

Innehåll

Inledning 11

Förord av Steven Weinberg 15

PROLOG Form och substans 21

DEL I Uppfinning

KAPITEL ETT De logiska tankarnas poesi 35

I vilket den tyska matematikern Emmy Noether upptäcker förhållandet mellan bevarandelagar och naturens djupare symmetrier

KAPITEL TVÅ Det duger inte till ursäkt 49

I vilket Chen Ning Yang och Robert Mills försöker utveckla en kvantfältteori för den starka kärnkraften och gör Wolfgang Pauli irriterad

KAPITEL TRE Folk kommer att tro en massa dumheter om det 61

I vilket Murray Gell-Mann upptäcker särheten och den ”åttafaldiga vägen”, Sheldon Glashow tillämpar Yang–Mills fältteori på den svaga kärnkraften och folk tror en massa dumheter om det

KAPITEL FYRA Att tillämpa rätt idéer på fel problem 77

I vilket Murray Gell-Mann och George Zweig uppfinner kvarkar och Steven Weinberg och Abdus Salam använder Higgsmekanismen till att (äntligen!) ge W- och Z-partiklarna massa

KAPITEL FEM Det kan jag göra 95

I vilket Gerard 't Hooft bevisar att Yang–Mills fältteorier kan renormeras och Murray Gell-Mann och Harald Fritzsich bygger en teori för den starka kärnkraften på kvarkars färger

DEL II Upptäckt

KAPITEL SEX Neutrala växelströmmar 111

I vilket det visar sig att protoner och neutroner har en inre struktur och de neutrala strömmar som förutsagts hos den svaga kärnkraften upptäcks, försvinner och upptäcks igen

KAPITEL SJU De måste vara W:n 125

I vilket kvantkromodynamiken formuleras, charmkvarken upptäcks och W- och Z-partiklarna hittas precis på förutspädd plats

KAPITEL ÅTTA Kasta långt 141

I vilket Ronald Reagan ställer sig bakom den Supraledade superkollideraren, men när projektet stoppas av kongressen sex år senare återstår bara ett hål i Texas

KAPITEL NIO Ett fantastiskt ögonblick 153

I vilket Higgsbosonen förklaras i ordalag en brittisk politiker kan förstå, CERN ser en skymt av Higgsbosonen och LHC slås på för att strax därpå explodera

KAPITEL TIO Shakespeares fråga 171

I vilket LHC presterar bättre än någon (utom Lyn Evans) hade väntat sig, data för ett helt år samlas in på några månader och Higgsbosonen får slut på gömställen

EPILOG Hur massan skapas 195

Noter 197

Ordförklaringar 203

Bibliografi 219

Register 221

Inledning

Nyheten att någonting som påminde väldigt mycket om Higgsbosonen hade upptäckts vid CERN i Genève den 4 juli 2012 susade genast iväg runt jorden som ett ytterst smittsamt datorvirus. Rubrikerna ropade ut högenergifysikens senaste triumf. Fyndet var förstasidesstoff. Många av den kvällens nyhetsprogram rapporterade om det, och det nådde flera miljarder människor. Efter 48 år och många miljarder kronor i kostnader hade man äntligen funnit signaler som stämde in på en partikel som hade föreslagits eller ”hitats på” redan 1964.

Så vad handlade alltihop om? Vad är Higgsbosonen, och varför är den så viktig? Om den här nya partikeln verkligen är Higgspartikeln, vad säger det oss i så fall om den materiella världen och om universums tidiga utveckling? Var upptäckten verkligen värd alla ansträngningar?

Svaren på dessa frågor finns i partikelfysikens så kallade standardmodell. Som namnet antyder är denna modell det ramverk som fysiker använder för att förstå de grundläggande beståndsdelarna i all materia och de krafter som håller materien samman eller får den att lösas upp. Modellen har byggts genom många års otrottligt arbete som utgör fysikernas allra bästa försök att tolka den fysiska världen omkring oss.

Än så länge är standardmodellen inte en ”teori för allting”. Den kan inte redogöra för gravitationen. På senare år har du kanske läst om nya, exotiska fysiska teorier som försöker sammanföra de fundamentala krafterna, inklusive gravitationen, till exempel teorier om supersymmetri och supersträngar. Trots alla ansträngningar från de hundratals teoretiker som är inblandade i de projekten är dessa teorier fortfarande rent spekulativa och har endast svagt experimentellt stöd, om ens det. Trots de brister som har upptäckts i standardmodellen sedan den etablerades i slutet av 1970-

talet är det fortfarande där saker händer.

Higgsbosonen är viktig inom standardmodellen eftersom den är ett tecken på att det finns ett Higgsfält, ett annars osynligt fält av energi som genomsyrar hela universum. Utan Higgsfältet skulle de elementarpartiklar som du, jag och hela det synliga universum består av inte ha någon massa. Utan Higgsfältet skulle massan inte kunna bildas och ingenting skulle kunna *finnas*.

Så vi har visst en hel del att tacka det här fältets existens för. Bland annat därför har Higgsbosonen, Higgsfältets partikel, fått stjärnstatus i populärmedia som *gudspartikeln*. Forskare inom vetenskapen tycker hjärtligt illa om den benämningen, eftersom den överdriver partikelns betydelse och drar uppmärksamhet till fysikens och teologins tidvis obekväma förhållande. Vetenskapsjournalister och populärvetenskapliga författare älskar däremot benämningen innerligt.

Många av Higgsfältets förutspådda konsekvenser visade sig i resultaten från experiment i partikelacceleratorer tidigt under 1980-talet. Men att se tecken på att fältet finns är inte detsamma som att upptäcka den fältpartikel som skvallrar om dess existens. Därför är vetenskapen att fältet med största sannolikhet faktiskt existerar oerhört betryggande. Det var mycket möjligt att man inte skulle ha upptäckt någon Higgsboson, och följderna för standardmodellen hade kunnat bli förödande.

