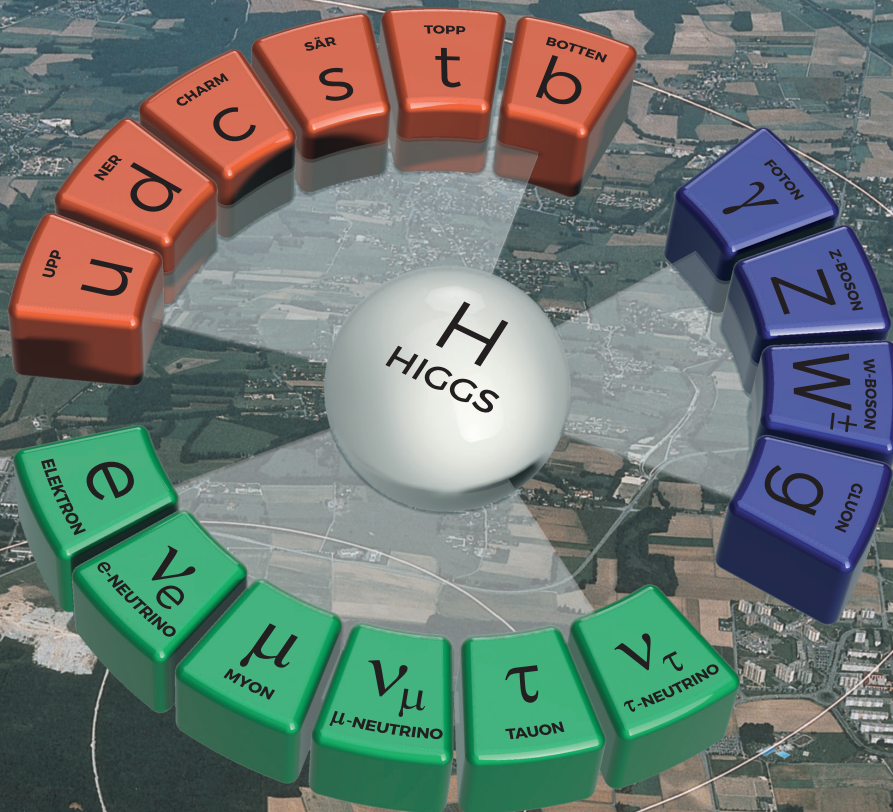


KOSMOS

STANDARDMODELLEN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2023



**BORTOM STANDARDMODELLEN - VAD
KAN VI UPPTÄCKA VID HÖGA ENERGIER?**

© ELSE LYTKEN



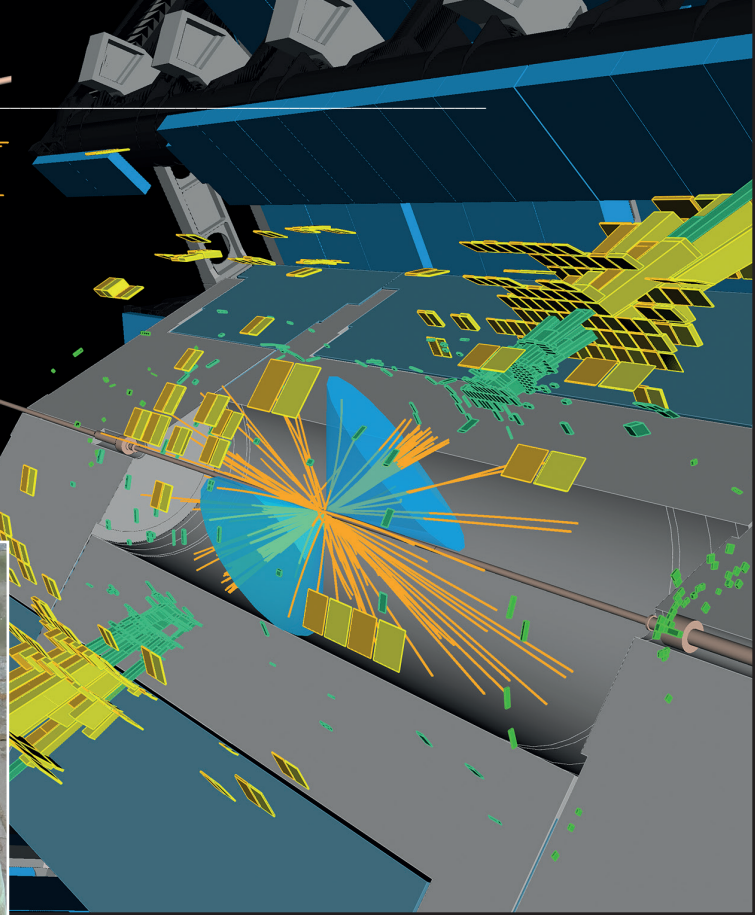
Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0. För bildmaterial med källhänvisning gäller samma upphovsrättsliga regler som för källan.

SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Else Lytken

är professor i experimentell hög-energifysik vid Lunds universitet. Hon tog sin doktorsexamen 2004 i Köpenhamn och arbetade vid de stora acceleratorerna, Fermilab i USA och CERN i Schweiz, innan hon kom till Lund som biträdande universitetslektor 2009. Else Lytkens forskning är inriktad på sökandet efter nya partiklar bortom standardmodellen, särskilt högenergetiska leptoner som produceras i hadronkollisioner. Hon är för närvarande aktiv i ATLAS-experimentet och i utvecklingen av nya grundläggande fysikexperiment vid ESS.
Foto: Johan Lindskoug.



