

På jagt efter Higgs-bosonen

Af Stefania Xella, Niels Bohr Institutet

Higgs-bosonen er den eneste partikel forudsagt af partikelfysikkens Standardmodel, som ikke er blevet observeret eksperimentelt endnu. Det er essentielt at afgøre, hvorvidt den findes eller ej. At finde Higgs-bosonen er derfor et af de vigtigste mål for eksperimenterne ATLAS og CMS ved Large Hadron Collider (LHC) ved CERN nær Geneve.

Partikelfysikerne tror, at Universet kan beskrives ud fra dets mindste bestanddele. Når vi ved, hvilke typer af fundamentale partikler der findes, og hvilke fundamentale kræfter de kan føle, så kan vi bygge en teori, der giver os mulighed for at forstå udviklingen af Universet, fra inflationen til planetdannelse.

Standardmodellen er i virkeligheden kun det første kapitel i bogen om teorien om alting, da det giver os mulighed for at forklare fænomener i den verden, vi observerer hver dag. Men den verden udgør kun 5 % af Universet, den del vi kan iagttage gennem elektromagnetisk stråling. Standardmodellen fortæller os intet om det mørke stof, eller hvorfor Universet udvider sig som det gør. Så bogen er langt fra færdig. Ikke desto mindre er det første kapitel nok den vigtigste del af en bog, da det giver os mulighed for at beslutte, om vi skal fortsætte med at læse eller gå videre til en anden. På samme måde, hvis Standardmodellen er korrekt helt til den sidste forudsigelse, nemlig Higgs-bosonen¹, så er vores tilgang til forståelsen af naturen formentlig korrekt, og vi er overbeviste om, at vi er på rette vej.

Hvilken rolle spiller Higgs-bosonen i Standardmodellen?

Higgs-bosonens eksistens besvarer spørgsmålet om, hvordan fundamentale partikler som elektroner får deres masse eller vægt. Da alle kræfter er båret af fundamentale partikler, og forskellige kraftpartikler har forskellige masser (f.eks. er fotoner masseløse, og W-bosoner er ikke), så bruger vi også Higgs-bosonen til at forklare, hvorfor fundamentale kræfter er forskellige.

I de tidligste stadier af sit liv er Universet som en dråbe fyldt med ekstremt energirige partikler, som bevæger sig med lysets hastighed, og de er derfor masseløse. Universet udvider sig og bliver derved koldere og koldere. På tidspunktet $t = 0,0000001$ sekund efter Big Bang, sker en speciel faseovergang pludseligt. Et af de felter Universet er fyldt med kondenserer, på samme måde som vand, der langsomt afkøles og omdannes til is. Feltet kaldes Higgs-feltet, fra navnet på den teoretiske fysiker, som først forudsagde dets eksistens. Tilknyttet Higgs-feltet er også en partikel, Higgs-bosonen.

Denne faseovergang af Higgs-feltet har en interessant effekt på de forskellige partikler. Nogle partikler,

såsom fotonen, går gennem Higgs-feltet som om intet var sket. Nogle andre, som W-bosonen eller top-kvarken, bremses væsentligt eller holder næsten op med at bevæge sig. Bevægelsesenergien af en partikel omdannes til en ny, kondenseret form for energi, som vi kalder masse, jo mere partiklen vekselvirker med Higgs-feltet. Som vi ved fra Einstein, kan energien omdannes til masse og vice versa. Higgs-feltet bevirker, at forskellige partikler deler disse to forskellige former for energi på forskellige måder.

