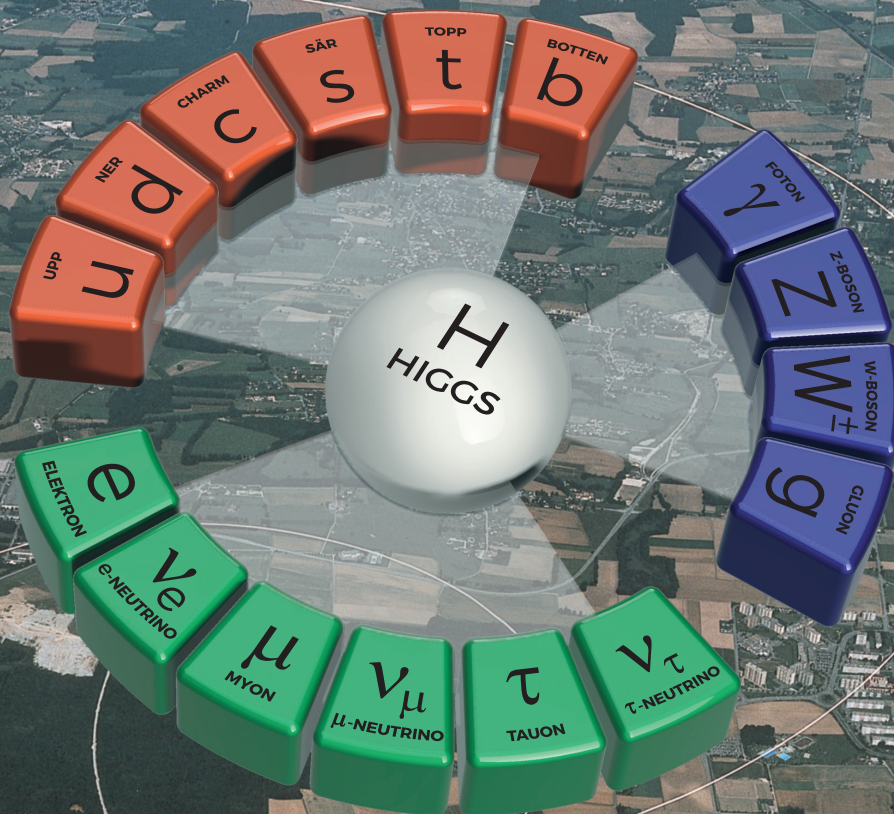


KOSMOS

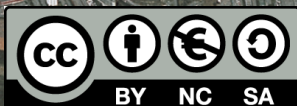
STANDARDMODELLEN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2023



STANDARDMODELLEN

© RIKARD ENBERG



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



Rikard Enberg

är teoretisk fysiker och forskar om partikelfysik, Higgsmekanismen, fysik bortom standardmodellen och astropartikelfysik. Han disputerade vid Uppsala universitet, har därefter arbetat i Paris, Berkeley och Arizona, och är sedan 2011 universitetslektor vid Uppsala universitet.

Foto: Mikael Wallerstedt

Årets Kosmos handlar om standardmodellen och i detta första bidrag har vi bett Rikard Enberg om en pedagogisk genomgång av vad standardmodellen innebär. Rikard förklarar standardmodellens struktur och förklaringsmönster, och han beskriver vad materia egentligen är enligt modellen. Några nyckelbegrepp introduceras också.

Bilden: Representation av standardmodellens partiklar och krafter skapad med AI-verktyget Midjourney

Standardmodellen

När Fabiola Gianotti och Joe Incandela, partikelfysiker vid CERN utanför Genève, sommaren 2012 skulle presentera nya resultat vid en presskonferens var det många som anade vad de skulle berätta. De var vid den tiden ledare för två av de sammanslutningar av tusentals fysiker, ATLAS och CMS, som tillsammans gör experiment vid varsin gigantisk partikeldetektor vid CERNs stora hadronkolliderare LHC, och de hade kallat till presskonferens för att berätta om en gemensam upptäckt. De hade till sist upptäckt den enda partikeln som saknades i standardmodellen: Higgsbosonen. Denna upptäckt var så viktig att de fysiker som 50 år tidigare teoretiskt föreslagit existensen av Higgsbosonen och det besläktade Higgsfältet belönades med 2013 års Nobelpris i fysik.¹ Efter den här upptäckten är standardmodellen komplett.

Standardmodellen är namnet på den teori som beskriver materiens uppbyggnad på den minsta storleksnivån. Det är en teori som får partikelfysiker att både fyllas av stolthet och förtvivlan — det är en fantastisk teori som har testats genom oräkneliga experiment, och den är förklaringsmässigt tillsammans med kvantmekaniken grunden för all annan fysik och kemi. Den kan beskriva nästan alla observerade partikelegenskaper. Men det är inte hela historien. Det är också en lite märklig teori och den innehåller fröet till sin egen otillräcklighet genom att den inte beskriver gravitationen och inte förklarar Higgsfältet på ett tillfredsställande sätt. Det finns en rad andra fenomen som standardmodellen inte kan beskriva, men trots detta har teorin passerat alla experimentella

¹François Englert och Peter Higgs fick priset för att de teoretiskt förutsagt Higgsfältet och Higgsbosonen under första hälften av 60-talet. Om inte Englerts medförfattare Robert Brout gått bort året innan upptäckten skulle han delat priset med Englert och Higgs.

tester den utsatts för. Alla partikelfysiker hoppas det ska dyka upp något tecken på en spricka i standardmodellen som kan leda oss rätt när vi försöker hitta en mer fullständig teori, men om och om igen har sådana experimentella tecken visat sig bero på statistiska fluktuationer eller problem med experimenten.

Higgsbosonen är en av nycklarna till att förstå standardmodellen och dess begränsningar; det är den minst undersökta och minst förstådda delen av standardmodellen, och den enda parametern i standardmodellen som vi inte ännu kunnat mäta har att göra med Higgsbosonen. I den här artikeln ska vi försöka förstå allt detta. Men vi ska börja med att fråga oss vad materia egentligen är.

Vad är materia?

De fasta material, gaser och vätskor som vi ser omkring oss består av molekyler och atomer som krockar med varandra och hålls ihop av olika typer av krafter. Molekylerna i sin tur består av atomer sammanfogade på olika sätt. Krafterna som verkar mellan molekyler och atomer består av olika varianter av elektromagnetiska krafter. Den enklaste atomen, väteatomen, består av en enda elektron som är bunden till en atomkärna bestående av en enda proton. Om man skulle förstora denna väteatom till samma storlek som en fotbollsplan så skulle protonens storlek vara som ett pepparkorn i mitten av fotbollsplanen.² Atomkärnan är alltså mycket mindre än atomen själv. Men själva elektronen och protonen som utgör väteatomen — vad består de av? Vad består materia av?