Att hitta något som inte stämmer överens med teorin är bland det bästa en forskare hoppas på. I den här artikel beskriver Else Lytken avancerade experiment som letar efter det okända. Bland experimentella data tittar man efter något som INTE passar in i standardmodellen. Förhoppningen är att detta nya ska leda till ny fysik – bortom standardmodellen.

Bilden: En ögonblicksbild från kollisionerna i ATLAS-detektorn, troligen produktion av två toppkvarkar, visualiserad så att endast aktiverade detektorelement är synliga (grafik CERN).

Bortom standardmodellen – vad kan vi upptäcka vid höga energier?

Det finns många anledningar till att vi letar ny fysik bortom standardmodellen. Vissa handlar mer om en önskan och förväntan på att en färdig modell ska kunna förklara alla fenomen på ett fullgott och konsistent sätt. Vi har nu hittat en Higgsboson som hjälper oss att hålla ihop standardmodellen, men den för också med sig nya frågor: Varför är den inte tyngre? Det vakuum som Higgsfältet sprider ut sig i, är det ett äkta vakuumtillstånd eller är det instabilt och kommer det då en fasövergång någon gång (långt) bort i framtiden? Varför har neutriner massa (Higgsmekanismen räcker inte till här) och varför kan de ändra smak (oscillera) då inga andra leptoner kan det (eller kan de det?!). Mörk materia och mörk energi är inte med i standardmodellen och inte heller tyngdkraften. Dessutom verkar vi bo i ett materieuuniversum och vad har då hänt med antimaterien? Enligt standardmodellen bildas partiklar och antipartiklar lika lätt (med smärre undantag, som CP-brott) så varför blev det så?

Det finns många frågor men också många potentiella svar: modeller med extra Higgsbosoner, långlivade partiklar, så kallade *Grand Unification* teorier, leptokvarkar, supersymmetri, sammansatthet (eng. *compositeness*), extra rumsdimensioner, gravitoner, samt modeller med tyngre kopior av de partiklar vi redan känner (se artiklen om teorin av Johan Rathsman i denna upplaga av Kosmos). Den här texten kommer att fokusera på de experimentella mätningarna. Mörk materia och högenergiska neutriner har redan behandlats i Kosmos 2019 och kommer här endast att tas

upp sporadiskt. Texten fokuserar på läget vid de stora experimenten runt CERNs *Large Hadron Collider*, LHC, som nyligen började sin tredje omgång av datatagning, *Run 3*. När *Run 3* inleddes pressades protonstrålen till dess nya maximala energi på 6,8 teraelektronvolt (TeV), vilket överträffar det tidigare energirekordet från LHC och gör den till den mest energirika partikelstrålen som människan någonsin har skapat. Runt acceleratoringen finns experiment som försöker hitta ny fysik. De fyra största experimenten ALICE, ATLAS, CMS och LHCb har alla olika inriktningar: ATLAS och CMS är optimerade för att samla in så mycket data som möjligt, LHCb specialiserar sig på mätningar med b-kvarkar, och ALICE är ett tungjonsexperiment som studerar kvark-gluonplasmata, ”ursoppan”(Sten Hellmans artikel i denna Kosmos beskriver hur dessa experiment är uppbyggda).

Hur ser ny fysik ut?

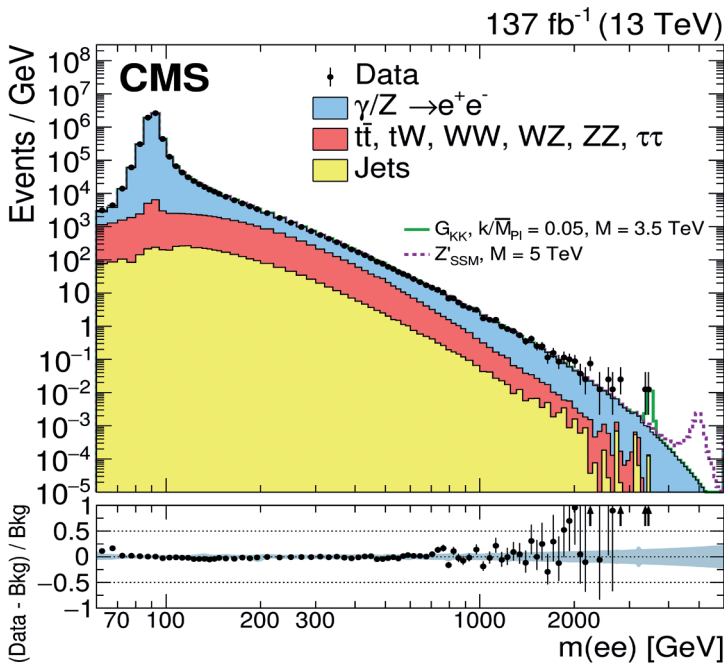
Om vi söker efter fysik bortom Standardmodellen, kommer vi då att se saker vi aldrig sett förut? Ja och nej. Eftersom vi studerar kvantfysik finns alltid en möjlighet att intressanta fluktuationer inträffar. Beroende på vilken typ av ny fysik som gömmer sig bland våra data kan det vara nya ytterst spektakulära händelser vi hoppas att se (till exempel sönderfall av svarta hål), men även att vi tycks ha för mycket eller för lite av en viss typ av data. Det behövs i så fall en noggrann statistisk analys för att avgöra om det verkligen är något nytt vi har sett. Så var det när vi först upptäckte Higgsbosonen. Steg 1 är därför att alltid bekräfta att vi förstår tillräckligt väl hur standardmodellens fysik registreras i detektorerna. Innan vi kan gå vidare och hitta exotiska partiklar måste vi vara säkra på att en elektron verkligen ser ut som en elektron etc. En del av det arbetet kan även ske vid lägre energier eller strålintensiteter än normalt.