Jag började skriva den här boken i juni 2010, två år före upptäckten. Jag hade precis blivit klar med manuskriptet till en annan bok, *The quantum story: A history in 40 moments*. Som titeln antyder skildrar den kvantfysikens historia från år 1900 fram till i dag. I den boken beskrivs standardmodellens utveckling och hur Higgsfältet och dess partikel uppfanns. Några månader tidigare nådde CERN:s accelerator LHC upp i rekordhöga energier på sju biljoner elektronvolt från proton–proton-kollisioner, och då tänkte jag att det *kanske* vore möjligt att man skulle hitta partikeln de närmaste åren. Som tur var hade jag rätt.

The quantum story kom ut i februari 2011. Boken du håller i bygger delvis på den.

Tack till Latha Menon och representanterna för Oxford University Press, som var beredda att ta den risk det innebar att gå med på att ge ut en bok om en partikel som inte hade upptäckts

än. Jag har följt utvecklingarna vid CERN via de offentliga kanalerna, men jag erkänner min tacksamhetsskuld till ett antal bloggare som skriver om högenergifysik, bland andra Philip Gibbs, Tommaso Dorigo, Peter Woit, Adam Falkowski, Matt Strassler och Jon Butterworth. Jag vill också tacka Jon Butterworth, Sophie Tesauri, James Gillies, Laurette Ponce och Lyndon Evans för att de tog sig tid att prata med mig och dela med sig av sin allt större iver. Dessutom vill jag uttrycka min tacksamhet gentemot professorerna David Miller och Peter Woit, som läste och kommenterade mitt första utkast till manuset, och till professor Steven Weinberg, som även han läste igenom utkastet och var vänlig nog att bidra med ett personligt perspektiv i sitt förord. Jag kan garantera att alla återstående fel är mitt eget verk.

Jim Baggott
Reading den 6 juli 2012

Förord

Av Steven Weinberg

Många viktiga vetenskapliga upptäckter har följts av populärvetenskapliga böcker som förklarar upptäckterna för en bredare allmänhet. Men det här är den första bok jag har sett som till större delen skrevs *inför* en upptäckt. Det faktum att den här boken kunde publiceras omedelbart när den nya partikel som verkar vara Higgspartikeln upptäcktes vid CERN (med viss bekräftelse från Fermilab) i juli 2012 vittnar om Jim Baggotts och Oxford University Press otroliga energi och företagsamhet.

Bokens snabba utgivning vittnar också om ett utbrett intresse för upptäckten hos allmänheten. Därför skulle det kanske passa bra om jag kom med några egna kommentarer kring vad vi egentligen har åstadkommit. Det sägs ofta att det som stod i centrum i sökandet efter Higgspartikeln var varifrån massa kommer. Det stämmer, för all del, men förklaringen behöver snävas in en aning.

På 1980-talet hade vi fått fram en välfungerande och heltäckande teori för alla de observerade elementarpartiklarna och krafterna som de utövar på varandra (utom gravitationen). En av de allra viktigaste beståndsdelarna i denna teori är en symmetri, ett slags släktskap, mellan två av krafterna: den elektromagnetiska kraften och den svaga kärnkraften. Elektromagnetismen ger oss ljus, och den svaga kärnkraften gör att partiklar inuti atomkärnorna kan byta identitet i radioaktiva sönderfallsprocesser. Symmetrin i fråga sammanför de båda krafterna till en enda ”elektrosvag” struktur. De allmänna dragen i den elektrosvaga teorin har testats noga. Det är inte dess trovärdighet som har ifrågasatts i den senare tidens experiment på CERN och Fermilab, och teorin skulle inte ha beivrats på allvar ens om man inte hade hittat någon Higgspartikel.

Men en konsekvens av den elektrosvaga teorin är att alla elemen-

tarpartiklar, inklusive elektroner och kvarkar, är masslösa så länge man inte tillför någonting nytt till teorin, och det är de ju inte. Så det behövs någonting mer i teorin, någon ny typ av materia eller fält, som vi inte har observerat än vare sig i naturen eller i laboratoriet. Sökandet efter Higgspartikeln har därför inneburit ett sökande efter svaret på frågan: Vad mer är det som behövs?

Sökandet efter vad det nu var handlade inte bara om att larva omkring i kontrollrummet på högenergireaktorerna och se vad som dök upp. Den elektrosvaga symmetrin, en specifik egenskap i elementarpartikelfysikens bakomliggande ekvationer, måste brytas, så att den inte verkar direkt på de partiklar och krafter vi själva observerar. Ända sedan Yoichiro Nambu och Jeffrey Goldstones arbete år 1960–1961 har det varit känt att sådana symmetribrott är möjliga enligt flera olika teorier, men det såg ut som att de krävde nya masslösa partiklar som man visste inte fanns.

Det var Robert Brout och François Englerts forskning, Peter Higgs forskning samt Gerald Guralniks, Carl Hagens och Tom Kibbles forskning, som de allihop publicerade 1964 oberoende av varandra,* som visade att dessa masslösa Nambu-Goldstone-partiklar försvann i vissa former av teorier och bara tjänade till att ge massa åt partiklar som överförde krafter. Det är det som händer i den teori för svag och elektromagnetisk växelverkan som Abdus Salam och jag förde fram år 1967–1968. Men en fråga återstod ändå: Vad är det egentligen för nytt slags materia eller fält som bryter den elektrosvaga symmetrin?

Det fanns två möjligheter. Enligt den ena genomsyras tomrummet av fält som ännu inte har upptäckts, och på samma sätt som jordens magnetfält skiljer norr från andra riktningar skiljer dessa nya fält svag växelverkan från elektromagnetisk, så att den svaga växelverkans budbärarpartiklar och andra partiklar får massa medan fotonerna (som överför den elektromagnetiska växelverkan) förblir masslösa. Dessa fält kallas ”skalärfält”, vilket innebär att de inte skiljer mellan riktningar i det vanliga rummet, vilket magnetfält gör. Skalärfält av i stort sett det slaget introducerades i Goldstones illustrativa exempel på symmetribrott och senare även i artiklarna från 1964.