Inom partikelfysiken betraktar vi allting i universum som uppbyggt av mindre byggstenar, som i sig själva inte har några mindre beståndsdelar. Byggstenarna är det vi kallar *elementarpartiklar*, eller, kort och gott, *partiklar*. Alla de saker vi kan se runt omkring oss med våra egna ögon här på jorden, alla stjärnor, galaxer, nebulosor och andra objekt ute i universum vi betraktar genom teleskop, alla de bakterier, celler eller mikroorganismer vi kan se med optiska mikroskop eller mer kraftfulla elektronmikroskop, är sammansatta av elementarpartiklar.

Det här sättet att se på världen som uppbyggd av en sorts minsta, odelbara beståndsdelar går tillbaka till både klassisk indisk filosofi och den grekiska antiken. Atomisterna Leukippos och De-

²Med samma förstoring skulle en människas längd vara någonstans mellan radien hos Jupiters och Saturnus banor runt solen.

mokritos menade att allting består av odelbara atomer, men även tidigare menade filosofer att allting bestod av en enda substans. För Thales från Miletos var det vatten och för Anaximenes var det luft. Gemensamt hade de en materialistisk idé om att man kan komma fram till vad materien består av och att det den består av är någon typ av fundamentala beståndsdelar. Det som skiljer den moderna vetenskapen från den antika filosofin är att vi nu har en kvantitativ vetenskap där vi kan göra *beräkningar* som kan testas i *experiment*. På grund av detta vet vi att vår teori stämmer inom sitt tillämpningsområde, till skillnad från de förmoderna filosoferna.

Standardmodellens struktur

Standardmodellen beskriver att materien är uppbyggd av en uppsättning elementarpartiklar. I Faktaruta 1 beskrivs vilka dessa partiklar är. Det finns två grupper av partiklar: fermioner och bosoner, där fermioner är ”materiepartiklar” och bosoner är ”kraftpartiklar”. Fermionerna delas upp i kvarkar och leptoner.

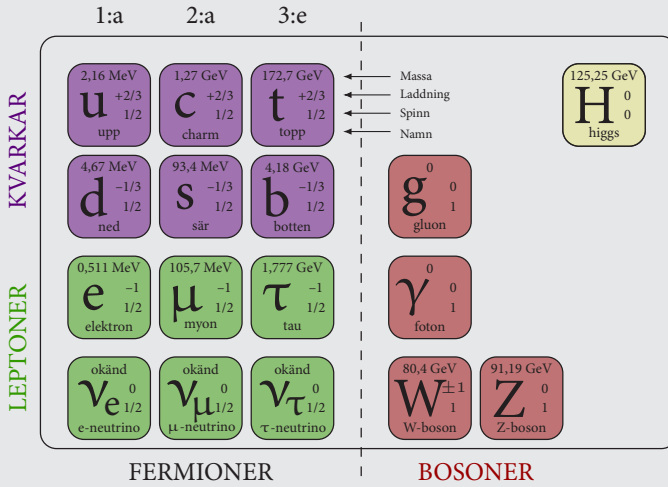
Förutom att standardmodellen säger *vad* allt består av säger den också *hur* materien sitter ihop. Partiklarna som bygger upp allting hålls samman av fyra olika naturkrafter — den starka och den svaga kraften, den elektromagnetiska kraften samt gravitationskraften. Av dessa fyra är det bara den elektromagnetiska kraften och gravitationen som vi märker av i vardagen. Gravitationskraften är den mest bekanta: den håller oss kvar på jorden och håller jordklotet i sin bana runt solen. Gravitationen är dock inte en del av standardmodellen; där finns bara de andra tre krafterna. Vi kan känna elektrostatiska krafter som statisk elektricitet och magnetiska krafter från magneter men Maxwell upptäckte på 1800-talet att dessa två krafter i själva verket är olika aspekter av samma naturkraft: den elektromagnetiska kraften.

Men de starka och svaga naturkrafterna, vad gör de? Vi ser inte av dem till vardags, men den starka kraften är ansvarig för att vi har atomkärnor, som är uppbyggda av protoner och neutroner. Protonerna och neutronerna är också sammansatta. De består av elementarpartiklar som kallas kvarkar. Den starka kraften binder ihop olika kombinationer av kvarkar till protoner och neutroner³ och har fått sitt namn därför att den är mycket starkare än de andra krafterna, men bara på små avstånd i storleksordningen av en atomkärnas utsträckning (några femtometer). Den svaga kraften

³Se Karin Schönningss artikel i denna upplaga av Kosmos.

FAKTARUTA 1: Sammanfattning av standardmodellen

Standardmodellen har tre sorters partiklar: först ett antal materiepartiklar, som bygger upp materien, därefter ett antal kraftpartiklar som överför den starka kraften och den elektrosvaga kraften, och till sist Higgspartikel. Se tabellen nedan för en översikt.



Massorna anges i så kallade naturliga enheter, som alltid används inom partikelfysiken. Man anger då massenergin enligt $E = mc^2$ i MeV eller GeV istället för att ange massan. Laddning anges i enheter av elektronens elementarladdning $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C. Spinn anges i enheter av Plancks reducerade konstant \hbar . Neutrinernas massor är inte kända, men det finns olika experimentellt bestämda begränsningar på deras massor. Till exempel har KATRIN-experimentet begränsat elektronneutrinons massa till som mest 0,8 eV.

Kraftpartiklarna har spinn ett och är därför bosoner. (Man kan bevisa detta inom kvantfältteorin genom att utgå ifrån att spinn är en relativistisk egenskap hos partiklar.) De kallas med ett gemensamt namn för *gaugebosoner* och är tolv till antalet.

Först har vi åtta olika gluoner, den starka kraftens kraftpartiklar. Gluoner är masslösa och elektriskt neutrala. De bär dock en annan sorts laddning som kallas färgladdning, som är vad som särskiljer dem från varandra. I övrigt är de identiska. Gluoner växelverkar bara med färgladdade partiklar, vilket i standardmodellen innebär kvarkar och andra gluoner.