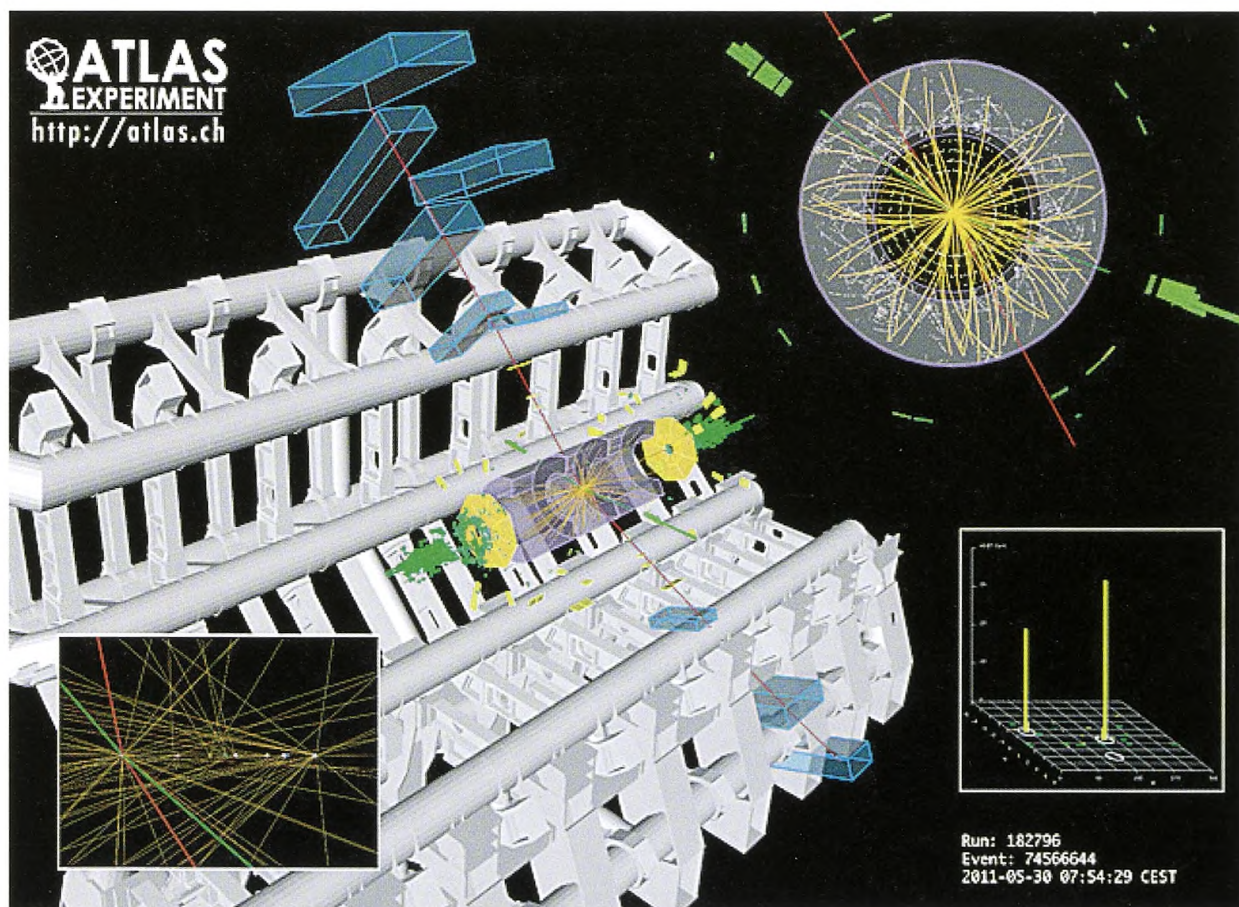
Hvis vi finder Higgs-boson ved LHC, så kan vi påstå, at vi forstår, hvad betydningen er af massen af en fundamental partikel, og desuden forstår vi, hvorfor de svage og elektromagnetiske kræfter er forskellige. Det er endnu et skridt i retning af en teori om alting. Endvidere kan Higgs-bosonen blive det første bevis for, at partikler med spin 0 spiller en vigtig rolle ved at beskrive grundlæggende fysik på mikroskopisk skala, og det kunne lede til en forklaring på andre uforklarede fænomener i astrofysik, nemlig inflation og mørk energi.

I det følgende vil jeg opsummere, hvor vi står i dag i søgningen efter Higgs-bosonen ved LHC. Jeg vil starte med en kort forklaring af, hvordan vi eksperimentister præsenterer vores resultater af Higgs-eftersøgningen. Vores sprog kan til tider være vanskeligt at forstå. Som yderligere læsning om Higgs-bosonen og Standardmodellen vil jeg henvise til en tidligere beskrivelse af dette emne [3]. Se desuden en video om hvordan masse kan forklares med Higgs-mekanismen [4].

Hvordan udelukker eller beviser man Higgs-bosonens eksistens?