* Hädanefter ”artiklarna från 1964”.

När Salam och jag använde ett sådant symmetribrott för att utveckla den moderna ”elektrosvaga” teorin för svag och elektromagnetisk växelverkan antog vi att symmetribrottet orsakades av ett skalärfält av det här slaget som finns i hela rummet. (Sheldon Glashow samt Salam och John Ward hade redan lagt fram en hypotes om en symmetri av samma slag, men inte som ett specifikt drag i teorins ekvationer, så de hade ingen anledning att införa några skalärfält.)

En konsekvens av teorier där symmetrier bryts av skalärfält, inklusive de modeller som övervägdes av Goldstone och i artiklarna från 1964 samt i min och Salams elektrosvaga teori, är att även om vissa av fälten bara tjänar till att ge massa åt budbärrpartiklar så skulle andra skalärfält kunna skapas och observeras i partikelacceleratorer. Salam och jag kom fram till att det behövdes fyra skalärfält i vår elektrosvaga teori. Tre av dem gick åt till att ge massa åt partiklarna W^+ , W^- och Z^0 – de ”tunga fotonerna” – som förmedlar den svaga kraften i vår teori (dessa partiklar upptäcktes vid CERN år 1983–1984 och befanns ha de massor som den elektrosvaga teorin hade förutsagt). Ett skalärfält återstod och tog formen av en fysisk partikel, ett knippe av fältets energi och rörelsemängd. Det är denna ”Higgspartikel” som fysikerna har sökt efter i nästan trettio år.

Men det fanns hela tiden ytterligare en möjlighet. Kanske fanns det inte alls några nya skalärfält som genomsyrade rummet, och ingen Higgspartikel heller. Den elektrosvaga symmetrin bröts kanske i stället av starka krafter, så kallade ”technicolor”-krafter, som verkade på en ny grupp partiklar som var så tunga att vi inte hade observerat dem än. Någonting av det slaget händer vid supraledning. Leonard Susskind och jag föreslog var sin sådan teori för elementarpartiklar i slutet av 1970-talet, och de teorierna skulle ha lett till en hel skog av nya partiklar som hölls samman av technicolorkrafter. Detta är alltså det val vi har stått inför: Skalärfält – eller technicolor?

Upptäckten av den nya partikeln talar klart för att den elektrosvaga symmetrin bryts av skalärfält, inte technicolorkrafter. Det är därför upptäckten är så viktig.

Men mycket återstår att göra innan vi kan vara säkra. Den

elektrosvaga teorin från 1967–1968 förutsåg alla egenskaper hos Higgspartikeln utom dess massa. Nu när massan är känd genom experiment kan vi räkna ut sannolikheten för varje möjligt sätt som Higgspartikeln kan sönderfalla på och se om förutsägelseerna kan bekräftas i ytterligare experiment. Det kommer att ta ett tag.

Upptäckten av en ny partikel som verkar vara Higgspartikeln har givit teoretikerna en svår uppgift att bita i: att förstå dess massa. Higgspartikeln är den enda elementarpartikeln som inte har fått sin massa som följd av den elektrosvaga symmetriens brott. Vad den elektrosvaga teorin beträffar skulle Higgspartikelns massa kunna ha vilket värde som helst. Det var därför varken Salam eller jag kunde förutsäga den.

Det är faktiskt någonting ganska underligt med den massa vi nu observerar hos Higgspartikeln. Man brukar kalla det ”hierarki-problemet”. Eftersom Higgspartikelns massa anger storleksskalan för alla andra elementarpartiklars massa skulle man kunna tänka sig att dess värde låg ganska nära värdet hos en annan massa som har fundamental betydelse inom fysiken, den så kallade Planckmassan. Planckmassan är den grundläggande enheten för massa inom gravitationsteorin (massan hos hypotetiska partiklar som utövar en dragningskraft på varandra som är lika stor som den elektriska kraften skulle vara mellan två elektroner på samma avstånd från varandra). Men Planckmassan är cirka hundra tusen biljoner gånger större än Higgspartikelns massa. Fastän Higgspartikeln är så tung att man måste bygga en enorm partikelkolliderare för att skapa den måste vi alltså ändå fråga oss: Varför är Higgspartikelns massa så liten?

Jim Baggott föreslog att jag skulle ta med några personliga perspektiv på idéers framväxt inom det här fältet. Jag ska bara ta upp ett par saker.

Som Baggott beskriver i bokens fjärde kapitel hävdade Philip Anderson tidigt, före år 1964, att masslösa Nambu-Goldstone-partiklar inte nödvändigtvis följde av symmetribrott. Så varför övertygades jag och andra partikelfysiker inte av Andersons argument? Det speglade definitivt inte någon uppfattning att Anderson inte borde tas på allvar. Av alla de teoretiker som ägnade sig åt den kondenserade

materiens fysik har Anderson klarare än någon annan insett vikten av symmetriprinciper, principer som har visat sig ha avgörande betydelse inom partikelfysiken.

Jag misstänker att många inte trodde på Andersons argument eftersom det byggde på analogier med fenomen som supraledning, som är icke-relativistiska (det vill säga, de äger rum i miljöer där man lugnt kan bortse från Einsteins speciella relativitetsteori). Men att de masslösa Nambu-Goldstone-partiklarna var oundvikliga hade Goldstone, Salam och jag lyckats visa, på ett till synes tillförlitligt sätt, i ett bevis publicerat 1962 som byggde på relativitetsteoriens uppenbara giltighet. Partikelfysikens teoretiker var beredda att tro att Anderson hade rätt i supraledningens icke-relativistiska miljö, men inte inom elementarpartikelteorin, där relativitetsteorin med nödvändighet måste ingå. Av forskningen i artiklarna från 1964 framgick det att Goldstones, Salams och mitt bevis inte kunde tillämpas på kvantteorier med kraftöverförande partiklar, för trots att de fysikaliska fenomenen i sådana teorier visserligen är förenliga med relativitetsprincipen är teoriernas matematiska formulering i en kvantmekanisk miljö inte förenliga med den.