Därefter har vi fyra olika kraftpartiklar för den elektrosvaga kraften. En av dem är fotonen, ljusets partikel. Den är masslös och elektriskt neutral och överför den elektromagnetiska kraften, som är en del av den elektrosvaga kraften. Fotoner växelverkar bara med elektriskt laddade partiklar, men har även en ”effektiv växelverkan” med oladdade partiklar som kvantmekaniskt kan fluktuera till par av elektriskt laddade partiklar. På grund av detta kan t.ex. neutrala pioner eller Higgsbosoner sönderfalla till ett par av fotoner. De andra tre elektrosvaga kraftpartiklarna kallas för W^+ , W^- och Z^0 , där \pm eller 0 anger deras elektriska laddning. Dessa tre kraftpartiklar är annorlunda, för de är inte masslösa. De är istället mycket tunga jämfört med andra partiklar: det är bara Higgsbosonen och toppkvarken som är tyngre. De växelverkar bara med partiklar som har elektrosvag laddning, vilket innebär Higgsbosoner och samtliga materiepartiklar (och även fotoner). Till skillnad från gluoner och fotoner så har de, på grund av sina stora massor, en mycket kort räckvidd, och den svaga kraften är därför begränsad i sin räckvidd. Gluoner har också begränsad räckvidd, men det har en helt annan förklaring, nämligen det som kallas *inneslutning*.

Materiepartiklarna har alla spinn $1/2$ och är fermioner. Man brukar helt enkelt kalla dessa för ”fermioner”, trots att fermioner kan ha vilket halvtaligt spinn som helst. Fermionerna ordnas sedan i två undergrupper: kvarkar och leptoner. Kvarkarna bär färgladdning och växelverkar därför genom den starka växelverkan. De har också elektrisk laddning och växelverkar därför också genom den elektromagnetiska kraften. Leptonerna har ingen färgladdning och känner därför inte av den starka kraften. Leptonerna finns också i två sorter: laddade leptoner och neutriner. Alla typer av fermioner känner dock av den svaga kraften. Varje materiepartikel har ett ”syskon” med annorlunda elektrisk laddning (de skiljer sig åt med en enhet laddning: uppkvarken har laddning $+2/3$ och nedkvarken $-1/3$; elektronen har laddning -1 och neutrinet är neutralt). Det finns också tre grupper av varje typ av materiepartikel. Dessa grupper brukar kallas familjer eller generationer. All vanlig materia runt omkring oss byggs upp av bara tre av dessa materiepartiklar: elektroner, uppkvarkar och nedkvarkar. Till sist har vi Higgsbosonen eller Higgspartikeln som beskrivs nedan.

Förutom detta finns *hadroner*, sammansatta partiklar som består av kvarkar bundna till varandra. Hadroner kan antingen vara mesoner, som består av en kvark och en antikvark, eller baryoner, som består av tre kvarkar. Hadroner hålls samman av den starka kraften mellan kvarkarna, och innehåller förutom kvarkarna en fluktuerande, komplicerad ”sjö” av gluoner.

är som namnet antyder svag, mycket svagare än den starka och den elektromagnetiska kraften, och också den har en begränsad räckvidd. Den är till exempel viktig i radioaktiva sönderfall (betasönderfall), i solens energiproduktion och i medicinsk avbildning.⁴ I den teoretiska beskrivningen av standardmodellen är den elektromagnetiska kraften förenad med den svaga naturkraften och bildar en enda elektrosvag kraft.

Faktaruta 1 visar de partiklar som ingår i standardmodellen, med tre generationer av materiepartiklar, ett antal kraftpartiklar samt Higgsbosonen. I princip kan allting under normala förhållanden på jordklotet beskrivas av bara partiklar från den första generationen: elektroner, uppkvarkar och nedkvarkar. Upp- och nedkvarkarna bygger upp de protoner och neutroner som atomkärnorna består av, och tillsammans med elektroner bildar de atomer.

De mer exotiska partiklarna förekommer nästan bara i samband med rymden och i fysikexperiment. (Neutriner är ett undantag: de bildas i betasönderfall och förekommer i stora mängder i kärnreaktorer.) Till exempel består mycket av den kosmiska strålningen som når jordens yta av myoner. Myonen är en tyngre kopia av elektronen som tillhör den andra generationen — den har exakt samma egenskaper som en elektron förutom att den är tyngre. På grund av att den är tyngre är den inte stabil, utan kan sönderfalla till en elektron och två neutriner. Halveringstiden för ett sådant sönderfall är någon mikrosekund. Motsvarande gäller för alla de tyngre partiklarna: de är instabila och sönderfaller inom en bråkdel sekund till lättare partiklar. Uppkvarkar och elektroner är däremot stabila och sönderfaller inte. Detsamma gäller såvitt vi vet protoner — eller åtminstone så har de en halveringstid längre än 10^{34} år! Neutroner å andra sidan är lite tyngre än protoner och sönderfaller därför genom betasönderfall till en proton, en elektron och en antineutrino. Anledningen till att partiklar kan sönderfalla är Einsteins $E = mc^2$. Den tyngre partikelns massa ger energi, som kan omvandlas till ny massa för de lättare partiklarna i sönderfallsprodukterna.

Myonerna från rymden bildas i partikelkollisioner i atmosfären då en partikel från yttre rymden kolliderar med en av luftens atomkärnor. Ungefär 200 sådana myoner träffar varje kvadratmeter av jordens yta varje sekund, och du kanske har sett spåren av

⁴Se Kosmos 2022 för mer om detta.