I december 2011 blev LHC resultaterne på eftersøgningen af Higgs-bosonen for første gang vist offentligt på CERN. Denne begivenhed var i alle henseender en succes og en milepæl i moderne partikelfysik, med undtagelse af ét punkt: Det blev ikke forklaret tydeligt nok til offentligheden, hvad resultatet egentlig peger på. Blev Higgs-bosonen fundet? Eller ikke? Jeg vil nu forsøge at forklare, hvordan man skal fortolke de annoncerede resultater. Et eksempel på en begivenhed, som med stor sandsynlighed er en kandidat til Higgs-bosonen, ses i figur 1. Men som det vil fremgå, er én begivenhed ikke nok til at man kan påstå, at man har opdaget Higgs-bosonen.

¹I partikelfysikken opererer man med to typer partikler, der har forskelligt spin. De fundamentale *fermioner* (kvarker og leptoner) har halvtalligt spin og opbygger alt stof. Derudover findes der *bosoner* med heltalligt spin, som bl.a. beskriver de fundamentale vekselvirkninger på kvanteniveau. I denne sidste gruppe hører Higgs-bosonen desuden til.



Figur 1. Visualisering af en begivenhed, målt med ATLAS-eksperimentet ved Large Hadron Collider, hvor protoner er kollideret ved høj energi og med stor sandsynlighed har produceret en Higgs-boson. Denne Higgs-kandidat er henfaldet til fire partikler: En myon og en antimyon (røde linjer) og en elektron og en positron (deres energi er registreret i kalorimetre, vist som grønne søjler i diagrammet øverst til højre).

Det er først og fremmest vigtigt at bemærke, at partikelfysikere bruge det *statistiske* sprog til at udtale sig om naturen. Når vi har en vis mængde data og vi kender vores eksperimentelle usikkerheder, så udtrykker vi vores resultater i forhold til sandsynligheden for, at det vi ser er en opdagelse af et nyt fænomen. Ellers udtrykker vi om vi kan udelukke dette fænomen med 95 % sikkerhed.

Tag eksemplet med at finde Higgs-boson. Ved at udelukke dens eksistens med 95 % sikkerhed mener vi, at hvis vi laver 100 eksperimenter for at finde den, så kunne 5 af dem vise et resultat der viser at Higgs-boson eksisterer, mens de andre 95 eksperimenter viser at Higgs-bosonen ikke eksisterer. Vi definerer altså en sådan "grad af sandsynlighed" for at udelukke dens eksistens. Det er her vi trækker grænsen for at sige, hvorvidt en partikels eksistens er udelukket eller ej.

Man ser altid udsving i data, der kan ligne interessant fysik, især på et tidligt stadium af et eksperiment, hvor vi endnu kun har samlet en lille mængde data, og alligevel er vi meget ivrige efter at konkludere noget ud fra den smule data, om vores foretrukne teoretiske forudsigelse (f.eks massen af Higgs-bosonen). For at undgå at overfortolke disse effekter, er vi ret konserva-

tive, når vi ser afvigelser fra Standardmodellen. Hvad vi kræver for at tale om en *opdagelse* er, at vi er 99,9999 % sikre på, at "partiklen" ikke er et udsving af standardfænomener der snyder os. Det er hvad vi kalder en "5 sigma effekt", eller en opdagelse.

Når datamængden stiger og vores forståelse af vores eksperimentelle usikkerheder forbedres, bliver vi mindre og mindre tilbøjelige til at misfortolke data.

Dette ligner faktisk meget processen med valg af en præsident, hvor man på et tidligt tidspunkt i valgprocessen får tidlige indikationer af, hvem vinderen bliver, baseret på en lille delmængde af de samlede stemmer. Da dette kun udgør en delmængde af befolkningen, kan det endelige resultat afvige fra de tidlige forudsigelser, men som valget skrider frem, bliver resultaterne mere og mere klare.

Lad os nu se på figur 2, for at gå mere konkret til fortolkningen af resultaterne på Higgs-boson eftersøgningen. Standardmodellen kan ikke forudsige hvilken masse Higgs-bosonen har, men forudsiger i stedet dens tværsnit (dvs. sandsynligheden for at den bliver produceret i en kollision) når massen er kendt. ATLAS bruger plots som figur 2 til at udelukke områder, hvor Higgs-bosonen ikke er. Figur 2 indeholder ikke rigtige data.

