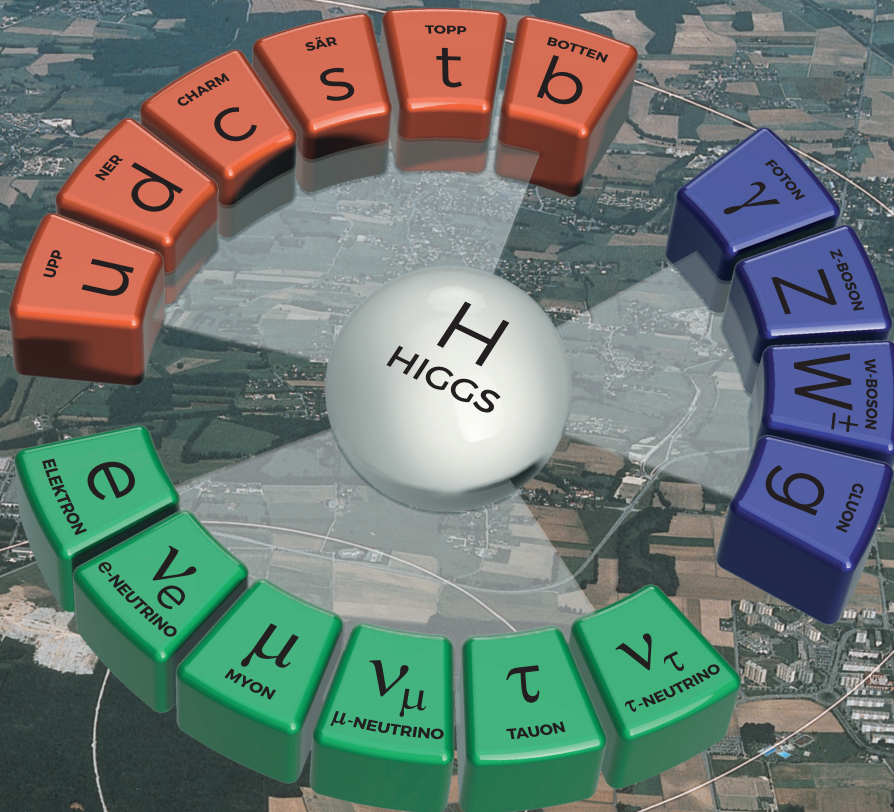


KOSMOS

STANDARDMODELLEN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2023



HIGGSBOSONEN SEDAN DEN UPPTÄCKTS

© JONAS STRANDBERG



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0. För bildmaterial med källhänvisning gäller samma upphovsrättsliga regler som för källan.

SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Jonas Strandberg

doktorerade vid Stockholms universitet, med att mäta toppkvarkar som skapats i Fermilab Tevatronen utanför Chicago. Som postdoktor vid University of Michigan och lektor vid KTH har han varit delaktig i sökandet efter, och upptäckten av, Higgsbosonen. Numera är hans forskning koncentrerad kring mätningar av Higgsbosonens egenskaper och konstruktionen av en ny detektor som ska integreras i ATLAS-experimentet år 2029.

För drygt 10 år sedan upptäcktes Higgspartikeln – den som förutspåts redan på 60-talet, men som lyckats undgå att observeras. Den länge saknade partikeln var en viktig pusselbit i standardmodellen för att förklara varför partiklar har massa. Men vad har hänt efter upptäckten 2012? Jonas Strandberg berättar här om vad Higgspartikeln är för något och han beskriver de intensiva experimentella undersökningarna som pågått efter att man först sett partikeln.

Bilden: En simulerad Higgsboson sönderfaller till fyra myoner i ATLAS-detektorn (myonspåren kan ses i gult), via två Z-bosoner. De fyra myonerna har hög rörelsemängd, vilken kan ses av att spåren knappt böjs av alls i det starka magnetfältet inne i ATLAS spår-detektor.

Higgsbosonen sedan den upptäckts

Upptäckten av Higgsbosonen gav oss inte bara kännedom om ytterligare en elementarpartikel, den bevisade också att vi omges av ett omdiskuterat fält, Higgsfältet, som är mycket speciellt till sin natur. Till skillnad från ett vanligt fält är Higgsfältets energi inte noll i grundtillståndet. Eftersom fältet har genomgått ett spontant symmetribrott (se artikeln av Rikard Enberg i denna upplaga av Kosmos) finns istället en energi lagrad i Higgsfältet i varje punkt i universum. Genom växelverkan med Higgsfältet ger denna energi upphov till massa hos elementarpartiklarna. Styrkan på växelverkan med Higgsfältet bestämmer hur stor massa en elementarpartikel får, ju starkare växelverkan desto större massa (se Faktaruta 1). Man kan säga att detta är en ny sorts kraft — en femte kraft utöver de fyra vi brukar säga är en del av standardmodellen — där elementarpartiklarnas laddning under denna kraft (”Higgsladdningen”) avgör hur tunga de är. Elementarpartiklarnas massa är i sin tur avgörande för hur vårt universum ser ut. Elektronens massa bestämmer hur stora atomerna är och det faktum att uppkvarkar är lättare än nerkvarkar gör att protonen och inte neutronen är stabil, för att nämna några exempel.