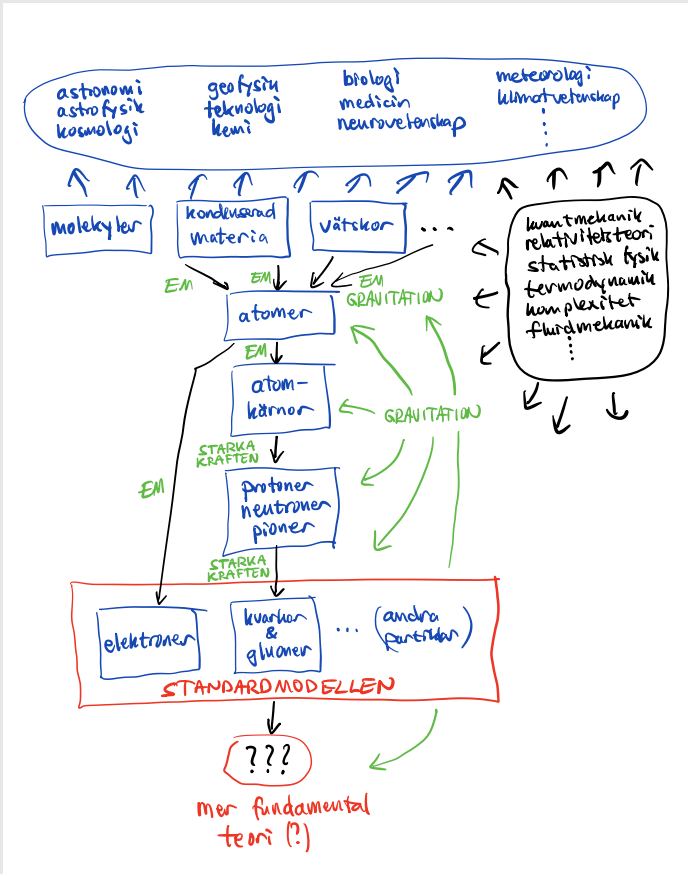
dem i en dimkammare om du haft möjlighet att se ett sådant experiment. Det bildas också mängder av neutriner i atmosfären och en del andra partiklar som inte finns på jorden. Dessutom skapas tyngre partiklar i atmosfären, även om det är sällsynt. Den kosmiska strålningen från yttre rymden har ibland ofantligt hög energi. Till exempel går det att räkna ut att det i jordens atmosfär skapas en Higgsboson var tionde sekund, men på det stora hela är de mer exotiska partiklarna ovanliga.

Standardmodellens förklaringsmönster

Det finns nivåer i fysikens beskrivning av världen, där den minsta nivån — den mest fundamentala — beskrivs av de partiklar och krafter som ingår i standardmodellen. De partiklarna bygger sedan upp, på högre och högre nivåer, de atomkärnor, atomer, molekyler, gaser, vätskor, kristaller, metaller och andra fasta material som jag beskrev ovan. Sedan kommer också sådant som kemiska reaktioner, biologiska material och organismer, och allt annat som ingår i världen och som beskrivs av de olika naturvetenskaperna. I Faktaruta 2 finns en beskrivning av detta, med pilar som visar hur förklaringarna flödar. Atomer, till exempel, kan förklaras med hjälp av mindre beståndsdelar och på samma sätt kan biologiska organismer förklaras i termer av molekyler, atomer och kemiska processer. Det här betyder inte att man kan sätta sig ner och beräkna hur en biologisk organism beter sig utifrån standardmodellens krafter och partiklar — det är inte vad jag menar med ”förklara” i det här sammanhanget. Det jag menar är istället att partikelfysikens fundamentala lagar ligger under atom- och molekylfysikens lagar, som i sin tur ligger under kemins lagar, och så kan man fortsätta. I den meningen är standardmodellen den ultimata teorin som förklarar allt. Men i praktiken är det inte så enkelt, och de olika naturvetenskaperna finns av en anledning: de har alla sina egna lagar och metoder, som inte direkt bygger på de underliggande förklaringsmönstren.

Men gravitationen då? Gravitationskraften är den kraft som vi är mest bekanta med av alla krafter, men den var inte med i diskussionen ovan. Det beror på att den inte är med i standardmodellens beskrivning av världen. I våra bästa teorier beskrivs gravitationen på ett helt annat sätt än de starka, svaga och elektromagnetiska krafterna, nämligen med den allmänna relativitetsteorin. Det har visat sig svårt att kombinera den beskrivningen med den

FAKTARUTA 2:
Förklaringsmönster inom naturvetenskapen



Denna figur visar hur ”förklaringspilarna” flödar mellan olika nivåer inom den moderna naturvetenskapen. Varje nivå har sin egen teori-bildning som i olika grad bygger på nivåerna under.

kvantmekaniska teorin eftersom det leder till matematiska orimligheter i form av divergenser och oändligheter. Det skulle bära iväg för långt från ämnet att diskutera vad det beror på, men det är faktiskt möjligt att kombinera kvantmekaniken med gravitationen om man begränsar sig till situationer när gravitationen inte är så stark. En sådan teori fungerar för det mesta vi kan träffa på, förutom vissa extrema system som det tidiga universum, svarta hål och neutronstjärnor.

Varför ser standardmodellen ut som den gör?

Standardmodellen ser vid en första anblick lite stökig ut. Den har många olika partiklar och krafter, med olika elektriska laddningar och massor, och det tog många år av experimenterande och teoretiserande innan alla partiklar och krafter kunde sättas ihop till en enhetlig teori. Men nu när vi har den är den oundviklig. När vi har förstått de teoretiska grunder den vilar på vet vi att den inte kunde sett ut på något annat sätt.

Standardmodellens namn är lite missvisande: det är inte någon *modell*, utan snarare en *teori*, vilket är den mest etablerade typen av teoribildning inom vetenskapen. Teorin är i form av en så kallad kvantfältteori (se Faktaruta 3), ett teoretiskt ramverk där kvantmekaniken kombineras med den speciella relativitetsteorin. Man kan därför beskriva partiklar som rör sig nära ljushastigheten på ett kvantmekaniskt sätt, och man kan ta hänsyn till Einsteins ekvivalens mellan energi och materia som säger att energi kan omvandlas till partiklar och tvärtom.

Standardmodellen bygger på tre teoretiska principer, samt på att man observerat en uppsättning elementarpartiklar. Dessa tre krav är *Lorentzinvarians*, *gauge symmetri* och *renormerbarhet*. Från detta kan man bygga upp hela standardmodellen.

Lorentzinvarians betyder att teorin lyder under den speciella relativitetsteorin, så att ingenting kan färdas snabbare än ljuset och att ekvationer i olika inertialsystem är relaterade genom Lorentztransformationer.⁵

Gauge symmetri är ett speciellt exempel på en symmetri. Inom fysiken är en symmetri en egenskap hos ett objekt där det finns någon operation som kan göras utan att en viss egenskap hos objektet förändras. En sådan kallas en symmetrioperation och om det finns en symmetrioperation finns en motsvarande symmetri. En enfärgad boll kan man rotera utan att den ser ut att förändras, den har rotationssymmetri. En vanlig fotboll med det klassiska mönstret med fem- och sexkantiga fält är inte symmetrisk på samma sätt eftersom den ser annorlunda ut om den roteras en godtycklig vinkel. Men den ser likadan ut om man väljer att rotera specifika vinklar.⁶

⁵Se Kosmos 2021 för mer om relativitetsteorin.

⁶Fotbollen har därför en annan sorts symmetri: den är en sfärisk stympad ikosaeder, och har därför samma symmetri som en ikosaeder, en tjugosidig polyeder.