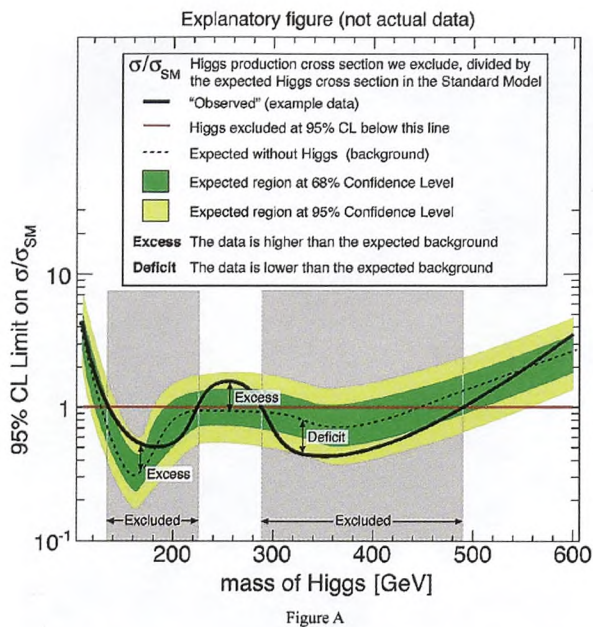


Figure 2. Figuren viser i princippet hvordan man udelukker hvilken masse Higgs-bosonen har. Dette er et hypotetisk datasæt, så figuren indeholder ikke rigtige LHC-data. Kilde: CERN.

Det er en figur af denne type, der viser hvor Higgs-bosonen *ikke* er. Vi kan stille mange spørgsmål, og det første spørgsmål, vi stiller er dette: Hvis Higgs-bosonen er beskrevet ved Standardmodellen, hvilke værdier kan dens masse ikke have? Lad os f.eks. spørge om Higgs-bosonen kan have massen 400 GeV?² Den stiplede linje på figur 2 ligger under 1, hvilket betyder, at vi har tilstrækkeligt med data til at udelukke, at Higgs-bosonen har en masse på 400 GeV. På y-aksen har vi produktionstværsnittet (divideret med den teoretiske forudsigtelse fra Standardmodellen), så hvis Higgs-bosonen eksisterer og har en masse på 400 GeV, så er vi 95 % sikre på, at kurven fra virkelige data (fuldt optrukken linie) ikke ville falde til under 1.

Hvis den fuldt optrukne sorte kurve går under værdien på 1 (markeret med en rød linje) for en række af masseværdier, så ser vi altså fra vores data, at Higgs-bosonen ikke er produceret med det forventede tværsnit for disse masseværdier. Det betyder, at disse værdier af Higgs-bosonens masse er udelukket med 95 % sikkerhed. I dette eksempel, ville to regioner udelukkes med 95 % sikkerhed: ca. 135-225 GeV og 290-490 GeV.

Nu da vi ved, hvor Higgs-boson ikke kan være, så kan vi prøve at udforske masseværdier som stadig er tilladte. Vi inkluderer derfor de grønne og gule bånd i figur 2. Hvis der kun findes standardfysik (og ingen Higgs-boson), og vi kender vores eksperimentelle usikkerheder, så forventer vi, at den fuldt optrukne linje og den stiplede linje vil ligge tæt på hinanden.

I området mellem 225 og 290 GeV, ser vi, at den faste "data"-linje ligger højere end "forventet uden en Higgs-boson"-linjen. Der sker muligvis noget sjovt der,

²I partikelfysik benyttes ofte energienheden GeV = gigaelektronvolt, der svarer til $1,602 \cdot 10^{-10}$ J. En partikels masse er ækvivalent til energien $E = mc^2$, fx er energien svarende til protonens masse 0,938 GeV.

³Luminositet måler den totale mængde af kollisioner fra LHC til eksperimenter. 1 fb^{-1} svarer til omkring den mængde af data, der blev indsamlet af ATLAS i én måned, ved udgangen af 2011.

muligvis er der flere observerede begivenheder end hvad vi forventede under antagelsen af, at der ingen Higgs-boson findes der. Da den sorte streg stadig er inden for det gule øvre bånd, så er chancerne for, at dette indikerer eksistensen af Higgs-boson stadig mindre end 95 %. Det kunne være en indikation af, at en Higgs-boson findes med denne masse, eller det kunne være et tegn på, at der er baggrundsprocesser, der havde en statistisk fluctuation, eller at der er systematiske fejl, der ikke er tilstrækkeligt godt forstået. Derfor venter vi med at hoppe op og ned, indtil denne chance bliver 99,9999 %.