Trots att Higgsfältet, och dess energi i grundtillståndet, har så avgörande betydelse för universum kan vi aldrig direkt mäta eller se det. Ett fält i kvanfältteorin är ett matematiskt begrepp. Det är bara rörelser eller excitationer i fältet som manifesterar sig som partiklar, vilka vi kan mäta eller växelverka med. Så om vi vill lära oss mer om Higgsfältet och dess speciella potential och grundtillstånd är det Higgsbosonen som är nyckeln till detta. Det vi lite slarvigt kallade ”Higgsladdning” ovan bestämmer hur starkt en partikel växelverkar med Higgsbosonen, analogt med hur den elektriska laddningen hos en partikel bestämmer hur mycket den

1. Elementarpartiklarnas massa

Massa uppkommer genom att partiklar växelverkar med Higgsfältet, som har en energi i grundtillståndet skild från noll. Denna energi betecknas v , med värdet $v \approx 246$ GeV. Olika typer av partiklar erhåller massa enligt:

$m_F \sim g_F v$: De olika fermionerna F erhåller en massa linjärt proportionell mot styrkan på växelverkan med Higgsbosonen, g_F . Detta gäller alla kvarkar och de laddade leptonerna. Däremot är det ännu oklart om samma mekanism genererar neutrinernas massor, då dessa i standardmodellen ska vara lika med noll (i kontrast till vad upptäckten av neutrinooscillationer har uppmätt). Denna typ av koppling mellan en kraftförmedlande boson och en fermion kallas Yukawakoppling.

$m_{W,Z} \sim g_{W,Z} v$: De tunga gaugebosonerna W och Z får sin massa genom en så kallad gaugekoppling till Higgsfältet, och deras massa genereras genom Higgsfältets spontana symmetribrott i det tidiga universum.

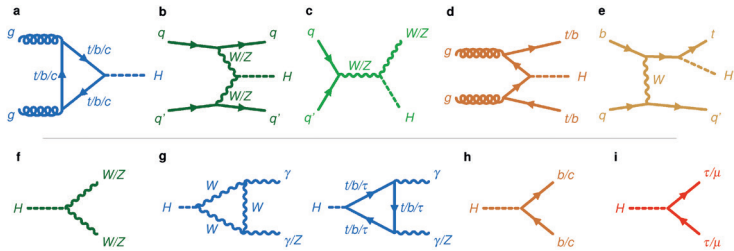
$m_H \sim \sqrt{\lambda} v$: Även Higgsbosonen får massa genom växelverkan med sig själv. Styrkan på denna växelverkan betecknas λ , och är samma parameter som ingår i Higgspotentialens form.

påverkas av den elektromagnetiska kraften. Så vi förväntar oss att en tung partikel ska ha hög sannolikhet att växelverka med Higgsbosonen, medan en lätt partikel sällan gör det. Det kan låta som ett triviale samband, men om vi återigen jämför med en annan kraft, som elektromagnetismen, är det vanliga att en partikels laddning under en viss kraft är något helt annat än dess massa. Däremot liknar Higgsbosonens växelverkan mer effekten av gravitationen, men med några viktiga skillnader. Dess växelverkan sker bara över mycket korta avstånd eftersom den är massiv och kortlivad, medan gravitationen verkar över långa avstånd. Vidare växelverkar Higgsbosonen endast med andra elementarpartiklar, medan gravitationen känner av den totala massan (eller energin), vilket även inkluderar exempelvis bindningsenergin från den starka kraften som håller ihop protonerna och neutronerna.

Upptäckten av Higgsbosonen fick ett stort medialt genomslag. Vad som hände efter upptäckten har det däremot pratats mindre om, trots att Higgsbosonen fortsatt är högintressant som forskningsobjekt.

