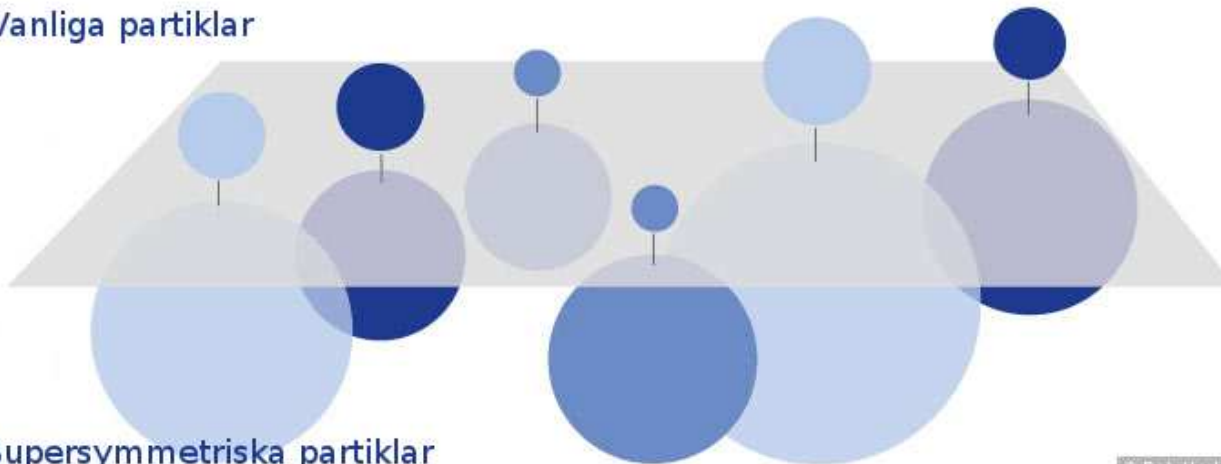
- Även för den teoretiska fysiken har Higgspartikelns upptäckt en enorm betydelse.
 - En mängd teorier som gav alternativa förklaringar till Higgsmekanismen kan nu sällas bort.
 - Desto mer vi lär oss om Higgspartikeln desto mer underlag har vi för teorier om vad som kommer härnäst.
- Det finns flera fenomen inom fysiken där vi ännu inte vet förklaringen.
 - Vad är den mörka materian i universum?
 - Kan vi lyckas förena fler av de fundamentala krafterna?



Kan det finnas fler Higgspartiklar?

- En populär teori för att förklara universums mörka materia är supersymmetri. Spegelvärd av supersymmetriska partiklar.

Vanliga partiklar



Supersymmetriska partiklar

- I supersymmetriska teorier finns inte en Higgspartikel utan fem.
- Den lättaste av dem är mycket lik den som finns i Standardmodellen.
- Letar efter ytterligare Higgspartiklar i datan.