FAKTARUTA 3: Kvantfältteori

En kvantfältteori är en kvantmekanisk teori kombinerad med den speciella relativitetsteorin. Den vanliga kvantmekaniken med vågfunktioner som uppfyller Schrödingerekvationen är inte kompatibel med relativitetsteorin, eftersom vågfunktioner alltid beskriver system med ett fixerat antal partiklar. Man kan till exempel definiera en vågfunktion för en elektron som påverkas av ett elektrostatiskt fält, eller för en väteatom som innehåller en elektron och en proton. Men i relativitetsteorin har vi $E = mc^2$, som tolkas som att massa och energi kan omvandlas till varandra. Det betyder att om det finns tillräckligt mycket energi kan det bildas nya partiklar med massa $m = E/c^2$. Omvänt kan en elektron och en positron (en antielektron) kollidera och annihilera varandra så det bildas fotoner som bär bort den tillgängliga energin. Fotoner är masslösa, så hela mass-energin hos elektron-positronparet omvandlas till rörelseenergi hos fotonerna.

I kvantfältteorin beskrivs istället alla partiklar som små kvantmekaniska excitationer i ett fält. Varje partikel, som de i standardmodellen, har ett sådant fält associerat med sig, och krafter mellan partiklar beskrivs i kvantfältteorin som utbyte av kraftpartiklar: gaugebosoner. Varje kraft har sina egna gaugebosoner. Det finns också ett fält för varje materierpartikel: elektronen har ett elektronfält och uppkvarken har ett uppkvarksfält. Higgsfältets excitationer motsvarar Higgsbosonen.

En partikel är alltså en excitation, eller fluktuation, i ett fält. Två partiklar motsvarar en dubbel excitation. Antalet partiklar kan därför variera genom att det sker fler eller färre excitationer av fältet. I kvantfältteorin är det dessa fält som är de huvudsakliga objekten man arbetar med istället för vågfunktioner.

Kvantfältteori är ett teoretiskt ramverk som kan användas för att beskriva olika fysikaliska teorier. Standardmodellen är en sådan teori, men kvantfältteori används också för att beskriva helt andra objekt som supraledare eller det tidiga universum. En given kvantfältteori specificeras av vilka fält som ingår (i standardmodellen motsvarar detta vilka partiklar som ingår) och hur de olika fälten växelverkar med varandra. Detta specificeras i sin tur av teorins *Lagrangefunktion*, som är en funktion som talar om vilka fält som finns, vilka spinn och massor de har, vilka andra partiklar de kan växelverka med, och vilka former av växelverkan de har.

Standardmodellens Lagrangefunktion (i en mycket kompakt notation) kan skrivas som:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i \bar{\psi}^i \gamma^\mu D_\mu \psi^i + \left(\bar{\psi}_L^i Y_{ij} H \psi_R^j + \text{h.c.} \right) - |D_\mu H|^2 - V(H) \quad ,$$

där $F_{\mu\nu}$ är en förkortning av fälten för alla gaugebosonerna, ψ är en förkortning för alla fermioner (dvs. kvarkar och leptoner), H är Higgsfältet och V dess potentiella energi. D_μ är en notation som används i gauge-teori och betyder en kombination av en derivata och ett gaugefält. Vi ska inte gå in på hur Lagrange-funktionen ska tolkas, men varje term har en matematiskt specifik mening: den talar antingen om hur ett fält beter sig när det inte växelverkar (vilket kallas att det propagerar) eller hur partiklar som ges av fältet växelverkar med andra partiklar.

När partiklar växelverkar eller propagerar, till exempel i kollisioner eller sönderfallsprocesser, brukar man illustrera detta med *Feynmandiagram*, som är grafiska bilder av hur olika processer går till. Dessa är mycket användbara inom partikelfysiken och används rikligt i litteraturen. Se Faktaruta 4 för mer om Feynmandiagram.

En kvantfältteori ger åtminstone i princip metoder för att utifrån Lagrange-funktionen, precis matematiskt räkna ut allt det som vi vill veta om teorin och dess partiklar.

När det gäller gaugesymmetri handlar det om en mer abstrakt typ av operationer, som man kan tolka som rotationer i olika typer av ”inre” matematiska rum. Idén är att de fält som beskriver partiklar i kvantfältteorin inte är observerbara i sig. Det är bara vissa fysikaliska storheter kallade ”observabler” som går att observera. Det kan finnas många olika arrangemang av fält som ger samma värden på en observabel.

Ta det elektriska fältet \mathcal{E} som exempel: det är en observabel därför att om en känd elektrisk laddning q utsätts för en kraft $\mathbf{F} = q\mathcal{E}$ i fältet \mathcal{E} kan detta mätas genom att mäta kraften på en känd laddning. Den elektrostatiske potentialen ϕ är däremot inte observerbar, utan där finns en symmetri. Vi kan nämligen göra en abstrakt symmetrioperation på potentialen: vi adderar en konstant α så att vi istället för ϕ får $\phi + \alpha$. Men potentialen $\phi + \alpha$ ger *samma* elektriska fält, eftersom fältet ges av derivatan av potentialen, $\mathcal{E} = -\nabla(\phi + \alpha) = -\nabla\phi$. Det finns en motsvarande relation mellan vektorpotentialen \mathbf{A} och magnetfältet $\mathcal{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ och man kan därför på samma sätt addera en konstant vektor till \mathbf{A} utan att förändra magnetfältet.

Den kvantfältteori som beskriver den elektromagnetiska kraf-

ten kallas QED (för *Quantum Electrodynamics*) och är en del av standardmodellen. Det är en relativistisk teori och den måste därför formuleras på ett relativistiskt invariant sätt, vilket innebär att man inte använder de elektriska och magnetiska fälten utan istället potentialerna ϕ och \mathbf{A} kombinerade till en relativistisk *fyrvektor* $A^\mu = (\phi/c, A_x, A_y, A_z)$, som har både ϕ och \mathbf{A} som komponenter. Det är denna A^μ som kallas det elektromagnetiska fältet i QED. Man kan alltså addera en konstant fyrvektor till detta elektromagnetiska fält, som *inte* är observerbart, utan att förändra de *observerbara* elektriska och magnetiska fälten.

Vi har alltså en symmetri, eftersom operationen att addera en konstant ger en egenskap som är oförändrad. Denna symmetri kallas en gaugesymmetri, och detta är det enklaste exemplet på en sådan. Själva operationen kallas en gauge transformation. Det här är dessutom en symmetri vi är bekanta med, nämligen att vi bara kan detektera skillnader i elektrisk potential, det vill säga elektrisk spänning. Det spelar ingen roll för elektriska kretsar vilken potential vi säger är noll volt. Vi kan alltid ändra nollpunkt, vilket motsvarar att addera en konstant till potentialen ϕ . Det finns oändligt många olika potentialer som ger samma utfall av mätningar, så det finns ett överskott i den teoretiska beskrivningen som sällas bort med hjälp av gaugesymmetrin.