Higgsbosonens upptäckt

Higgsbosoner skapas och sönderfaller genom växelverkan med andra partiklar. Vid den höga energi som protonerna i LHC har uppträder protonernas beståndsdelar i princip som fria partiklar, och kollisionerna sker mellan två elementarpartiklar (kvarkar eller gluoner), en från vardera proton. Higgsbosonen växelverkar starkast med de partiklar som har störst massa, men protonerna består framförallt av masslösa gluoner samt kvarkar från första generationen, vilka är de lättaste kvarkarna. Det är därför mycket osannolikt att en Higgsboson skapas direkt från kollisionen av de primära kollisionenspartiklarna. Det vanligaste är att det skapas temporära (virtuella) tunga partiklar som toppkvarkar eller W-bosoner som sedan i sin tur skapar Higgsbosonen. I Figur 1a-e visas de vanligaste produktionsmekanismerna, där den dominerande är från två initiala gluoner som via en loop av toppkvarkar skapar en Higgsboson ($gg \rightarrow H$).



Figur 1: Exempel på produktionsmekanismer (a-e) och sönderfall (f-i) för Higgsbosonen. När en Higgsboson skapas vid LHC sker det oftast (87% av fallen) från två initiala gluoner via en loop av tunga kvarkar (a), näst oftast (7% av fallen) från två initiala kvarkar via ett par av W- eller Z-bosoner (b), i 4% av fallen från en W- eller Z-boson som skapats från två initiala kvarkar och i runt 2% av fallen skapas Higgsbosonen tillsammans med tunga kvarkar från ett initialtillstånd av antingen två gluoner eller två kvarkar (d-e). När Higgsbosonen sönderfaller sker det huvudsakligen till par av partiklar. Några viktiga exempel är till W- eller Z-bosoner (f), till två fotoner eller till en foton och en Z-boson (g), till två kvarkar (h) eller till två laddade leptoner (i).

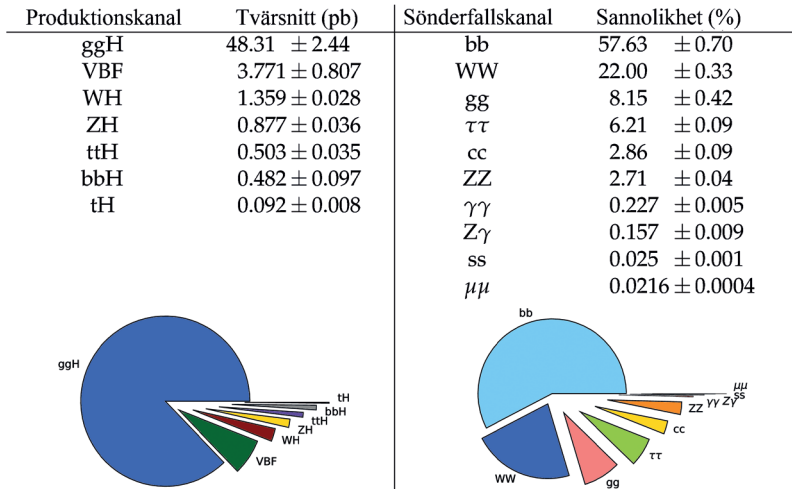
Higgsbosonen har en mycket kort livstid ($t \sim 10^{-22}$ s) och sönderfaller omedelbart efter att den skapats i protonkollisionerna vid LHC till lättare partiklar. Även här är det Higgsbosonens växelverkan med andra partiklar som bestämmer vilka sönderfall som är sannolikast. Framförallt sönderfaller den till det tyngs-

ta partikel-antipartikelpar som dess massa tillåter, eftersom den växelverkar starkast med de tyngsta partiklarna. Higgsbosonens vanligaste sönderfallskanaler sammanfattas i Figur 1f-i. Störst sannolikhet är det för ett sönderfall till ett par av bottenkvarkar (Figur 1h). Vissa av de vanligaste sönderfallskanalerna går dock via virtuella partiklar, på liknande sätt som när Higgsbosonen skapades. Exempel på sådana är till ett par av W-bosoner eller ett par av Z-bosoner (Figur 1f), där en av W eller Z är virtuell och där dessa partiklar i sin tur sönderfaller till lättare partiklar. Higgsbosonen kan även sönderfalla till masslösa partiklar, trots att den inte kan växelverka direkt med dessa, genom att gå via en loop av tunga partiklar som toppkvarkar eller W-bosoner (Figur 1g). Att flera av sönderfallskanalerna i Figur 1 är tillgängliga experimentellt, det vill säga är tillräckligt sannolika för att vi ska kunna observera dem, är ett lyckligt sammanträffande som beror på att Higgsbosonen har en massa just runt $m_H \approx 125$ GeV. Hade den varit mycket tyngre hade sönderfallen till W-bosoner och Z-bosoner helt dominerat, och vi hade inte kunnat testa Higgsbosonens kopplingar till fermionerna på ett direkt sätt. Sannolikheterna för olika produktions- och sönderfallskanaler för Higgsbosonen i standardmodellen finns listade i Figur 2.