Förutom att det är ett nödvändigt steg för acceptans av en mätning av fysik bortom standardmodellen kan också vanliga standardmodellmätningar användas direkt till att söka efter ny fysik om mätningen har tillräckligt hög precision. Det skulle kunna vara tvärsnittmätningar, som kan påverkas om det finns nya, tunga partiklar. Vi kan få misstankar om att dessa finns om vi kan göra mätningarna tillräckligt precisa. Det är fallet för en del mätningar från LHCb experimentet och $(g-2)_\mu$, vilka har givit inspiration till nya mätningar.

Ett av senaste årens mest diskuterade frågor är de hypotetiska leptokvarkarna — en sorts hybridpartiklar som vid höga energier kan anta egenskaper från såväl lepton- och kvarkfamiljerna. De introduceras ofta i teorier som försöker förena de elektromagnetiska, svaga och starka fundamentala krafterna som aspekter av samma kraft. Leptokvarkar förväntas vara kortlivade, men med ett karakteristiskt sönderfall till både leptoner och kvarkar. Detta är därmed en typiskt exempel på ett projekt där man letar efter ”för mycket”. Många andra hypotetiska partiklar, till exempel supersymmetriska sådana, ger liknande signaler av ”för många” standardmodellspartiklar. Av den anledningen är det alltid viktigt att utforma sin mätning på ett sätt så man inte stirrar sig blind på endast en modell — kanske en analys som började som ett intresse för supersymmetri också kan hitta nya, exotiska Higgsbosoner?!

Förutom att notera avvikelser i räknehastigheten av partiklar, har experimentalfysikerna också en del knep för att upptäcka ny fysik. Två sådana exempel är guppjakt (eng. *bump hunting*) och okonventionella signaturer. I det förra fallet utnyttjar vi att en kombination av den kinematiska informationen från partiklar från ett sönderfall av partikel X ger den invarianta massan av X, medan samtidigt kombinationer av orelaterade partiklar ger en mjuk, avtagande funktion. Detta var det som hjälpte oss att upptäcka Higgsbosonen (se artikeln av Jonas Strandberg i den här volymen av Kosmos) samt många andra partiklar. Metoden används fortfarande i sökandet efter nya tunga partiklar med enkla sönderfall, till exempel Z' -bosoner (Figur 1): hypotetiska tyngre kopior av Z-bosonen. I figuren illustreras också det relativa förhållandet mellan datan och det förutspådda resultatet, vilket blir betydligt sämre vid just större massor, där det är som mest intressant. Osäkerheterna är dock stora, markerat med vertikala linjer för datapunkterna och det grå området runt noll. Grafen ger än så länge inte evidens för annat än att det är svårt att förutspå den mest energirika delen helt korrekt.

Andra mer eller mindre tydliga tecken på ny fysik, kan vara när partiklar verkar bete sig annorlunda än hur partiklar normalt betar sig. Det kan vara långlivade partiklar, där man kanske ser partikelspåren börjar senare än förväntat från ett snabbt sönderfall, eller tecken på högjoniserande partiklar, vilka kan härstamma från magnetiska monopoler. Det finns även hypotetiska par-



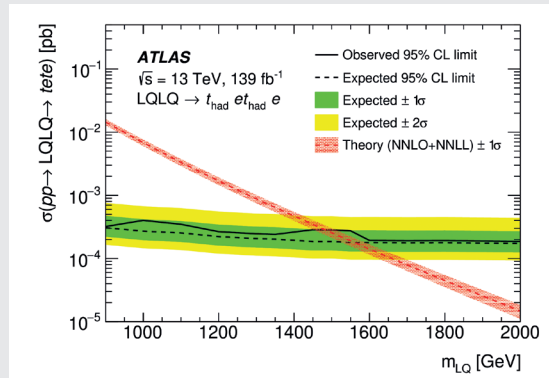
Figur 1: Ett exempel på en guppjakt från CMS där den invarianta massan för alla elektronpar har mätts (svarta punkter). I figuren visas också förväntningarna från standardmodellen (de färgade ytorna, uppdelade efter källor). Längst till höger har ritats in hur figuren skulle kunna se ut om det fanns gravitoner (hypotetiska kraftbärare för tyngdkraften) eller extra Z-bosoner (från *J. High Energ. Phys.* **2021**, 208 [2021]).

tiklar som är så speciella att de inte ens förväntas kunna ses i en standarddetektor.