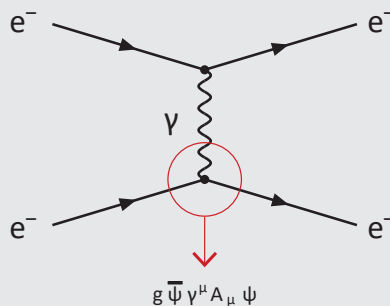
Det finns andra mer matematiskt komplicerade symmetrier som vi kan utvidga begreppet med, men den viktigaste är om vi gör symmetrin till en *lokal symmetri*, som tillåter olika symmetrioperationer på olika platser. Istället för att addera en konstant till fältet adderar vi då en *funktion* som har olika värde på olika platser. Då kommer inte observabler automatiskt att vara oförändrade, men det kan kompenseras genom att lägga till ett ytterligare fält som hjälper till att bevara symmetrin. Detta ytterligare tillägg kallas ett gaugefält och kopplar samman fält på olika platser på ett sådant sätt att teorin med den adderade funktionen ger samma utfall av experiment som innan.

Sådana gaugefält är i sig också kvantfält som beskriver partiklar, och dessa partiklar visar sig ha spinn ett. De är alltså bosoner, och kallas därför gaugebosoner. En av de stora upptäckterna i den teoretiska fysiken är att alla kraftpartiklar i naturen är sådana gaugebosoner. En gaugeboson motsvarar en gaugesymmetri, och omvänt ger en sådan symmetri en gaugeboson. Det finns

FAKTARUTA 4: Feynmandiagram

Feynmandiagram är ett sätt att visa i bilder hur olika processer (det vill säga växelverkningar av partiklar) i kvantfältteori äger rum, och ger också ett recept för att matematiskt beräkna den kvantmekaniska sannolikheten för dessa. De introducerades av Richard Feynman som en effektiv metod för beräkningar, men de ger också en mental bild av en växelverkan.

Ett exempel på detta visas i figuren nedan, där två elektroner kolliderar med varandra genom att utbyta en foton. Det är alltså den elektromagnetiska kraften som leder till denna växelverkan. I bilden kan man tänka sig en *tidsaxel* horisontellt och en *rumssaxel* vertikalt och att diagrammet illustrerar förloppet i tid och rum.



Egentligen är dock ett Feynmandiagram en formell beskrivning av den matematiska formeln för att beräkna den kvantmekaniska *sannolikhetsamplituden*. Varje linje i ett Feynmandiagram beskriver hur en partikel rör sig och motsvarar en specifik faktor i det matematiska uttrycket. Varje *vertex*, där tre eller fler linjer möts, beskriver en *växelverkan* mellan partiklar (punkterna i figuren). Dessa motsvarar också en matematisk faktor i uttrycket för amplituden och innehåller bland annat en fysikalisk parameter, en kopplingskonstant, som anger styrkan på växelverkan — i bilden kallas denna g . Den inringade vertexpunkten i bilden motsvarar en fundamental process där en foton växelverkar med en elektron och på så sätt överför den elektromagnetiska kraften. Uttrycket som visas i bilden är den term i Lagrangefunktionen^a som beskriver just denna växelverkan: här representerar $\bar{\psi}$ och ψ in- och utgående elektronfält, A^μ är det elektromagnetiska fältet, det vill säga fotonen, g är en parameter som mäter styrkan på kraften och γ^μ är en så kallad Diracmatris. I fallet QED är denna parameter lika med elektronens elektriska laddning.

^aI uttrycket för Lagrangefunktionen i Faktaruta 3 är denna term implicit inbakad i den andra termen i Lagrangefunktionen.

Att denna term finns i Lagrangefunktionen visar just det faktum att en foton kan koppla till en elektron, och från termen kan man enligt kvantfältteorins regler avläsa att när ett Feynmandiagram ska översättas till en formel motsvarar detta vertex en faktor $ig\gamma^\mu$.

Ofta används Feynmandiagram på båda dessa sätt: som ett sätt att tänka på hur olika processer kan gå till på ett intuitivt sätt, och för att räkna ut motsvarande sannolikhetsamplituder, vilket är något fysikstudenter lär sig i kurser i kvantfältteori.

alltså en gaugesymmetri för varje naturkraft. I standardmodellen har vi tre olika krafter: de starka, svaga och elektromagnetiska krafterna, med de sista två kombinerade till en enda elektrosvag. De beskrivs av varsin symmetri som har de matematiska beteckningarna $SU(3)$, $SU(2)$ och $U(1)$, och den kombinerade gaugesymmetrin för hela standardmodellen kallas $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. (Symmetrier beskrivs matematiskt av en gren av matematiken som kallas grupp teori. $SU(3)$ är namnet på en specifik grupp som beskriver en specifik typ av symmetri, och även $SU(2)$ och $U(1)$ är sådana grupper.)

När vi väl kommit fram till vad standardmodellens symmetrier är följer alla detaljer om krafterna och hur de påverkar olika partiklar. Det finns ingen frihet att ändra något. Det beror på att gaugesymmetrin dikterar vilka typer av växelverknings mellan olika slag av partiklar som är möjliga eftersom de annars inte respekterar symmetrin. Mer exakt uttryckt: den dikterar vilka termer i Lagrangefunktionen (se Faktaruta 3) som är möjliga. Det går inte att lägga till vilka kombinationer av fält som helst, utan de måste vara invarianta när en gauge transformation görs. Detta bekräftas av de experiment som gjorts: Vi har bara observerat växelverknings experiment som dikteras av gaugesymmetri.

Kraven från relativitetsteorin och gaugesymmetri kompletteras av kravet på *renormerbarhet*. Detta är en princip om att vi vill ha en teori som, med godtyckligt vald noggrannhet, ger unika förutsägelser utifrån ett ändligt antal naturkonstanter. När man beräknar observabler i en kvantfältteori får man ofta integraler som ger oändligheter (det vill säga man får divergenta generaliserade integraler). I en viss typ av kvantfältteorier kommer alla dessa oändligheter att ta ut varandra, så att för varje oändlighet så finns det alltid en annan oändlighet med motsatt tecken så att slututtrycket blir ändligt. En teori som har den egenskapen kallas

renormerbar, och vi kräver att standardmodellen ska vara en sådan teori. Det ger ytterligare en begränsning på hur olika partiklar kan växelverka med varandra.