Det som sker i analyserna i ATLAS och CMS är att varje grupp av fysiker koncentrerar sig på att mäta olika sluttillstånd av partiklar som detekteras i experimenten. Tunga och kortlivade partiklar sönderfaller, ibland i flera steg, till relativt långlivade partiklar som når vår detektor och där ger ett utslag. Sluttillståndet bestäms av kombinationen produktionskanal och sönderfallskanal för Higgsbosonen, där båda kan ge bidrag till partiklar som kan detekteras.

De känsligaste analyserna är de som både har tillräckligt stor mängd Higgsbosoner som ger upphov till ett visst sluttillstånd och en begränsad mängd andra processer som ger upphov till samma uppsättning av partiklar i sluttillståndet (så kallade bakgrundsprocesser). Vid tiden för Higgsbosonens upptäckt var det tre analyser som bidrog till resultatet. Alla letade efter Higgsbosoner som skapades genom $gg \rightarrow H$, men med olika sönderfall. De tre sönderfall som tydligast skiljer ut sig från bakgrunden är:

- $H \rightarrow ZZ$, där Z bosonerna sedan sönderfaller till ett par av leptoner enligt $Z \rightarrow \ell\ell$. I detektorn ser man då totalt fyra leptoner.
- $H \rightarrow \gamma\gamma$.



Figur 2: Tvårsnitt för att skapa Higgsbosoner genom olika produktionskanaler (till vänster), och sannolikheten för olika sönderfall av Higgsbosonen (till höger). Alla tvårsnitt och sannolikheter är beräknade i standardmodellen.

- $H \rightarrow WW$, där W-bosonerna sedan sönderfaller enligt $W \rightarrow \ell\nu_\ell$. Totalt ser man två leptoner i detektorn, medan neutrinerna försvinner utan att detekteras.

När upptäckten av Higgsbosonen kommunicerades den fjärde juli 2012 visste vi således ganska lite om den. Framförallt hade vi inte direkt testat Higgsbosonens växelverkan med fermionerna. De sönderfall som användes för upptäckten skedde till största delen via växelverkan mellan Higgsbosonen och W- och Z-bosonerna. Att Higgsbosonen observerades i alla tre kanalerna, i proportion till vad standardmodellen förutsäger, var en stark indikation på att Higgsmekanismen verkligen var förklaringen till massan hos W- och Z-bosonerna. Däremot kunde vi inte vara säkra på att Higgsfältet verkligen var orsaken till att också fermionerna är massiva. För att testa denna växelverkan behöver man mäta Higgsbosonen i en sönderfallskanal till ett par av fermioner.

Nya insikter sedan upptäckten

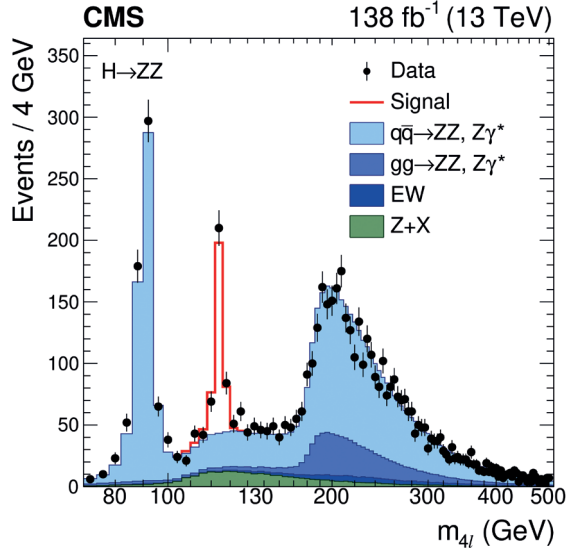
Higgsbosonens upptäckt baserades på data insamlad under åren från LHCs start 2009 till mitten av 2012. En Higgsboson skapas bara i ungefär en av tio miljarder protonkollisioner. Dessutom sönderfaller den snabbt till ett par av fermioner.

derfaller de flesta av de som skapas på ett sätt som inte fångas upp av våra analyser — de drunknar i bakgrunden. Det är anledningen till att det tog flera år att skapa tillräckligt många Higgsbosoner för att kunna hävda att vi upptäckt den.

Idag har LHC skapat mer än 30 gånger så många Higgsbosoner än vad som var fallet vid tiden för upptäckten. Den stora ökningen beror delvis på att vi har haft mer tid på oss att samla in data, men också på att kollisionsenergin nästan dubblats sedan dess, vilket avsevärt ökar sannolikheten för att skapa Higgsbosoner i protonkollisionerna. Det gör att vi idag har bättre kännedom om dess egenskaper, och framförallt har vi observerat många fler av de möjliga sönderfallskanalerna och mätt växelverkan mellan Higgsbosonen och fler av de andra elementarpartiklarna än vid tiden för upptäckten.