Detta relativitetsproblem var också anledningen till att jag efter 1967, hur mycket jag än försökte, inte kunde bevisa Salams och min hypotes: att alla de orimliga oändligheter som dök upp i den elektrosvaga teorin tog ut varandra, på samma sätt som liknande oändligheter hade visat sig ta ut varandra i kvantteorin för den rena elektromagnetismen. Relativitetsteorin hade varit outhärlig för att demonstrera hur elektromagnetismens oändligheter tog ut varandra. Gerard 't Hoofts bevis från 1971, som Baggott beskriver i kapitel fem, utnyttjar tekniker som 't Hooft hade tagit fram tillsammans med Martinus Veltman. I dessa tekniker utvidgas kvantmekanikens principer så att teorin kan formuleras på ett sätt som är förenligt med relativitetsteorin.

Min andra punkt: I kapitel fyra antyder Baggott att anledningen till att jag inte nämnde kvarkar i min artikel från 1967 där jag förde fram teorin om den elektrosvaga kraften var att jag var bekymrad över problemet att teorin då skulle kunna förutsäga processer där partiklar med så kallad "särhet" ingår, partiklar som i verkligheten inte observerades. Jag kan bara önska att det hade berott på något så

specifikt. Snarare nämnde jag inga kvarkar i teorin av det enkla skälet att jag faktiskt inte trodde på kvarkar 1967. Ingen hade någonsin observerat en kvark, och det var svårt att tro på att det berodde på att kvarkar är mycket tyngre än observerade partiklar som protoner och neutroner, fastän de observerade partiklarna påstods vara uppbyggda av kvarkar.

I likhet med många andra teoretiker accepterade jag inte kvarkarnas existens fullt ut förrän jag såg David Gross, Frank Wilczeks och David Politzers forskning från 1973. De visade att i den teori för kvarkar och stark växelverkan som kallas kvantkromodynamik blir den starka kraften svagare när avståndet minskar. Då gick det upp för några av oss att den starka kraften mellan kvarkarna i så fall, tvärt emot vad intuitionen säger, blir starkare ju längre ifrån varandra kvarkarna kommer, kanske så mycket starkare att kvarkarna aldrig kan skiljas åt. Det finns fortfarande inga bevis för att det är så, men det är den allmänna uppfattningen. I dag är kvantkromodynamiken en mycket grundligt testad teori, men trots det har ingen ännu sett en ensam kvark.

Det glädde mig mycket att den här boken inleds i nittonhundratalets början med Emmy Noether, som först av alla insåg symmetriprincipernas betydelse i naturen. Det påminner en om att det som dagens forskare åstadkommer bara är det senaste steget i en storslagen tradition där vi försöker lista ut hur naturen fungerar och alltid utsätter våra gissningar för experimentell prövning. Jim Baggotts bok borde ge läsaren ett smakprov på detta historiska företag.

Steven Weinberg
Den 6 juli 2012

Form och substans

Vad består världen av?

Sådana enkla frågor har gäckat människans intellekt ända sedan hon fick förmågan till förnuftigt tänkande. Visserligen brukar frågan ställas på ett mycket mer utstuderat och sofistikerat sätt i dag, och svaren har blivit mycket mer komplexa och mycket kostsammare att få fram. Men själva frågan är i grund och botten inte särskilt komplicerad.

För två och ett halvt årtusende sedan hade de gamla grekerna inget annat att gå efter än sin känsla för skönhet och harmoni i naturen och sin förmåga att resonera logiskt och tillämpa fantasin på det de kunde uppfatta med blotta sinnen. I efterhand ter det sig helt otroligt att de kunde komma fram till så mycket som de gjorde.

Grekerna var noga med att skilja på form och substans. Världen består av en materiell substans som kan ta en mängd olika former. På 400-talet f. Kr. föreslog den sicilianska filosofen Empedokles att de många formerna skulle kunna reduceras till fyra grundläggande former, de vi i dag känner som ”de fyra elementen”: jord, luft, eld och vatten. Elementen eller grundämnena ansågs vara eviga och oförstörbara. De drogs till varandra i närmast romantiska föreningar genom Kärlekens attraktiva kraft och skildes åt genom Tve-dräktens repulsiva kraft, och bildade på så sätt allting i hela världen.

Enligt en annan tanketradition som härstammade från fyrahundratalsfilosofen Leukippos (och som är närmast förknippad med hans elev Demokritos) består världen av ytterst små, odelbara, oförstörbara materiepartiklar (så kallade atomer) och tomrum. Atomerna var byggstenarna för all materiell substans och stod för all materia. Atomerna var nödvändiga av rena principskäl, menade Leukippos, eftersom substansen rimligen inte kunde delas hur många gånger som helst. Om det vore möjligt så skulle vi kunna dela substansen i all oändlighet tills ingenting blev kvar,

och det stred uppenbarligen mot den till synes oantastliga lagen om materiens bevarande.

Ungefär hundra år senare utvecklade Platon en teori som förklarade hur atomer (substansen) ordnas till de fyra olika elementen (formerna). Han lät vart och ett av de fyra elementen motsvaras av en geometrisk (eller ”platonisk”) kropp, och menade i *Timaios* att sidan hos varje kropp kunde delas upp ytterligare i ett system av trianglar som motsvarade de atomer som ingick i elementen. Om man ordnade om i atomernas mönster – flyttade omkring atomerna – kunde man omvandla ett element till ett annat och kombinera element för att skapa nya former.*

Det verkar logiskt att det skulle finnas en minsta beståndsdel, en obestridlig verklighet som ligger till grund för den värld vi ser omkring oss och ger den form. Om materien kunde delas om och om igen i all oändlighet, så skulle vi nå en punkt där själva beståndsdelarna blev mer eller mindre flyktiga – och i själva verket knappast fanns. Då skulle inga byggstenar finnas längre, bara växelverkan mellan odefinierbara, substanslösa fantomer som skapar *skenet* av substans skulle återstå.