Oavsett metod måste vi ha ett gemensamt sätt att peka på eventuella observationer av nya partiklar, eller graden av överensstämmelse med standardmodellen. I partikelfysik anger vi vanligen detta med standardavvikelse, där allt över tre standardavvikelse betecknas som en observation (alltså en avvikelse från standardmodellen) och allt över fem standardavvikelse som en upptäckt (av till exempel Higgsbosonen). För en normalfördelad funktion svarar tre och fem standardavvikelse mot konfidensintervall på 99,73% respektive 99,99994%. I bägge dessa fall är det alltså mycket sannolikt att ett dylikt mätresultat skulle vara ett tecken på ny fysik (se också faktaruta).

Att tolka icke-observationer

Med så mycket att leta efter, och med så många idéer, är det uppenbart att större delen av vårt sökande visar vad som *inte* finns bortom standardmodellen. Givetvis kan vi inte helt och hållet utesluta någonting, men vi kan sätta gränsvärden på hur frekvent eller hur massivt detta något i så fall skulle vara, med en viss sannolikhet. Denna information är mycket viktig som återkoppling till de som utvecklar nya analyser och nya modeller. De sprids både som vanliga publikationer med "Search for ..." i titeln men också via databaser. Figuren visar ett exempel på ett sådant gränsvärde från ATLAS-experimentet.



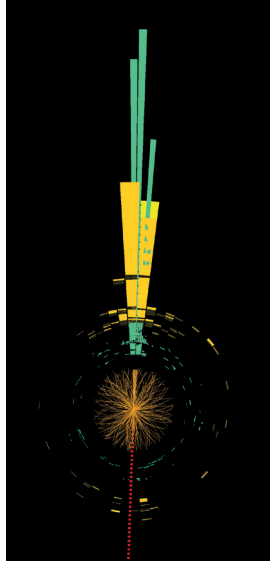
Detta är ett standardexempel, där fysiker vill undersöka om det finns tecken på leptokvarkar i datamängden, i detta fall med sönderfall till toppkvarkar och elektroner. Tvärsnittet (y -axeln) för denna process beror svagt på hypotetiska leptokvarkarnas massa (x -axeln). Figuren visar vilket tvärsnitt som analysen förväntas vara känslig för. Detta är den streckade linjen. Analysen kan inte säga någonting alls om hurvida leptokvarkar finns eller inte om tvärsnittet för deras produktion är mindre än cirka 10^{-4} pb (pikobarn, 10^{-12} barn). Över linjen däremot kan vi förvänta oss dra någon slutsats om det är kinematiskt intressant. För att värdera detta innehåller figuren också en röd linje som visar vilket tvärsnitt en teoretisk modell förutspår. Både den förväntade känsligheten och den teoretiska linjen har osäkerheter inlagda för att visa storleksordningar. Detta blir som mest intressant när man lägger till det faktiska observerade resultatet: den heldragna svarta linjen. Överensstämmelsen mellan den streckade (förväntade) och den observerade linjen visar om allt föll ut som förväntat (det vill säga standardmodellen vann igen), eller om det finns tecken på avvikelser. I det specifika fallet ovan stämmer graferna överens inom en standardavvikelse så tyvärr inga tecken på leptokvarkar. Skärningen mellan den heldragna svarta linjen och den röda linjen ger oss även ett gränsvärde för massan — om dessa leptokvarkar existerar måste de vara tyngre än $1480 \text{ GeV}/c^2$.

Förlorad energi och andra partikelsignaturer

För att förstå vilka partiklar som finns gömda i datamängden kan olika detekteringstekniker användas för att avgöra att här var det sannolikt en elektron, en foton, eller en neutron etc. De stora experimenten vid LHC använder sig av senaste detektionstekniker, men grundtanken är väl provad vid andra accelerators: runt kollisionspunkterna byggs upp lager av instrument, där det första är en spårdetektor för att se laddade partiklar. Detta följs av en kalorimeter som mäter energin, samt eventuellt andra instrument som är anpassade till myoner, tidsmätningar, eller övriga partikelidentifikationsdetektorer. Många kända elementarpartiklar är dock för kortlivade för att detekteras direkt. Istället använder vi sönderfall och andra spår för att fastslå att här var partikel X. Ett specialfall är myonen, som ju sönderfaller med en livstid på två mikrosekunder. Vid de energier som normalt erhålles vid LHC är myonerna tillräckligt relativistiska för att tidsförlängningen från speciell relativitetsteori¹ är så stor att de lever längre och i praktiken uppträder som stabila partiklar i detektorerna. Kvarkar (förutom toppkvarkarna, som sönderfaller ytterst snabbt) är speciella i och med de att genom en process som kallas hadronisering hinner ge upphov till en stor mängd partiklar innan vi kan detektera dem. Hadronisering innebär att högenergiska kvarkar (och gluoner) kombineras med andra kvarkar och bygger upp nya partiklar, hadroner. Det är effekterna av dessa skurar av många nya partiklar som vi kan se i våra detektorer. Vi kallar dem ”jets”. Exakt hur dessa skurar ser ut beror på vilka partiklar det handlar om och just detta är en del av det vi kan utnyttja när vi letar exotiska partiklar. Bland annat kan det finns skillnader i hur stora och utbredda skurarna blir, om det är ett omedelbart sönderfall eller om skuren är lite tidsförskjuten.