Två av sönderfallskanalerna som bidrog till Higgsbosonens upptäckt, $H \rightarrow ZZ$ och $H \rightarrow \gamma\gamma$, är de bästa kanalerna för att bestämma massan. De har fördelen att alla sönderfallsprodukterna detekteras, och dessutom har ATLAS- och CMS-detektorerna lätt att precis bestämma energin och riktningen för leptoner och fotoner. Vi kan därför bestämma värdet på Higgsbosonens massa från den invarianta massan för partiklarna i sluttillståndet. Vi förväntar oss att se data ackumuleras i en smal topp vid värdet för Higgsbosonens massa ovanpå bakgrunden från andra processer som inte involverar en Higgsboson. Figur 3 visar den invarianta massan för händelser med fyra leptoner uppmätt med CMS-detektorn. Ett tydligt överskott av händelser i data över vad som förväntas från bakgrunden kan ses runt $125 \text{ GeV}/c^2$, och genom en anpassning får man fram det uppmätta värdet $m_H = 125,35 \pm 0,15 \text{ GeV}/c^2$. En liknande analys från ATLAS kan ses i Figur 4, den här gången för händelser med två fotoner i sluttillståndet. Den förväntade bakgrunden har redan subtraherats från datan, och kvar blir ett tydligt överskott av händelser vid massan $125,11 \pm 0,11 \text{ GeV}/c^2$. I figuren visas också motsvarande resultat vid tiden för Higgsbosonens upptäckt, för att illustrera hur mycket mer precis vi idag känner till Higgsbosonens massa. I själva verket är det en av de mest precis kända elementarpartikelmassorna, med en relativ osäkerhet på under en promille.

Genom att mäta vinkelfördelningarna för sönderfallsprodukterna från Higgsbosonen kan man bestämma dess kvantmekaniska spinn (J) och dess egenvärde för paritetoperatorn (P). Möjli-

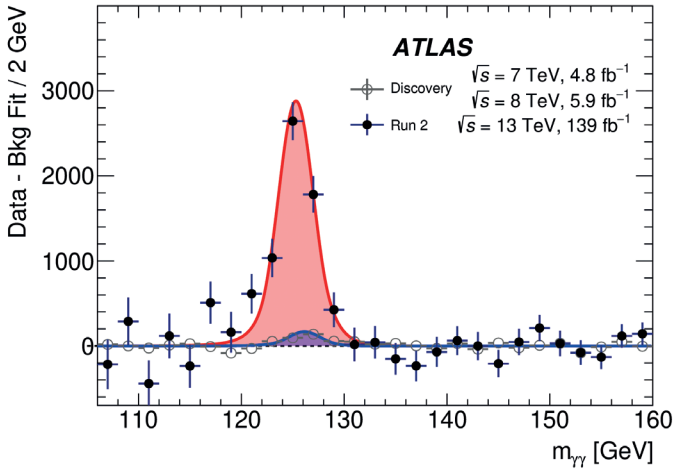


Figur 3: Invarianta massan för händelser med fyra leptoner i sluttillståndet, uppmätt med CMS-detektorn. Bakgrundshändelser som ger upphov till fyra leptoner utan att involvera en Higgsboson visas i olika nyanser av blått och i grönt. Det förväntade bidraget från en Higgsboson med massan $m_H = 125,35 \text{ GeV}/c^2$ illustreras av det röda histogrammet. Data visas med de svarta punkterna.

ga egenvärden för P är ± 1 . Vi vet nu att Higgsbosonen har $J^P = 0^+$, i enlighet med vad standardmodellen förutsäger. Higgsbosonens spinn är speciellt. Det är den enda elementarpartikel vi känner till som saknar spinn.

Det viktigaste som hänt sedan upptäckten av Higgsbosonen har varit att bekräfta Higgsbosonens växelverkan med fermionerna. Växelverkan med fermioner kan ske både i produktionsmekanismen för Higgsbosonen och i sönderfallet av denna. Det allra vanligaste sönderfallet för Higgsbosonen är till fermioner, närmare bestämt till ett par av bottenkvarkar. Att $H \rightarrow b\bar{b}$ trots allt inte var en av kanalerna som bidrog till upptäckten berodde på den enorma bakgrunden från händelser med två bottenkvarkar i sluttillståndet som inte skapats från en Higgsboson.