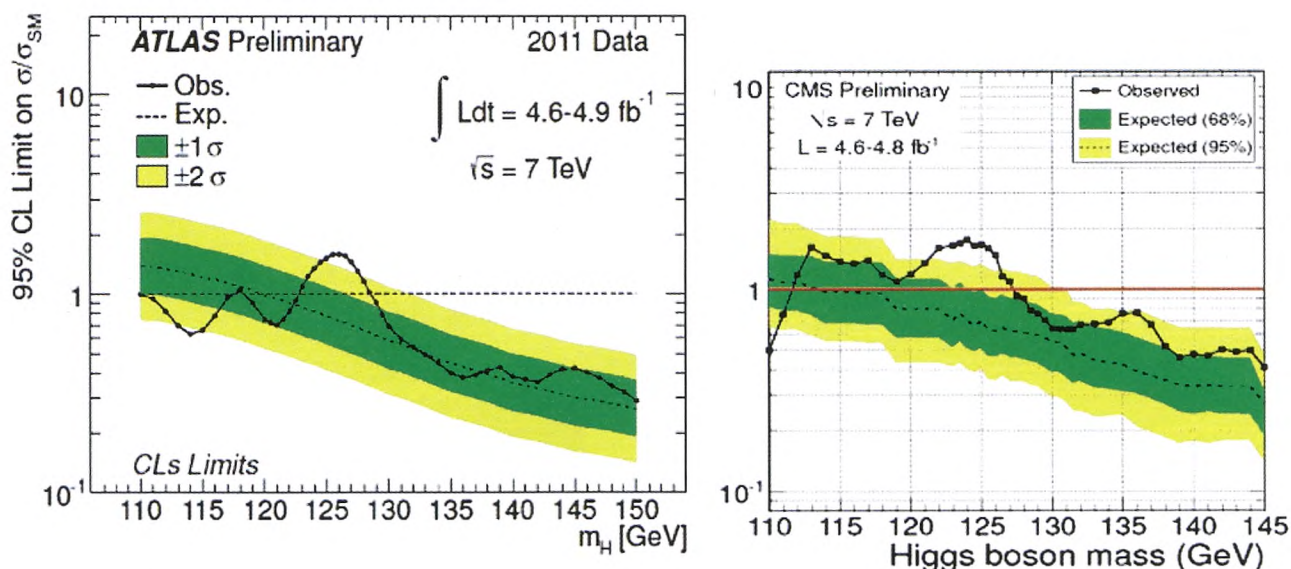
Status for den eksperimentelle søgen efter Higgs-boson

Efter en ujævn start i 2008, har LHC leveret, hvad den har lovet og meget mere. På mødet i Chamonix i januar 2011 mellem acceleratorforskere og eksperimentalister ved LHC, blev en samlet luminositet³ på 1 fb^{-1} forudsagt for hele 2011. Den faktiske indsamlede luminositet viste sig at være 5 fb^{-1} pr. eksperiment ved udgangen af året. Dette betyder, at acceleratoren klarede sig fem gange bedre end nogen forventede.

Denne stigning i datamængde kom for en pris i form af øget "pile-up", hvilket betyder, at eksperimentalerne var nødt til at forholde sig til, at op til 20 samtidige proton-proton kollisioner overlapper og bliver registreret samtidig som et "event" eller et "sammenstød". Dette ses fx som kollisionspunkterne i figur 1, nederst til venstre, hvor kun en enkelt af kollisionerne resulterer i partiklerne, der kan stamme fra henfald af en Higgs-boson.

På trods af de forventede vanskeligheder med at observere ny fysik under disse vanskelige betingelser, holdt analysen trit med de indkomne data, og allerede ved udgangen af 2011 kunne en status for søgen efter Standardmodellens Higgs-boson præsenteres. Dette repræsenterede et stort fremskridt i forhold til den viden vi har samlet i tidligere eksperimenter i løbet af de sidste to årtier.