En viktig signatur för exotiska partiklar är obalans i energin — där en viss del av rörelsemängden bärs bort av partiklar vi inte ser i en typisk detektor, antingen för att de växelverkar ganska svagt eller på sätt vi inte är beredda på. Dessa partiklar kan vara neutriner, men också mörk materia eller gravitoner, om dessa finns. Ett tydligt exempel kan ses i Figur 2, där det syns en jet uppåt med hög energi (1,9 TeV — storleken illustreras av de färgade blocken) och där allt annat har mycket låg energi. Det finns därför en klar

¹ Livstiden modifieras med en faktor $(1/\sqrt{1-(v/c)^2})$ där v är myonens hastighet och c är ljushastigheten.



Figur 2: Exempel på energiobalans (grafik: CERN).

obalans; den röda, streckade linjen visar beräknad obalans. För att kunna vara säker på att en obalans härrör från partiklar som inte detekterats (och inte detektorproblem) behövs noggrann övervakning och kalibrering av detektorerna. Även myonerna måste delvis tas hänsyn till, eftersom också de tar med sig odetekterad energi. Om det är så att en partikel bara växelverkar ganska svagt, men hinner sönderfalla innan den lämnar de aktiva detektorerna, har vi ändå en chans att upptäcka den. Det finns nya initiativ för svagt växelverkande partiklar. Ett sådant nytt experiment är FASER, som finns endast en halv kilometer från ATLAS experimentet. FASER kommer att leta efter lätta och mycket svagt växelverkande partiklar, inklusive neutriner och nya fenomen som kan förklara mörk materia. Mer specifikt vill man detektera partiklar som flyger ut från kollisionerna i ATLAS i banor nära accelerators strålrör, där det inte finns aktiva detektorer som kan upptäcka dem nära ATLAS. Men om de lever tillräckligt länge kan i stället FASER upptäcka dem.

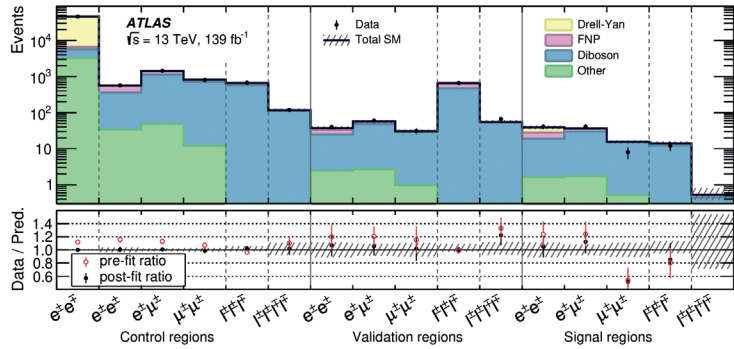
Blind analys och kontroller

Under sökandet efter ny fysik väljs vanligen en av två strategier för analys av data: antingen bestämmer man sig för att pröva specifika

förutsägelser och hypoteser eller så gör man mer inkluderande undersökningar av olika sluttillstånd, där det finns en chans att hitta tecken på sådant som teorin ännu inte har förutspått. Det finns fördelar med båda. Den förra strategin är optimerad för det förväntade och ger ett bättre resultat än den senare, om det man letar efter faktiskt finns. Så där det finns tillägg till standardmodellen som förefaller mer sannolika än andra är den första strategin rätt väg att gå. Detta gällde till exempel både sökandet efter Higgsbosonen och supersymmetriska partiklar i LHCs barndom (Higgsbosonen fanns, men alla utom de mest invecklade versionerna av supersymmetri verkar uteslutna idag). Strategi två fungerar bättre om man inte säkert vet var man ska leta, och minskar risken att missa någonting. Bägge strategierna har använts under hela LHCs livstid, även hybridversioner där analysens sökstrategi är ganska inkluderande, men där resultaten tolkas för specifika modeller. Även maskininlärning har länge använts i LHCs analyser, men allt eftersom både data och analys har blivit mer komplicerade och alla lågt hängande frukter plockats, implementeras dessa inlärningsalgoritmer i stort sett överallt i analyser och i utläsningen av instrumenten.

Sökandet efter något bortom standardmodellen handlar därmed mycket om att först etablera standardmodellen och sedan se om det finns tecken på något utöver den. Med så många möjliga signaturer, och de tekniska utmaningarna i att förstå vad vi ser, finns alltid en risk att missa någonting eller att övertolka data och tro sig se någonting i en vanlig kvantfluktuation. Därför utformas nästan alla mätningar där man letar efter nya partiklar som så kallade blinda analyser. Det betyder inte att fysikerna famlar i blindo, men att man väntar så länge man kan innan man tittar närmare på den del av datamängden som skulle kunna innehålla den nya fysiken. Man ”blindar” den mest spännande kinematiska regionen (signalen) och öppnar den först när man är klar med alla andra kontroller. Kontrollerna handlar oftast om att undersöka vilka andra fysikaliska processer som skulle kunna ge ett liknande resultat som det man hoppas på. I ovannämnda CMS-exempel, där man letade efter Z' till leptoner, fanns mycket annat med i bilden, från vanliga Z -bosoner till produktion av andra standardmodellpartiklar. Detta annat kallas *bakgrunden*; det som finns där och kan likna det vi letar efter.