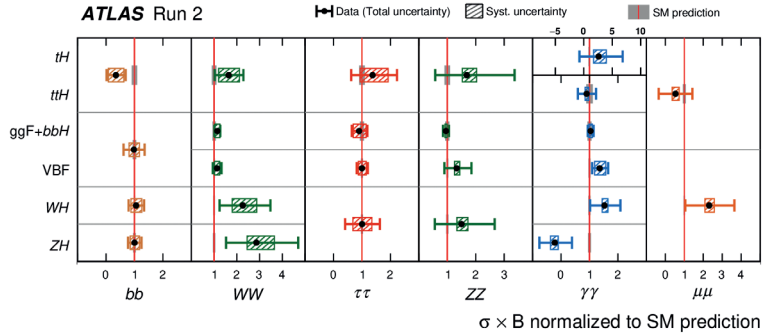
Sedan Higgsbosonens upptäckt har vi verifierat att Higgsbosonen, förutom genom $gg \rightarrow H$, kan skapas tillsammans med en W- eller Z-boson, tillsammans med toppkvarkar, och genom en sammansmältning av två W- eller Z-bosoner (på engelska kallad



Figur 4: Invarianta massan för händelser med två fotoner i sluttillståndet, uppmätt med ATLAS-detektorn. Bakgrunden från processer som ger upphov till två fotoner utan att involvera en Higgsboson har subtraherats från den uppmätta datan. Nuvarande dataset visas med de svarta punkterna, och den röda fördelningen visar det förväntade bidraget för en Higgsboson med massa $125,11 \text{ GeV}/c^2$. De grå punkterna och den blåa fördelningen visar resultatet vid tiden för Higgsbosonens upptäckt.

vector boson fusion, illustrerad i Figur 1b). Vi har också experimentellt bekräftat Higgsbosonens sönderfall till bottenkvarkar och τ -leptoner, vilket tillsammans med observationen av produktionskanaler med toppkvarkar säkerställer Higgsbosonens växelverkan med alla tunga fermioner i den tredje generationen. Att mäta Higgsbosonens sönderfall till andra generationens fermioner är mycket svårare, då sannolikheten för den att växelverka med dessa är lägre samt att bakgrunden från andra processer är större för dessa partiklar. Higgsbosonens sönderfall till ett par av myoner är experimentellt bekräftad, dock med stora osäkerheter. Sönderfall till ett par charmkvarkar letas efter — än har vi inte uppnått tillräcklig statistisk precision för att kunna säga att vi har sett dessa. Figur 5 visar tvärsnittsmätningar av Higgsbosonen i olika kombinationer av produktions- och sönderfallskanaler från ATLAS-experimentet.

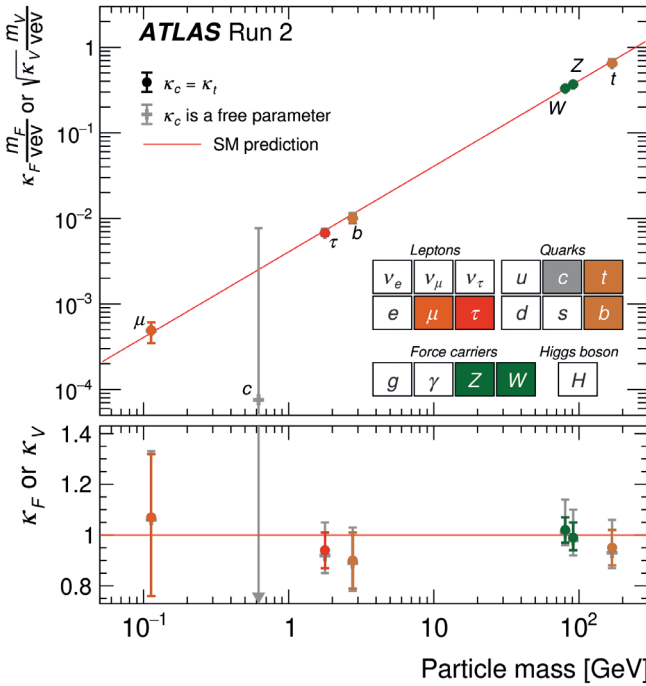
Genom att kombinera resultaten från en mängd analyser kan vi bestämma värdena för flera av Higgsbosonens kopplingar till andra partiklar. Resultaten presenteras ofta i enheter av $\kappa = g/g_{SM}$



Figur 5: Mätningar av Higgsbosonens tvärsnitt för olika kombinationer av produktionskanaler (y-axeln) och sönderfallskanaler (x-axeln). Resultaten är uttryckta i enheter av $\mu = \sigma / \sigma_{SM}$, där $\mu = 1$ är det förväntade värdet enligt standardmodellen.

för de olika partiklarna, där g är kopplingen mellan en partikel och Higgsbosonen och $\kappa = 1$ betyder att vi uppmätt exakt den styrka på växelverkan som standardmodellen förutsäger. Hittills stämmer alla uppmätta kopplingar väl med vad som förutses av standardmodellen. Detta illustreras i Figur 6, där styrkan på växelverkan med Higgsbosonen visas som en funktion av massan hos partikeln. Denna figur visar mer än någon annan att den nya partikeln vi hittat verkligen är den Higgsboson som förutsades på 1960-talet. Kopplingen mellan Higgsbosonen och de lättaste partiklarna såsom elektronen samt upp- och nerkvarkarna är för svag för att kunna detekteras med nuvarande datamängd. Egentligen är det alltså inte bevisat att Higgsbosonen också ger massa till de stabila partiklar som utgör den vanliga materian i universum, även om det är mycket osannolikt att det inte skulle vara så.