Det tog omkring 20 år for eksperimenterne ved LEP og Tevatron (tidligere acceleratorfaciliteter ved henholdsvis CERN og Fermilab) at komme til den samlede viden, at hvis Standardmodellens Higgs-boson eksisterer, skal dens masse være mellem 115 og 150 GeV eller over 175 GeV. I December 2011 præsenterede de to LHC-eksperimenter ATLAS og CMS deres resultater, og for første gang var Higgs-bosonens masse blevet indsnævnet til et meget lille interval mellem 115 og 130 GeV med alle andre muligheder op til omkring 470 GeV udelukket med 95 % sikkerhed. Dette resultat er ved kun at bruge ATLAS alene – når man inkluderer resultaterne fra CMS forbedres disse grænser). Så nu ved vi, hvor Higgs-bosonen ikke er, hvis det er en Standardmodel-Higgs.

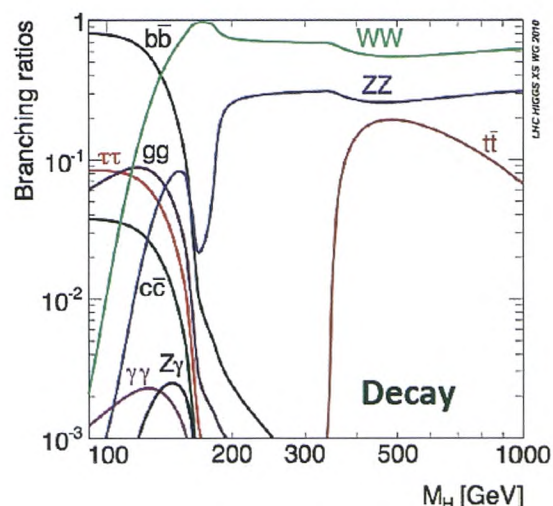


Figur 3. Den observerede (fuldt optrukne linje) og forventede (stiplet linje) 95 % CL øvre grænse fra ATLAS og CMS på produktionstværsnittet for en Standardmodel-Higgs-boson divideret med Standardmodellens forventning som en funktion af Higgs-massen i området 110-150 GeV. De stipede kurver viser den gennemsnitlige forventede grænse i fravær af et signal og de grønne og gule bånd indikerer tilsvarende 68 % og 95 % intervaller.

I hvert eksperiment skete noget sjovt ved ca. 126 GeV. Der var der et 3 sigma overskud af data, i forhold til hvad der forventes i fravær af en Higgs-boson. Dette overskud fandtes kun ved en masse omkring 126 GeV, og blev uafhængigt observeret af de to eksperimenter (126 i ATLAS og 125 i CMS). Men det var ikke et overskud på 5 sigma, og var derfor ikke stort nok til at blive kaldt “en opdagelse”. Vi havde altså ikke tilstrækkeligt med data til at påstå en opdagelse af en Standardmodel-Higgs.

Henfaldskanaler	Værdi af massen (GeV/c ²)
<i>Lav masse:</i>	
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110-150
$H \rightarrow ZZ \rightarrow lll$	110-600
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$	110-600
$H \rightarrow \tau\tau$	100-150
$H \rightarrow b\bar{b}$	110-130
<i>Høj masse:</i>	
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$	200-600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow llqq$	200-600
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq'$	300-600

Tabel 1. Tabel over mulige måder Higgs-bosonen kan henfalde. Symbolet “l” står for lepton, hvilket betyder, elektron eller muon (og anti-partikel), symbolet “q” står for quark, nemlig u, d, c, s, b (og anti-partikler). Henfaldskanaler er listet efter deres betydning (den reneste måde at observere et Higgs-signal står først) for at undersøge en given række masseverdier for Higgs-bosonen. Det er disse henfaldskanaler vi i øjeblikket undersøger ved ATLAS-eksperimentet. CMS-eksperimentet har en tilsvarende liste, som minder meget om denne.



Figur 4. Modelberegninger af, hvordan en Higgs-boson vil henfalde, afhængig af hvilken masse den har, hvis det er en Higgs-boson der tilhører Standardmodellen. Der er kun vist henfald til partikelpar fra Standardmodellen. Når massen er givet, er hyppighederne af henfaldskanalerne bestemt unikt.

Figur 4 viser Higgs-bosonens forskellige henfaldskanaler. De forskellige kurver viser hyppigheden af forskellige henfaldstyper afhængig af Higgs-bosonens masse. Det vil f.eks. være meget svært at se en Higgs-boson henfalde til en b-kvark og anti-b-kvark (den sorte kurve falder markant), hvis Higgs-massen er over ca. 300 GeV. I dette tilfælde må man støtte sig til henfald til enten WW, ZZ eller tt, der alle er hyppigere, for at afgøre, om det er en Standardmodel-Higgs eller ej.