Vad som är bakgrund beror därför på vad vi letar efter just



Figur 3: Exempel på resultat från en blind analys från ATLAS med kontrollmätningar (Kontroll- och valideringsregionerna) och slutmätningar (signalregionen) [från *Eur. Phys. J. C* **83**, 60 (2023)].

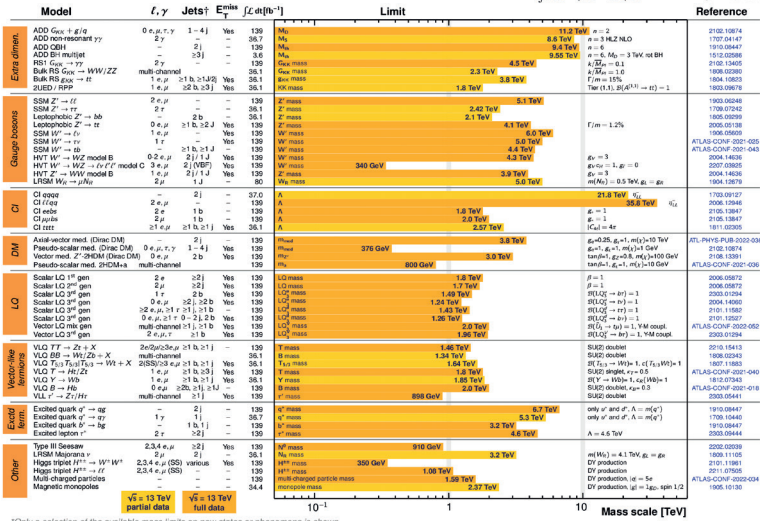
då — nuförtiden kan Higgsbosoner vara en del av bakgrunden för nya mätningar! Ofta kan vi få fram denna bakgrund genom simuleringar av standardmodellfysiken, men ibland fungerar det bättre att använda datadrivna metoder för att få fram hur bakgrunden egentligen ser ut. Sedan måste man bekräfta att det blev rätt, innan man börjar titta efter eventuell ny fysik. Ett exempel från ATLAS illustreras i Figur 3, där det sluttillstånd som undersöks innehåller många elektroner och myoner. Eftersom elektroner och myoner identifieras på olika sätt i en detektor finns det olika källor till mätosäkerhet, och därför har man valt att inte ha en utan flera signalregioner för att förbättra den statistiska analysen av resultaten. Signalregionerna är de fem kolumnerna till höger i bilden i Figur 3. Innan man börjar titta på signalregionerna måste man vara övertygad om man har rätt bakgrundsbeskrivning. Det görs i detta fall i första hand i panelen till vänster, där normaliseringsfaktorerna för de dominerande bakgrunderna erhålls genom att anpassa en statistisk funktion till data. I mittpanelen dubbelkontrolleras att de faktorer man fick ut till vänster faktiskt fungerar. Om överensstämmelsen med standardmodellen i mittpanelen är god är det extra spännande att se eventuella avvikelser i högerpanelen. I vårt exempel finns dock inga signifikanta avvikelser, bara fluktuationer av förväntad storlek. All information samlas i tabeller och databaser. Figur 4 visar ett enkelt exempel.

ATLAS Heavy Particle Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: March 2023

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 13$ TeV



*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter (J).

Figur 4: Exempel på gränsvärden för nya partiklar på ATLAS experimentets hemsida i augusti 2023. Dessa gränsvärden har beräknats utifrån många olika mätningar samt statistisk analys (figur från CERN).

Anomalier

I en miljö där tusentals analyser utförs kommer det givetvis alltid finnas anomalier som till synes strider mot fysikens standardmodell, men som ännu inte är tillräckligt säkra för att betraktas som upptäckter. De flesta av dessa är bara statistiska fluktuationer och försvinnar vid nästa uppdatering med ny data. Ett aktuellt exempel är B^+ -mesonen som enligt standardmodellen kan sönderfalla till kaoner och antingen elektroner eller myoner. År 2021 publicerade LHCb-samarbetet ett resultat där det såg ut som om det uppstod sönderfall till elektroner 15% oftare än till myoner, med mer än tre standardavvikelser. Förutom en statistisk fluktuation skulle detta kunna orsakas av påverkan från partiklar bortom standardmodellen. Nya resultat publicerades 2022 från just denna mätning där allt såg helt normalt ut. Det betyder dock inte att vi kan säga att allt är bra med leptonsönderfallen för exotiska partiklar. LHCb har många andra mätningar där man hittar skillnader mellan standardmodellens förväntningar och mätningarna, speciellt i sönderfall som involverar bottenkvarkar. Vid kolliderare i Japan och USA har man också sett antydningar till udda resultat och därmed är just bottenkvarkar extra spännande för sökandet

efter fysik bortom standardmodellen. Att det just ses i LHCb experimentet är också rimligt: dess detektorer utformades för att i detalj studera sönderfallet av partiklar som innehåller tunga kvarvar, så att man kan samla in indirekta antydningar om fenomen som kan påverka dessa partiklars beteende.