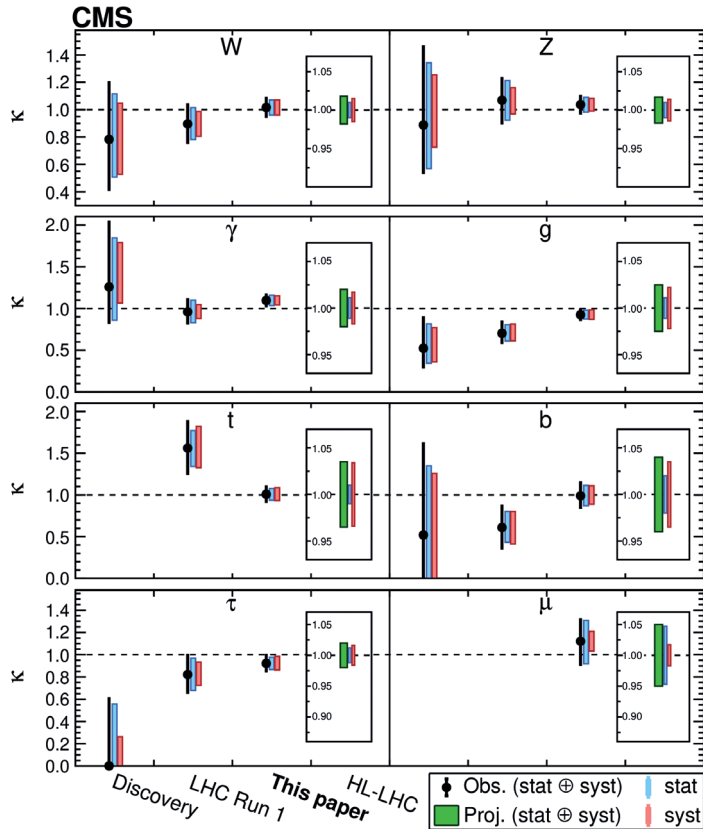
Det verkligen intressanta är dock osäkerheterna på Higgsbosonens kopplingar till andra partiklar. Eftersom Higgsbosoner ofta skapas eller sönderfaller via virtuella, tunga, partiklar skulle även nya och hittills oupptäckta partiklar kunna bidra till sannolikheten för vissa produktions- eller sönderfallskanaler. Vi skulle då uppmäta värden på Higgsbosonens växelverkningar som skiljer sig marginellt från vad standardmodellen förutsäger. En jämförelse mellan storleken på osäkerheterna vid tiden för upptäckten och de senaste resultaten kan ses i Figur 7 för CMS experimentet. För närvarande har de uppmätta värdena osäkerheter på mellan 5% och 20%, vilket inte utesluter bidrag från hittills oupptäckta partiklar.



Figur 6: Styrkan på växelverkan (den effektiva kopplingen) mellan Higgsbosonen och andra partiklar i standardmodellen, som funktion av partiklarnas massa. Endast växelverkan med de tyngsta partiklarna har kunnat studeras. Nedre panelen visar det uppmätta värdena på $\kappa_F = g_F/g_F^{SM}$ och $\kappa_V = (g_V/g_V^{SM})^2$ för de olika partiklarna, där g är kopplingen mellan en partikel och Higgsbosonen och $\kappa = 1$ betyder att vi uppmätt exakt den styrka på växelverkan som standardmodellen förutsäger.

Vad händer framöver

Dagens precision överträffar med råge vad vi förväntades uppnå med den datamängd som LHC hittills levererat. Det som möjliggjort detta är spektakulära framsteg både på den experimentella och den teoretiska sidan. Experimentellt har framsteg i modellering av bakgrundsprocesser genom att använda data samt användning av maskininläring för att isolera Higgsbosonsignalen från bakgrunden gjort största skillnaden. På den teoretiska sidan har vi nu beräkningar som inte bara inkluderar första ordningens kvantfluktuationer utan andra och ibland även tredje ordningens fluk-