Det må vara osmakligt, men den moderna fysiken har bekräftat att sanningen i mångt och mycket ser ut precis så. Numera anses massan inte vara någon inneboende eller ”primär” egenskap hos naturens minsta byggstenar. Det finns i själva verket ingen massa. Massan uppstår enbart ur energin i växelverkan mellan elementarpartiklar som av naturen är masslösa.

Fysikerna delade och delade och fann till slut ingenting alls.

Först när en formell experimentell filosofi utvecklades i början av 1600-talet blev det möjligt att gå bortom gränserna för den sortens spekulativt tänkande som hade kännetecknat teorierna i antikens Grekland. Den gamla tidens filosofi hade försökt gissa sig till hur de materiella ämnena var beskaffade enbart utifrån observationer som var färgade av

* Se Platon, *Skrifter. Fjärde delen*. Bokförlaget Doxa (1985), s. 46–49. Platon satte ihop luft, eld och vatten av en sorts trianglar och jord av en annan sorts trianglar. Han hävdade att jord därför inte kunde omvandlas till något annat ämne.

fördomar om hurdan världen *borde* vara. Nu höll de nya forskarna på att mixtra med själva naturen för att locka fram säkrare uppgifter om hurdan världen *faktiskt är*.

Frågorna rörde fortfarande i första hand formens och substansens natur. Begreppet massa – det mått på *mängden* materia som visar sig i tingens rörelse – blev centralt för vår förståelse för substansen. Ett objekts motstånd mot acceleration tolkas som trög massa. Ett litet objekt accelererar mycket fortare än ett stort om man sparar till dem med lika stor kraft.

Ett objekts förmåga att generera ett gravitationsfält tolkas som tung massa. Den gravitationskraft som månen genererar är svagare än den som jorden genererar eftersom månen är mindre än jorden, vilket gör dess tunga massa mindre. Den tunga och den tröga massan har empiriskt visat sig vara identiska, trots att det inte finns några starka teoretiska skäl till att det skulle behöva vara så.

Vetenskapsmännen avslöjade också hemligheterna bakom naturens stora formvariation. Det visade sig att de gamla grekernas ”grundämne” vatten inte alls bestod av några geometriska kroppar sammansatta av trianglar, som Platon hade trott, utan av molekyler sammansatta av atomer av grundämnena väte och syre i en kombination som i dag betecknas H_2O .

Till en början tolkades ordet ”atom” i denna nya, moderna bemärkelse på samma sätt som hos grekerna: en odelbar byggsten i materien. Men redan år 1897, medan det fortfarande debatterades högljutt huruvida atomerna ens fanns på riktigt, upptäckte den engelska fysikern Joseph John Thompson den negativt laddade elektronen. Tydligt hade atomerna i sin tur egna, subatomära beståndsdelar.

Thompsons upptäckt följdes 1909–1911 av experiment i nyzeeländaren Ernest Rutherfords laboratorium i Manchester. Dessa experiment visade att atomer till största delen består av tomrum. Mitt i atomen sitter en mycket liten positivt laddad atomkärna, och runt den kretsar de negativt laddade elektronerna ungefär som planeter kretsar runt solen. Det mesta av massan hos de atomer som materiella ämnen är uppbyggda av finns samlad i deras kärnor. Det är alltså i atomkärnan som form och substans möts.

Än i dag är ”planetmodellen” av atomen en kraftfull visuell me-

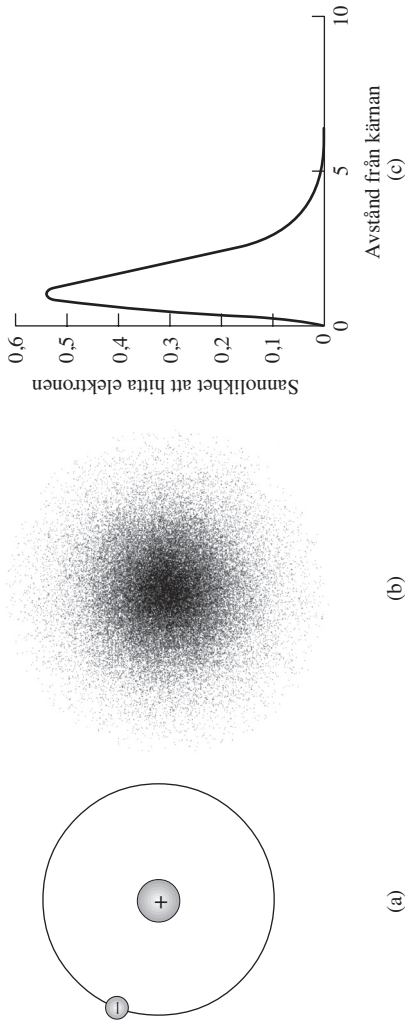
tafor. Men för fysikerna blev det genast uppenbart att en sådan modell egentligen inte alls borde fungera. Solsystemsatomer av det slaget förväntades vara instabila i sig själva. Till skillnad från planeter som kretsar runt solen utstrålar elektriskt laddade partiklar som rör sig i ett elektriskt fält energi i form av elektromagnetiska vågor. Sådana planet-elektroner skulle förbruka all sin energi på en bråkdelens sekund och då skulle atomens inre uppbyggnad kollapsa.