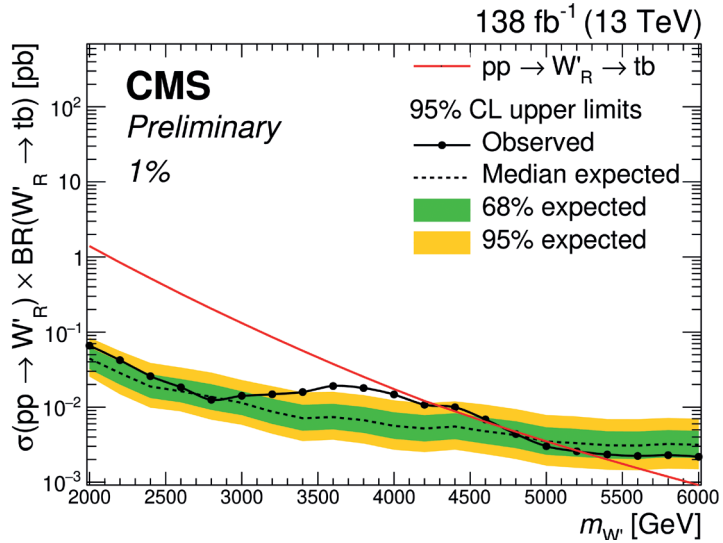
LHCb har under åren varit mycket framgångsrik i sina mätningar av CP-brott inom och bortom standardmodellen. CP står för *Charge* och *Parity* och är en symmetri som är bevarad för de flesta typer av växelverknings (det vill säga man får samma grundläggande fysik om man tittar i en spegel och byter laddning på partiklarna — i grund och botten en symmetri mellan beteendet av partiklar och anti-partiklar), dock inte alltid för svag växelverkan. Dessa effekter kan bidra till att förklara varför vi till synes lever i ett materieuniversum. Forskarna, i synnerhet vid LHCb, har under åren upptäckt ett flertal nya källor till CP-brott, dock ännu inte så det räcker för att förklara asymmetrin i universum.

CMS och ATLAS är mer allmänt inriktade experiment men de kan vad LHCb inte kan: kombinera all kollisiondata för att direkt leta efter de exotiska partiklar som skulle kunna orsaka anomalier, till exempel leptokvarvar. CMS-samarbetet presenterade på sommarkonferenserna 2023 ett resultat från sökandet efter leptokvarven som visar på en avvikelser — fortfarande för liten för att vara ett riktigt tecken på ny fysik. Om leptokvarvar existerar kan de även vara en del av förklaringen till avvikelserna i vissa av LHCb-resultaten och myonens magnetiska moment (se nedan). CMS och ATLAS letar också fortfarande efter nya, Higgsliknande partiklar som skulle sönderfalla till två fotoner på samma sätt som standardmodellens Higgsboson, men med en annan invariant massa. Det skapades rubriker 2015 när båda experimenten tycktes se tecken på en extra Higgsboson i datamängden. Den fluktuationen försvann, men nyligen har den dykt upp återigen men en mindre massa, och vi kommer inte att veta om det också är en fluktuation förrän mer data analyserats.

Ett annat spännande resultat uppdagades under sökandet efter hypotetiska tunga, långlivade laddade partiklar i ATLAS. Nästan alla mätningar och fördelningar stämmer överens med förväntningarna från standardmodellen, med undantag för en ackumulering i ett litet kinematiskt hörn som svarar mot hög massa och stark jonisering. Precis vad man skulle förvänta sig om dessa hypotetiska partiklar fanns! Mätningen visar att det handlar om

sju möjliga kandidater, som svarar mot lite mer än tre standardavvikelser. Massan skulle i så fall vara runt $1,4 \text{ TeV}/c^2$, det vill säga åtta gånger tyngre än den tyngsta elementarpartikeln vi känner till, toppkvarken. Dessa sju händelser undersöks nu i detalj; det finns ännu ingen slutsats. Det man kan se är tyvärr att tidsmätningarna i de yttre detektorsystemen tydligt visar att inget av kandidatspåren kommer från långsamma (i relation till ljusets hastighet) partiklar. Därmed är de nog inte ett resultat av nya, massiva partiklar. Men kanske det är en annan sorts fysik bortom standardmodellen?

Ytterligare aktuellt exempel på en mindre avvikelse, cirka två standardavvikelser, är resultatet från CMS-experimentets senaste sökande efter W' -bosoner, se Figur 5. Modeller med Z' - och W' -bosoner som kopplar företrädesvis till tredje generationens fermioner är av särskilt intresse, eftersom de kan vara inblandade i förklaringen till anomalierna inom b-fysiken eller i Higgsmekanismen. En särskilt viktig roll i detta sammanhang spelas av toppkvarken, som både har en stark koppling (Yukawakoppling) till Higgsbosonen och en distinkt experimentell signatur på grund av sin sönderfallskedja. Denna typ av mätningar, där man letar efter Z' - och W' -bosoner som kopplar företrädesvis till tredje generationens kvarkar och leptoner, har därför utförts tidigare med både data från CMS och ATLAS experimenten. Nu finns det dock ett nytt resultat med mer data från ATLAS. W' antas sönderfalla direkt till en toppkvark och en bottenkvark, och toppkvarken sönderfaller till ytterligare en bottenkvark samt en standardmodell W -boson, som i tur sönderfaller till en lepton och en neutrino. För att försöka rekonstruera ett gupp som visar massan av W' måste man därför kombinera kinematiska mätningar av två jets, en lepton och en neutrino (från energiobalansen), något som kräver mycket god förståelse för alla delar av detektorn. Resultatet är ännu inte tillräckligt för att vara riktigt intressant om man helst vill se ny fysik, men vi kan inte heller bekräfta standardmodellen just runt potentiella W' massor på $3,8 \text{ TeV}/c^2$. Just här finns en avvikelse för förväntningarna på mer än två standardavvikelser men mindre än tre. Det är en experimentalpartikelfysikers mardröm, för i detta intervall kan vi varken sätta gränsvärden eller påstå att vi har hittat något intressant. Det är bara att vänta på mer information från insamlad data.