Figur 7: Resultat och osäkerheter vid olika tidpunkter för mätningar av Higgsbosonens kopplingar till andra partiklar. Resultaten presenteras i enheter av $\kappa = g/g_{SM}$, där g är kopplingen mellan en partikel och Higgsbosonen och $\kappa = 1$ betyder att den koppling som förutsägs av standardmodellen har uppmätts. De fyra resultat som presenteras för varje partikel är vid tidpunkterna för: upptäckten av Higgsbosonen 2012; i slutet av LHC Run 1 (runt år 2013-2014); med all data från Run 1 och Run 2 (runt år 2021-2022); samt den precision som vi förväntar oss uppnå med all data från LHC (runt år 2040).

tuationer — en nödvändig förutsättning för att precisionen fortfarande ska begränsas av de experimentella osäkerheterna. Både de experimentella resultaten och de teoretiska beräkningarna kommer fortsatt att behöva förbättras om vi ska kunna identifiera bidrag från nya partiklar i kvantfluktuationerna eller utesluta andra modeller där till exempel Higgsbosonen är en sammansatt partikel och inte en elementarpartikel. En förbättring av osäkerheten

med en faktor fyra i vår kunskap om Higgsbosonens egenskaper leder i allmänhet till en fördubbling av hur tunga partiklar vi är känsliga för i kvantfluktuationerna.

Fas två av LHC, kallad *High Luminosity LHC* (HL-LHC), är planerad att starta år 2029 med en uppgraderad accelerator och uppgraderade experiment. Målet är att i princip tiodubbla data-mängden jämfört med den nuvarande, och därmed ytterligare förbättra precisionen för mätningarna av Higgsbosonens egenskaper. I Figur 7 finns en uppskattning av hur stora osäkerheterna kommer att vara i slutet av HL-LHC (den gröna felstapeln för varje partikel). För att nå längre än så behövs en ny accelerator, en elektron-positronkolliderare med tillräckligt hög energi för att kunna skapa Higgsbosoner. Eftersom elektronen och positronen är elementarpartiklar, till skillnad från protonerna som kollideras i LHC, leder det till mycket renare sluttillstånd i kollisionerna och en exakt kännedom om kollisionsenergin. En sådan accelerator skulle kunna minska osäkerheterna med så mycket som en faktor tio jämfört med vad vi förväntar oss vid slutet av HL-LHC. Det är anledningen till att en sådan accelerator, kallad *Future Circular Collider* (FCC), nu planeras vid CERN för tiden efter LHC (se Sten Hellmans artikel i denna upplaga av Kosmos).

Higgsfältet och Higgsbosonen är centrala för att förstå det universum vi lever i, och vi har många frågor kvar att besvara som relaterar till dessa. En sådan är om det finns fler partiklar som saknar spinn. I modeller av universums utveckling behöver man ofta införa andra spinnfria fält, så kallade skalärfält, till exempel för att förklara vad som drev inflationen i det tidiga universum. Vidare är det oklart hur Higgsfältet relaterar till den mörka energin i universum. Vid en första anblick kan det tyckas som att energin i Higgsfältets grundtillstånd skulle kunna utgöra den mörka energin, men när man räknar på det så visar det sig att det inte alls stämmer. Den mörka energin är i själva verket mycket mindre än Higgsfältets energi, vilket leder till följdfrågor om varför vi inte ser den fulla effekten av Higgsfältets energi och om det då är ett annat fält som utgör den mörka energin. Det finns fler frågor, till exempel varför det till synes inte finns något mönster hos partikelmassorna i standardmodellen, varför Higgsbosonen själv har precis den massan den har, och ifall Higgsbosonen är länken mellan den vanliga materian och de partiklar som utgör den mörka materian.

Det kommer att ta lång tid innan vi vet svaret på alla dessa frågor. Upptäckten av Higgsbosonen var bara startskottet på en resa — nu behöver pusselbit läggas till pusselbit tills vi börjar se var standardmodellen börjar knaka i fogarna. Det är så vetenskapen fungerar, de stora upptäckterna leder till medial uppmärksamhet men det är precisionsmätningarna som leder oss framåt i vår förståelse. Kanske sker nästa genombrott också vid LHC, annars blir det upp till nästa generations partikelfysiker att visa vägen vid ”framtidens cirkulära kolliderare”!



Vidare läsning

Mer information om vad vi vet om Higgsbosonen och vilka frågor det leder till kan med fördel läsas om i temanumret av Nature som gavs ut vid tioårsfirandet av upptäcken. Se dessa tre artiklar:

Salam, G. P., Lian-Tao Wang och Zanderighi, G. (2022). The Higgs boson turns ten, *Nature* 607, 41–47.

The ATLAS Collaboration (2022). A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery, *Nature* 607, 52–59.

The CMS Collaboration (2022). A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery, *Nature* 607, 60–68.