Lösningen till just den här gåtan uppenbarade sig i början av 1920-talet i form av kvantmekaniken. Elektronen är inte bara en partikel – som man skulle kunna föreställa sig som en liten kula av negativt laddad materia – utan den är både en våg *och* en partikel på samma gång. Den befinner sig inte ”här” eller ”där borta”, som man skulle kunna vänta sig av någonting lokaliserat, utan är bokstavligen ”överallt” i sin spöklika, delokaliserade vågfunktion. Det stämmer inte riktigt att elektronerna kretsar runt kärnan. I stället bildar deras vågfunktioner karakteristiska tredimensionella mönster – ”orbitaler” – i rummet kring kärnan. Den matematiska formen hos varje orbital berättar om *sannolikheten* för att man ska hitta den nu fullkomligt gåtfulla elektronen på specifika platser – ”här” eller ”där” – i atomen (se figur 1).

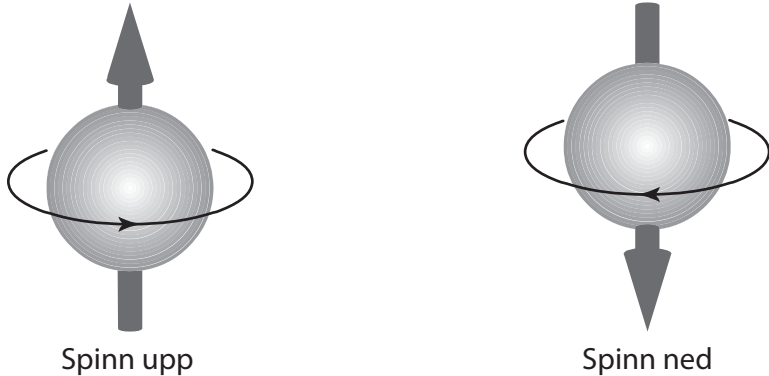
Den kvantmekaniska revolutionen var en fruktbar tid av aldrig skådat slag för både den teoretiska och den experimentella fysiken. När den engelska fysikern Paul Dirac 1927 kombinerade kvantmekaniken med Albert Einsteins speciella relativitetsteori dök det upp en ny egenskap som kallades *elektronspinn*. Experimentalisterna kände redan till den här egenskapen och tolkade den tills vidare som om elektronen snurrade runt sin egen axel som en leksaks-snurra, på ungefär samma sätt som jorden roterar runt sin egen axel medan den kretsar runt solen (se figur 2).

Men även denna visuella metafor visade sig sakna förankring i verkligheten. I dag tolkar vi elektronspinnets som en rent ”relativistisk” kvanteffekt som gör att elektroner kan ”riktas” åt ett av två möjliga ”håll”, som kallas spinn upp respektive spinn ned. Det handlar inte om att de riktas åt något visst håll i det vanliga tredimensionella rummet, utan om deras orientering i ett ”spinnrum” som bara har två dimensioner – upp eller ned.

Man fann att varje orbital i en atom kunde innehålla två – och



FIGUR 1 (a) I Rutherford's "planetmodell" av väteatomen befinner sig en enda negativt laddad elektron i en fixerad bana runt en atomkärna som består av en enda positivt laddad proton. (b) Kvantmekaniken ersatte elektronens omlopps bana med en vågfunktion, vars lägsta energisammansättning (1s) är sfäriskt symmetrisk. (c) Det är nu möjligt att "hitta" elektronen var som helst inom ramarna för vågfunktionen, men det är mest sannolikt att den återfinns vid det avstånd som den gamla planetmodellen förutsade.



FIGUR 2 1927 kombinerade Dirac kvantmekanik med Einsteins speciella relativitetsteori i en helt och hållet "relativistisk" kvantteori. Då dök egenskapen elektronspinn upp. Den framställdes som om den negativt laddade elektronen bokstavligen snurrade runt sin egen axel och på så sätt skapade ett litet lokalt magnetfält, men i dag föreställer man sig bara elektronspinnets som något som kan ha riktningen upp eller ned.

endast två – elektroner. Det är det som är Wolfgang Paulis berömda *uteslutningsprincip*, som han utvecklade 1925 och som säger att elektroner inte får befinna sig i samma kvanttillstånd. Principen härrör från den matematiska formen hos vågfunktionen för ett sammansatt tillstånd som innehåller minst två elektroner. Om man utgick från att det sammansatta tillståndet hade skapats med två elektroner som hade precis samma fysikaliska egenskaper så skulle vågfunktionens styrka bli lika med noll – ett sådant tillstånd skulle inte kunna existera. För att vågfunktionen ska kunna existera med en styrka skild från noll måste elektronerna vara olika på något sätt. I en orbital innebär det att den ena elektronen måste ha uppåtriktat spinn och den andra nedåtriktat spinn. Deras spinn måste med andra ord vara *parvis* motsatta.

Det är klokast att motstå frestelsen att försöka föreställa sig hur de här olika riktningarna skulle kunna se ut i verkligheten. Effekterna är däremot nog så verkliga. Spinnets avgör elektronens grad av rörelsemängdsmoment – den rörelsemängd som följer med spinnets "rotation". Spinnets styr också över elektronens växelverkan med magnet-

fält, effekter som kan studeras i detalj i laboratoriet. Men nu tycks kvantmekaniken ha korsat gränsen mellan vad vi kan och inte kan veta om varifrån effekterna kommer.

Diracs relativistiska kvantteori för elektronen gav honom dubbelt så många lösningar som han trodde att han hade behövt. Två av lösningarna motsvarar en elektron med spinn upp respektive ned. Vad motsvarade de två resterande lösningarna? Han hade några egna idéer, men 1931 fick han medge att de måste motsvara spinnriktningarna hos en ditintills okänd positiv elektron. Dirac hade upptäckt antimaterian. Så småningom fann man ”positronen”, elektronens antipartikel, i experiment med kosmisk strålning. De skapas högt uppe i jordens atmosfär i kollisioner mellan partiklar med hög energi.