Figur 5: Aktuellt resultat från CMS-experimentet som visar dess känslighet för W' -bosoner som funktion av den rekonstruerade massan. På y-axen visas produkten av tvärsnittet och sönderfallstakten till just en topp- och en bottenkvark (figur från CERN).

En avstickare till: $(g-2)_\mu$

Standardmodellen utmanas på alla energiskalor, och resultaten från andra experiment vid andra energier är i högsta grad relevanta för samspelet med resultaten vid hög energi. Detta gäller speciellt mörk materia och även precisionsmätningar. En intressant avvikelse som givit inspiration till många undersökningar vid LHC är mätningen av myonens magnetiska moment, kallad $g-2$, där ett nytt resultat presenterats under sommaren. Det är egentligen samma resultat som tidigare, men med mycket bättre precision, vilket visar att det experimentella resultatet kvarstår, och det överensstämmer inte med den vedertagna förutsägelsen.

Precis som elektroner har myoner en liten inre magnet som, om det finns ett externt magnetfält, precesserar som axeln på en snurra. Precessionsfrekvensen i ett givet magnetfält beror på myonens magnetiska moment, och vanligtvis betecknas myonens gyromagnetiska kvot, förhållandet mellan det magnetiska momentet och rörelsemängdsmomentet, med bokstaven g . På enklaste nivå förutsäger teorin att g ska vara exakt två. Därför är det intressant att mäta avvikelsen från detta, $g-2$. Myonens växelver-

kan med magnetfältet kan beräknas ganska exakt i standardmodellen, men den beräkningen involverar *quantum loops*, kvantslingor, med partiklar som dyker upp i dessa slingor. När mätningarna inte stämmer överens med förutsägelsen kan det vara ett tecken på att det finns någon okänd partikel i looparna!

Den senaste mätningen gjordes av *Muon $g - 2$* experimentet vid Fermilab i USA. En stråle av (anti-)myoner skickades in i en supraleadande magnetisk lagringsring med en diameter på cirka 15 m, där de cirkulerade cirka 1 000 gånger med en hastighet nära ljusets. När en (anti-)myon sönderfaller till en anti-elektron (positron) och två neutriner tenderar positronen att fara iväg i den riktning som myonens spinn pekade. $g-2$ är proportionell mot precessionsfrekvensen och magnetfältets styrka och det är dessa två faktorer som experimentet mäter. Detektorer på insidan av lagringsringen fångar upp en del av de positroner som slungas iväg av precesserande myoner. Spår-detektorer rekonstruerar myonstrålens profil från positronernas banor, och kalorimetrar registrerar positronernas energi över tid, så forskarna kan se hur mycket den ursprungliga myonens spinn har roterat. Resultatet blir en invecklad funktion av precessionsfrekvensen som därmed kan extraheras från datamängden. Magnetfältet måste också mätas exakt, och övervakas och kartläggas ofta; detta med precision eftersom det är en av de dominerande systematiska osäkerheterna. Läger man ihop allt blir det nya experimentella mätresultatet:

$$g-2 = 0,00233184110 \pm 0,00000000043 \text{ (stat.)} \pm 0,00000000019 \text{ (syst.)} ,$$

där de två sista siffrorna representerar de statistiska och systematiska osäkerheterna.

Detta är mer än fem standardavvikelse från förutsägelsen från standardmodellen! Därmed kan vi vara ganska säkra på att det finns något att lära sig. Dock är det inte nödvändigtvis ett tecken på nya partiklar eller fundamentala krafter. Det finns också en annan teoretisk förutsägelse, där man använder en metod kallad *latticeQCD*, som ligger betydligt närmare det experimentella värdet, men med betydligt större osäkerhet. Mer detaljer om teorin bakom detta finns i artikeln av Nils Hermansson-Truedsson i denna volym av Kosmos.

Avslutningsord

Så vad vet vi om fysik bortom standardmodellen? Under senaste åren har vi lärt oss mycket mer om standardmodellen, men också om var den inte räcker till. När vi tittar på de experimentella resultaten får vi en tydlig bild på unika egenskaper hos partiklarna, som går utöver standardmodellen. Bland annat att tunga partiklar som innehåller bottenkvarkar kan ha mycket speciella sönderfall, och myonerna verkar vara mer magnetiska än vad vi trodde. Det verkar finnas partiklar vi ännu inte hittat och dessutom vet vi redan att neutriner är tyngre än standardmodellen förutspår. Hur många av dessa avvikelser kommer att kvarstå och blir delar av en ny standardmodell?



Vidare läsning

The ATLAS Collaboration. (2023). *ATLAS experiment* CERN.
<https://atlas.cern>

The CMS Collaboration. (2023). *CERN Accelerating science*
CERN. <https://cms.cern/collaboration>