Om vi nu tar alla de observerade elementarpartiklar som vi vet finns, och konstruerar en Lorentzinvariant kvantteori, får vi en kvantfältteori. Om vi sedan postulerar att teorin ska ha en viss gaugesymmetri får vi en teori med standardmodellens observerade krafter, men oändligt många möjligheter för växelverkningar mellan de olika partiklarna. Om vi till sist vill att teorin ska vara renormerbar får vi en enda unik kvantfältteori, eftersom de flesta av de växelverkningar som uppfyller de första två kraven faller bort under kravet om renormerbarhet. Alla termer i teorins ekvationer är då bestämda, med vissa fria parametrar. Teorin är unik. Detta är förstas tillfredsställande från ett teoretiskt perspektiv. Dock vet vi inte varför det är just dessa partiklar vi ska stoppa in — det är bara ett empiriskt faktum. Vi vet heller inte varför det är just den här uppsättningen av olika naturkrafter vi har. (Det var förstas inte så här det gick till historiskt när standardmodellen växte fram — detta handlar om teorins logiska struktur.)

Higgsbosonen och Higgsmekanismen

Gaugesympmetrier tillåter inte att standardmodellens partiklar har massa. Kraftpartiklarna i en gaugeteori saknar alltid massa, men de elektrosvaga gaugebosonerna W^\pm och Z^0 är inte masslösa — istället är de bland de tyngsta partiklarna.⁷ Betyder det att beskrivningen av teorin i förra avsnittet faller? Svaret på den frågan är precis vad Nobelpriset 2013 handlade om — att den elektrosvaga gaugesymmetrin inte syns i vår värld. Istället säger man att symmetrin är spontant bruten.

Ett klassiskt exempel på en symmetri som blir spontant bruten är en blyertspenna som står och balanserar på spetsen. Detta system har en cylindersymmetri, det vill säga att pennan kan falla omkull i vilken riktning som helst. Ekvationerna som beskriver systemet talar inte om åt vilket håll den kommer falla. Men likväl kommer pennan att falla, och när den gör det bryts den ursprung-

⁷Detsamma gäller för standardmodellens fermioner: de får inte heller ha massa eftersom det inte går att konstruera en gaugesymmetrisk teori med sådana fermioner som i standardmodellen, det vill säga *kirala* fermioner, där det är skillnad på höger- och vänsterhända fermioner. (Höger- och vänsterhänthet för elementarpartiklar har att göra med om deras spinn pekar åt samma håll som deras rörelsemängdsvektor eller åt motsatt håll.)

liga symmetrin. När pennan ligger ned har den tidigare cylinder-symmetrin brutits, eller gömmts undan. När pennan står på spetsen befinner den sig i ett instabilt tillstånd med högre potentiell energi och när den ligger ned är den i ett stabilt tillstånd med lägsta möjliga potentiella energi, det vill säga det som brukar kallas grundtillståndet.

Grundtillståndet har alltså en annan symmetri än tillståndet med högre energi. Detta är kärnan i spontant symmetribrott. I standardmodellen råkar den elektrosvaga gaugesymmetrin ut för ett spontant symmetribrott där det istället för den potentiella energin hos en penna handlar om den potentiella energin hos Higgsfältet, som är en ny ingrediens i standardmodellen. På samma sätt som pennan pekar ut en riktning när den fallit pekas ett specifikt värde på Higgsfältet ut när det fallit ned till sitt grundtillstånd, och detta värde på fältet är inte förenligt med den ursprungliga symmetrin, vilket gör att symmetrin bryts. Det leder till att det finns ett konstant Higgsfält som genomsyrar hela universum. Detta fält ger massa till partiklar genom att de växelverkar med Higgsfältet när de rör sig genom rummet, vilket vi observerar som en trög massa.⁸

Detta är ursprunget till Higgsfältet — det är en teoretisk upptäckelse för att lösa problemet med att gauge-teorin inte tillåter partiklar med massa. Men ett fält i en kvantfältteori motsvarar en partikel, och den partikeln är Higgsbosonen. I och med att den upptäcktes 2012, och att LHC-experimenten därefter observerat och mätt de flesta av de olika växelverknings som Higgsbosonen förutsågs ha, bekräftades idén om att alla partiklar får massa på grund av *Higgsmekanismen*, som detta kallas.

Den elektrosvaga gaugesymmetrin bryts inte fullständigt — av den ursprungliga symmetrin som har fyra gaugebosoner före det spontana symmetribrottet återstår en symmetri som har en enda gaugeboson: fotonen. Den kvarvarande symmetrin motsvarar den elektromagnetiska kraften. Eftersom det fortfarande finns en gaugesymmetri rörande fotonen förblir den masslös. Detsamma gäller för den starka kraften som inte berörs av symmetribrottet så de åtta gluonerna förblir också masslösa.

Symmetribrottet är inte bara en teoretisk abstraktion, utan

⁸Enligt relativitetsteorin rör sig masslösa partiklar alltid med ljusets hastighet, som fotoner, medan partiklar med massa alltid rör sig med lägre hastigheter. Omvänt, om en partikel bromsas och rör sig med hastighet lägre än ljusets så har den massa.

det skedde genom en fysikalisk process i det tidiga universum, omkring en pikosekund efter big bang, som slutade med att universum hamnade i det grundtillstånd med spontant bruten symmetri som det befinner sig i nu. Denna *fasövergång* innebar en förvandling från ett universum med en enda elektrosvag kraft med oändlig räckvidd och masslösa kraftpartiklar som rör sig med ljusets hastighet, till ett universum med många olika partikelmassor där den elektrosvaga kraften delats upp i en svag och en elektromagnetisk kraft — den förra med kort räckvidd och den senare med oändlig. Universum före och efter fasövergången har mycket olika egenskaper och helt olika förutsättningar för att bilda strukturer som galaxer, stjärnor, planeter och levande organismer. Det är därför i någon mån Higgsfältets egenskaper som bestämmer hur universum fungerar, så för fysiker är det viktigt att få så mycket information som möjligt om Higgsmekanismen och Higgsbosonen.