År 1932 såg det ut som om den sista pusselbiten var på plats. Den engelska fysikern James Chadwick upptäckte neutronen, en elektriskt neutral partikel som sitter i atomkärnan tillsammans med den positivt laddade protonen. Nu verkade det som om fysikerna hade alla ingredienser de behövde för att kunna formulera ett klart svar på vår inledande fråga.

Svaret lydde ungefär som följer: All världens materia är uppbyggd av kemiska grundämnen. Grundämnena har många olika egenskaper och utgör tillsammans det periodiska systemet, från väte, det lättaste ämnet, till uran, det tyngsta naturligt förekommande ämne man känner till.*

Varje grundämne består av atomer. Varje atom består av en atomkärna som är sammansatt av ett varierande antal positivt laddade protoner och elektriskt neutrala neutroner. Varje grundämne kännetecknas av antalet protoner i dess atomkärna. Väte har en proton, helium två, litium tre, och så vidare fram till uran, som har 92.

Kärnan omges av ett antal negativt laddade elektroner som motsvarar antalet protoner, så att atomen som helhet blir elektriskt neutral. Varje elektrons spinn är antingen riktat upp eller ned och i varje orbital finns det rum för två elektroner, förutsatt att de har motsatta spinnriktningar.

* Det finns grundämnen som är tyngre än uran, men de förekommer inte i naturen. De är instabila i sig själva och måste därför framställas på konstgjord väg i laboratorier eller kärnreaktorer. Plutonium är kanske det mest välkända exemplet.

Det är ett uttömmande svar. Med de grundläggande byggstenarna protoner, neutroner och elektroner samt Paulis uteslutningsprincip kan vi förklara varför det periodiska systemet har den struktur det har. Vi kan förklara varför materien har form och täthet. Vi kan förklara varför det finns isotoper – atomer vars kärna innehåller samma antal protoner men ett annat antal neutroner. Med en gnutta ansträngning kan vi förklara all kemi, biokemi och materialvetenskap.

I den här beskrivningen är massan egentligen inget mysterium. Massan hos all materia kan spåras tillbaka till protonerna och neutronerna i den, som står för cirka 99 procent av massan i varje atom.

Föreställ dig en liten iskub av trippeldestillerat vatten. Kubens sidor är 2,7 centimeter långa. Plocka upp den. Den är kall och hal. Den är inte tung, men du är medveten om dess vikt i din handflata. Var finns då iskubens massa?

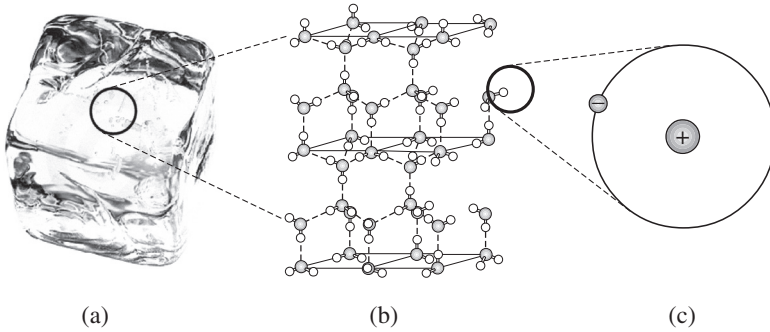
Molekylvikten för vatten beräknas enkelt utifrån det totala antalet protoner och neutroner i kärnorna i de två väteatomer och den ensamma syreatom som tillsammans blir H₂O. Kärnan i varje väteatom består av en ensam proton, och kärnan i syreatomen innehåller åtta protoner och åtta neutroner, så det blir sammanlagt 18 ”nukleoner”. Den kub av ren is som du håller i din hand väger cirka 18 gram*, vilket är detsamma som molekylvikten i gram. Därför utgör kuben ett standardmått på vatten i fast form som kallas en *mol*.

Vi vet att en mol av ett ämne innehåller ett bestämt antal av de atomer eller molekyler ämnet består av. Antalet är lika med Avogadros tal, lite drygt sex hundra miljarder biljoner (6×10^{23}). Här har vi alltså svaret. Tyngden hos isbiten i din handflata kommer från sammanlagt sex hundra miljarder biljoner molekyler H₂O, eller cirka 10 800 miljarder biljoner protoner och neutroner (se figur 3).**

Det var bara att acceptera att atomerna inte längre var oförstörbara, som grekerna en gång hade trott. Atomerna kunde omvandlas till varandra, förvandlas från en form till

* Ren is har densiteten 0,9167 g/cm³ vid 0°C. Iskubens volym är cirka 19,7 cm³, så massan är drygt 18 gram.

** Här måste vi förstås se till att skilja mellan vikt och massa. Iskuben väger 18 gram på jorden, men den väger mycket mindre på månen och ingenting alls i omloppsbana runt jorden. Dess *massa* förblir däremot hela tiden densamma. Av konvention sägs massa vara lika med sin vikt på jorden.



FIGUR 3 En iskub med sidan 2,7 centimeter väger omkring 18 gram (a). Den består av en gitterstruktur som innehåller drygt sexhundra miljarder miljarder molekyler vatten, H_2O (b). Varje syreatom innehåller åtta protoner och åtta neutroner, och varje väteatom innehåller en proton (c). Således innehåller iskuben cirka 10 800 miljarder miljarder protoner och neutroner.

en annan. År 1905 hade Einstein med hjälp av sin speciella relativitetsteori lyckats visa att massa och energi är likvärdiga i det som skulle bli vetenskapens mest berömda ekvation genom tiderna, $E = mc^2$: energin är lika med massan gånger ljushastigheten i kvadrat. Men insikten att massa motsvarar en enorm energireservoar urholkade inte massbegreppet det minsta. På något sätt gjorde den bara massan ännu mer påtaglig.