Hvis Higgs-bosonen eksisterer, og har en masse svarende til 126 GeV, forventes det, at 2011-kørslen vil

indeholde ca. 200 begivenheder med henfald af $H \rightarrow WW$, ca. 70 begivenheder med $H \rightarrow \gamma\gamma$ og ca. 3 begivenheder med $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, der alle bidrager til det lille overskud vist i figur 3.

Higgs-bosonen har en meget kort levetid og henfalder til andre partikler, som derefter påvises ved ATLAS og CMS eksperimenter. Henfald til fotoner eller Z-bosoner er lettere at se, og derfor er disse to henfaldskanaler rangeret først i tabel 1. Men hvis Higgs-bosonen eksisterer, og netop er som forudsagt af Standardmodellen, så bør vi se resultater heraf i alle de henfaldskanaler, der er anført i tabel 1, før eller senere. Bemærk, at de mulige henfald af Higgs-bosonen er forskellige for forskellige værdier af massen (se figur 4).

Det tog kun LHC et år at producere data nok til at overskygge alle tidligere resultater på dette forskningsområde. Og det var en stor succes for LHC-projektet.

Der kommer hele tiden flere data ind. Da december 2011 resultaterne blev opdateret for Moriond 2012 Vinterkonferencen [5], se figur 3, lykkedes det ATLAS-gruppen, at indsnævre vinduet af mulige masseværdier for Higgs-bosonen endnu mere til 120-130 GeV eller over 540 GeV. Igen, når man inkluderer CMS-resultaterne, skærpes disse grænser endnu mere, og en kombination af disse resultater forventes inden sommeren 2012.

I marts 2012 (kun et par måneder efter udgangen af 2011-kørslen) havde både ATLAS og CMS analyseret den fulde datamængde indsamlet i 2011, og havde også givet resultater i mange henfaldskanaler, se tabel 1 og figur 4.

Når man betragter området mellem 120 og 130 GeV, se figur 3, observerer man et overskud eller "excess" omkring 126 GeV i begge eksperimenter. Når man analyserer dette interessante område i større detalje, peger data med en 2,5 sigma effekt mod, at der findes en Standardmodel-Higgs-boson med masse omkring 126 GeV i ATLAS-eksperimentet (og tilsvarende værdi fra CMS eksperimentet).

Det ser umiddelbart lidt underligt ud. Vi havde en 3 sigma effekt, og med lidt mere data og flere henfaldskanaler, blev det til kun 2,5 sigma. Det er vanskeligt at udtale sig klart om, hvad der sker her. Nogle af henfaldskanalerne var de samme (Higgs-bosonen, der henfalder til fotoner og Z-bosoner), og disse kanaler har en øget signifikans nu, men den nyeste analyse inkluderer flere nye kanaler, og da nogle af disse kanaler ikke ser et overskud, ja, så bliver kombinationen af signifikansen reduceret til 2,5 sigma.

Kapitlet om Standardmodellen er endnu ikke afsluttet, og vi er stadig ikke sikre på om Higgs-boson eksisterer. 2012 kørslerne er netop begyndt, og de forventes at forøge datamængden fra 2011 med en faktor 3 eller 4. Mere data bør være i stand til at bringe et svar. Det er derfor, vi fysikere anser året 2012 som Higgs-året.

Litteratur

- [1] LHC, <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach>
- [2] ATLAS, <http://atlas.ch>
- [3] Katrine Facius og Stefania Xella (2008), Jagten på Higgs-partiklen ved LHC, KVANT nr. 3, september 2008.
- [4] Video der forklarer Higgs-mekanismen, <http://www.atlas.ch/multimedia/#origin-of-mass>
- [5] Moriond 2012, <http://discoverycenter.nbi.ku.dk/news/2012/moriond>.



Stefania Xella er adjunkt ved Niels Bohr Institutet og arbejder i gruppen for eksperimentel partikelfysik. Hun er aktivt medlem af "Higgs-hunter"-teamet ved ATLAS.

PFEIFFER  **VACUUM**

Totalleverandør

Mød den stærkeste leverandør af kvalitets vacuumkomponenter fra markedets førende producenter på DFS' årsmøde på Nyborg Strand juni 2012.

PFEIFFER-adixen-TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com