Vi har dock inte ännu kunnat mäta en av Higgsfältets kopplingskonstanter som brukar kallas λ . Det är en parameter som talar om hur starkt en Higgsboson växelverkar med andra Higgsbosoner, och den är viktig för att veta hur den potentiella energin för Higgsfältet ser ut. Detta är en av de stora utmaningarna för LHC-experimenten under de kommande åren.⁹

Kanske man kan få mer information genom att studera hur symmetrin bröts? Fasövergången ägde rum mycket tidigt i universums historia och det är svårt att se hur man ska kunna veta vad som hände då. Men det finns ett sätt som teoretiskt skulle kunna hjälpa oss, beroende på hur fasövergången gick till, det vill säga om det var en abrupt fasövergång som påminner om när vatten kokar eller om det var en mer kontinuerlig övergång som påminner om hur metaller magnetiseras. Idén är att en abrupt fasövergång genererar gravitationsvågor som uppkommer av våldsamma kollisioner och vibrationer av bubblor som bildas i processen. Det byggs just nu framtida observatorier för gravitationsvågor som är tänkta att kunna detektera de som bildas i en sådan fasövergång, till exempel LISA-observatoriet. Det är ett planerat rymdbaserat experiment bestående av tre satelliter med en laserinterferometer som arbetar efter samma princip som LIGO, experimentet som var först med att detektera gravitationsvågor.¹⁰

⁹Se Jonas Strandbergs artikel i denna upplaga av Kosmos.

¹⁰Se Kosmos 2021 för mer läsning om gravitationsvågor och deras detektion.

Fysik bortom standardmodellen

Den som tar en titt på samlingen av partiklar i Faktaruta 1 och försöker få grepp om deras elektriska laddningar, massor och spinn, och vilka partiklar som kan växelverkar med vilka, kan få en känsla av att standardmodellen är sammanfäst av lite olika beståndsdelar som råkade hamna tillsammans utan någon speciell anledning. Det är inte så tillfredsställande för en teoretisk fysiker, som vill ha vackra eller enkla teorier med en bakomliggande princip eller symmetri. Vi har de principer som diskuterades ovan som hjälper oss att skriva ner en unik teori, men vi har inga principer som talar om varför det är just dessa partiklar som finns, varför det finns tre generationer, och varför vi har dessa gaugesymmetrier.

Vi har experimentellt observerat alla de partiklar som ingår i standardmodellen, och vi har mätt alla fria parametrar utom Higgsfältets kopplingskonstant λ . Alla dessa mätningar stämmer mycket väl överens med vad man förväntar sig teoretiskt.

Vi förstår däremot inte varför Higgsmekanismen fungerar som den gör och *varför* den elektrosvaga symmetrin bryts. Det finns ingenting i standardmodellen själv som hjälper oss, utan vi har bara en beskrivning av hur det går till när Higgsfältet ger massa till de andra partiklarna som är tillagd för hand och senare motiverad av att den beskriver allt vi vet om standardmodellen så väl. För att kunna förstå var det kommer ifrån måste vi gå till teorier bortom standardmodellen.

Det finns en annan brist i standardmodellen: i en rad experiment har det upptäckts att neutronerna inte är masslösa utan har mycket små massor, betydligt mindre än någon annan partikel.¹¹ Standardmodellen säger dock att neutroner är masslösa. De kan inte få massa på samma sätt som andra fermioner, eftersom det saknas en partikel i standardmodellen för att något sådant ska kunna fungera.¹²

¹¹Se Olga Botners artikel i Kosmos 2019.

¹²Partikeln som saknas kallas för en högerhänt neutrino, men det finns inga experimentella indikationer på en sådan partikel. Den förväntas dock vara extremt tung — mycket tyngre än några andra kända partiklar. Det debatteras ibland om huruvida standardmodellen faktiskt säger att neutronerna är masslösa eller inte. På sätt och vis är det en definitionsfråga, men jag menar att det är djupare än så: om man bestämmer sig för att göra en minimal utvidgning av standardmodellen för att ge neutroner massa på samma sätt som elektroner får massa, då måste man lägga till en högerhänt neutrino. Men om man gör det måste man också lägga till andra nya växelverknings, och detta vore defini-

Vidare är alla hadroner, det vill säga sammansatta partiklar som består av kvarkar, instabila, utom protoner som antingen är helt stabila eller har en livslängd på över 10^{34} år. Det verkar nästan som om det finns någon princip som förbjuder protoner att sönderfalla. På liknande sätt kan leptoner inte sönderfalla till bara kvarkar, eller tvärtom. Det verkar finnas en princip som förbjuder att antalet protoner och antalet leptoner förändras i reaktioner med elementarpartiklar. Man säger att baryontalet och leptontalet bevaras. Detta skulle kunna vara en bevarandelag av samma typ som att elektrisk laddning bevaras (vilket har att göra med gauge-symmetri i QED som diskuteras ovan), men det finns inget som tyder på det. Istället är det i standardmodellen vad man skulle kunna kalla en oavsiktlig bevarandelag, som bara råkar finnas där utan någon speciell anledning.

Ovanstående är alla brister i själva standardmodellen. Det finns ännu fler brister, och många av dessa har att göra med astronomiska och kosmologiska observationer. Det skulle bli en alldeles för lång artikel om jag skulle ta upp allt detta, men standardmodellen kan inte förklara den mörka materia som förefaller finnas runt galaxer och i universum i stort.¹³ Den kan inte förklara den mörka energin som driver universums accelererande expansion¹⁴ eller varför det finns materia i universum men inte antimateria. Alla de frågor jag tagit upp här är frågor som måste bevaras av fysik bortom standardmodellen.¹⁵

Trots alla dessa brister och skavanker är standardmodellen kanske den mest framgångsrika teori vi har, vilket jag hoppas att jag visat. Om vi upptäcker fysik bortom standardmodellen som löser de frågor jag tagit upp här kan vi räkna med att den ändå kommer finnas kvar som en approximation som även fortsättningsvis förklarar alla de fenomen den förklarar nu. Uppgiften blir då att förstå den nya fysiken teoretiskt och att utforska den experimentellt, och det är detta vi partikelfysiker hoppas på.



tivt att gå bortom standardmodellen. Om man istället inte gör det måste man förklara varför, och det är också att gå bortom standardmodellen.

¹³Se Riccardo Catenas artikel i Kosmos 2019.

¹⁴Se Joel Johanssons artikel i Kosmos 2019.

¹⁵För vidare läsning om fysik bortom standardmodellen, se artiklarna av Else Lytken och Johan Rathsman i denna upplaga av Kosmos.

Vidare läsning

Carroll, S.M. (2012). *The particle at the end of the universe: how the hunt for the Higgs boson leads us to the edge of a new world*. New York: Dutton.

Weinberg, S. (1993). *Dreams of a final theory*. New York: Dutton.