Påtaglig, men inte oföränderlig. Einstein visade att materien (massan) inte bevaras – den kan omvandlas till energi. När en uran-235-atom bombarderas med en snabb neutron så att den genomgår fission omvandlas ungefär en femtedel av massan hos en proton till energi i den kärnreaktion som följer. När detta förstörades upp till en 56-kilosladdning av 90 procent rent uran-235 frigjordes tillräckligt mycket massenergi för att totalförstöra den japanska staden Hiroshima i augusti 1945.

Men i själva verket var Einstein ute efter en djupare sanning. Titeln till hans artikel från 1905 innehöll en ledtråd: "Är en kropps tröghet beroende av dess energiinnehåll?"¹ Einstein hade

insett att $E = mc^2$ egentligen innebär att $m = E/c^2$: all trög massa är bara energi i en annan form.* Det skulle dröja sextio år innan den djupare innebörden av denna observation visade sig.

I mitten av 1930-talet såg det ut som om de grundläggande byggstenarna protoner, neutroner och elektroner gav ett helt uttömmande svar på vår inledande fråga. Men det fanns ett problem. Från slutet av 1800-talet var det känt att vissa grundämnens isotoper är instabila. De är radioaktiva: deras kärna upplöses spontant i en serie kärnreaktioner.

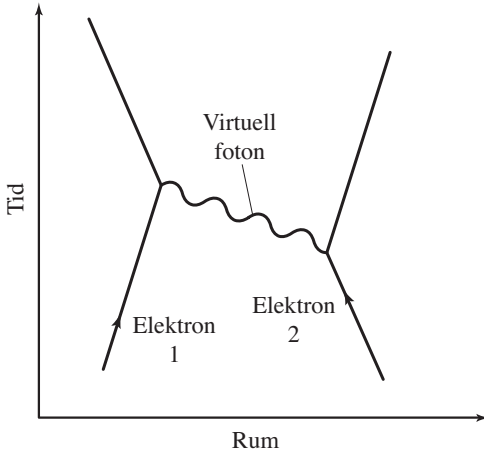
Det finns olika slags radioaktivitet. En sort, som Rutherford 1899 kallade *beta-radioaktivitet* eller *betastrålning*, innefattar en neutrons omvandling till en proton inuti atomkärnan, varpå en snabb elektron (en ”betapartikel”) sänds ut. Detta är en naturlig form av alkemi: ändrar man antalet protoner i kärnan förändrar man med nödvändighet dess kemiska identitet.**

Betastrålningen antyder att neutronen är en instabil, sammanfattad partikel och alltså inte alls ”grundläggande”. Dessutom fanns det ett problem med processens energibalans. Den energi som i teorin skulle frigöras i och med protonens transformation i atomkärnan motsvarades inte helt av energin hos den utsända elektronen. År 1930 tyckte Pauli att han inte hade något annat val än att föreslå att den ”saknade” energin fördes bort av en ännu oupptäckt, lätt, elektriskt neutral partikel som så småningom kom att kallas *neutrino* (”liten neutral [tingest]”). Då ansåg man att det vore omöjligt att upptäcka en sådan partikel, men 1956 lyckades man göra det för första gången.

Det var dags för en inventering. Så här mycket verkade stå klart: materien behöver *krafter* för att hållas samman. Bortsett från gravitationskraften, som verkar universellt på all materia, ansåg man nu att det fanns tre andra krafter som verkade inom själva atomen.

* Faktum är att ekvationen $E = mc^2$ inte förekommer formulerad på detta sätt i Einsteins artikel.

** Som tur är för värdet på världens guldreserver är detta inte någon billig metod för att förvandla oädla metaller till guld.



FIGUR 4 Återgivning av kvantelektrodynamikens beskrivning av växelverkan mellan två elektroner. Genom den repulsiva elektromagnetiska kraften mellan de två negativt laddade elektronerna utbyter de en virtuell foton när de befinner sig som närmast varandra. Fotonen är "virtuell" eftersom den inte är synlig i växelverkan.

Elektriskt laddade partiklar växelverkar genom elektromagnetismen, välkänd tack vare 1800-talets banbrytande fysiker, som bland många andra viktiga framsteg lade grunden för kraftindustrin. En helt relativistisk kvantteori för det elektromagnetiska fältet, kvantelektrodynamiken (QED), utarbetades 1948 av de amerikanska fysikerna Richard Feynman och Julian Schwinger samt den japanska fysikern Sin-Itiro Tomonaga. Inom QED "förmedlas" de attraherande och repellerande krafterna mellan elektriskt laddade partiklar av så kallade kraftpartiklar.

När två elektroner, till exempel, närmar sig varandra utväxlar de en kraftpartikel som får dem att repelleras från varandra (se figur 4). Det elektromagnetiska fältets kraftförmedlande partikel är fotonen, den kvantpartikel som vanligtvis består av ljus. QED etablerades snabbt som en teori med större prediktionskraft än någon tidigare teori.

Det fanns ytterligare två krafter kvar att brottas med. Elektromagnetismen kunde inte förklara hur protoner och neutroner binds till varandra inuti atomkärnan, och den kunde inte heller

förklara betasönderfallets växelverkningar. Dessa typer av växelverkan rör så olika energiskalar att det inte kan finnas rum för båda två inom någon enda kraft. Man insåg att det behövdes två krafter, en ”stark” kärnkraft som höll ihop atomkärnan och en ”svag” kärnkraft som styrde över vissa omvandlingsprocesser i kärnan.

Därmed är vi framme vid den period inom fysiken som ska beskrivas i den här boken. Ytterligare 60 år av teoretisk och experimentell partikelfysik har givit oss *standardmodellen*, en samling grundläggande kvantfältteorier som beskriver all materia och alla krafter som verkar mellan materiepartiklarna utom gravitationen. Det enklaste sättet att skapa sig en bild av vad standardmodellen är och vilken betydelse den har för vår förståelse för den materiella världen är att ta en snabb tur genom dess historia.

Vår resa börjar år 1915 i den stillsamma tyska universitetsstaden Göttingen.