

Intro

Jens Lyng Petersen

ELEMENTAR PARTIKLER

om felter

kvarker og kvanter

25. marts 2019

Undertegnede forfatter af bogen:

"Elementarpartikler - om felter, kvanter og kvarker" (Gydendal 1991)

giver herved tilladelse til, at den i scannet version offentliggøres på internettet.



Jens Lyng Petersen

Denne bog / forelæsningsnote er blevet digitaliseret af Martin Skogstad-von Qualen, og er en del af et projekt der har til formål at gøre tekster, forfattet af danske fysikere, tilgængelige for offentligheden. Teksterne, der hovedsageligt skrevet i 90'erne, blev anskaffet i så fine udgaver som muligt, hvorefter de blev skannet på en fotokopimaskine i en opløsning på 600 dpi (S/H) i tiff format. De skannede billeder dannede så udgangspunkt for en pdf-fil, hvorpå der blev udført elektronisk tekstgenkendelse (OCR).

Bookmarks og links blev herefter tilføjet for at lette navigationen i dokumenterne. Andre af teksterne var tilgængelige i digital form, således at kun bookmarks er tilføjet.

Projektet blev startet i november 2018 og omkring juni 2019 var alle bøger / noter klar til at blive lagt op på www.nbi.ku.dk.

Skulle nogen have spørgsmål til projektet kan Martin kontaktes på martinskogstad@gmail.com

En stor tak til professor emeritus Henrik Smith som også er forfatter til flere af bøgerne, og til lektor i fysik ved NBI Jens Paaske for samarbejde, opmuntring, valg af materiale og lån af fine eksemplarer af værkerne.

Jens Lyng Petersen

ELEMENTAR PARTIKLER

**om felter
kvarker og kvanter**

Redaktion: Inge Damm og Jan Teuber

GYLDENDAL *Intro*

Elementarpartikler – om felter, kvarker og kvanter

© 1991 by Jens Lyng Petersen and

Gyldendalske Boghandel, Nordisk Forlag A.S. Copenhagen.

Bogen er sat med Times

og trykt hos Nordisk Bogproduktion A.S. Haslev

Grafisk tilrettelægning: John Ovesen

Fotografisk, mekanisk eller anden gengivelse

eller mangfoldiggørelse af denne bog eller

dele heraf er ikke tilladt ifølge gældende

dansk lov om ophavsret.

Printed in Denmark 1991

ISBN 87-01-71754-5

I samme serie:

Pil Dahlerup: Dekonstruktion – 90'ernes litteraturteori

Peter Thielst: Selvpsykologi – en ny teori om selvet

Henrik Nielsen: Genernes sprog – på opdagelse i cellens univers

Indhold

Forord 5

0. Indledning 7

Drømmen om det fundamentale 7

Hvor elementære er elementarpartikler? 9

1. Relativitetsteori og elementarpartikler 13

Den relativistiske fabrik 13

Intet er hurtigere end lyset 16

Et eksempel: Dannelse af Z-partikler 18

Relativitetsteoriens baggrund 19

Tidens relativitet 21

Et par ord om den almene relativitetsteori 23

2. Kvanteteori og elementarpartikler 24

Klassiske felter 25

Det elektromagnetiske kvantefelt: fotonfeltet 26

Mere om fotoner 28

Elektroner, positroner og deres felt 30

Heisenbergs ubestemthedsrelationer 31

3. Fra atomer til kvarker 34

Kvantestigen 34

Atomer og deres natur 36

Pauli-princippet og stofpartikler 39

Atomernes forskellige kerner 40

Protoner og neutroner 41

Kvarker 43

4. De stærke, de svage og de elektromagnetiske 45

To underlige tretaller 45

Neutrinoer 54

Partikelgeneration nummer to 56

5. Standardmodellen 60

QED 60

QCD 61

Kvantekromodynamikken i praksis 67

GSW 68

Z^0 -partiklens fysik 72

6. Perspektiver 75

Det kosmologiske perspektiv 75

Det erkendelsesmæssige perspektiv 76

Hinsides Standardmodellen 77

Det samfundsmæssige perspektiv 79

Forord

Den største videnskabelige opdagelse er måske denne: at der bestandig er nye, forbavsende opdagelser at gøre. Det gælder samtlige videnskaber, og altså også videnskaben om elementarpartikler. Den handler om at søge mod stoffets mindre og mindre dele, de mere og mere "fundamentale" naturlove, ja tættere og tættere på de betingelser, der herskede ved universets skabelse. Stoffets – og verdens – opførsel kan i et vist omfang forstås på basis af disse "inderste sammenhænge". I det 20. århundrede har vi afdækket atomernes verden, men også forstået, at der var noget inden i atomerne: elektroner og kerner. Tilsvarende viste det sig, at der var noget inden i kernerne: protoner og neutroner. Nobelprisen i fysik for 1990 blev givet for opdagelsen af, at der også var noget inden i protonerne og neutronerne: kvarker.

Men stoffets struktur er ikke bare som en "kinesisk æske". På hvert niveau findes helt nye begreber, som må erkendes, før man kan forstå, hvad der foregår. Det er ikke så ligetil at give en elementær beskrivelse af denne fysik. En virkelig forståelse baserer sig på både relativitetsteori og kvanteteori, og de har – med rette – ord for at være vanskeligt tilgængelige. Ikke desto mindre har netop de seneste landvindinger gjort opgaven nemmere. Vores forståelse af elementarpartiklernes verden har faktisk nået et afrundet stade. Vi taler om, at vi har etableret en *Standardmodel*. Skønt kompliceret i detalje, giver denne teori et forbavsende anskueligt billede.

Nærværende bog forsøger at skildre dette billede for den læser, der er i besiddelse af en god portion videbegærlighed, men som ikke nødvendigvis har synderlig viden om fysik eller matematik. I modsætning til de fleste andre elementære fremstillinger, har jeg valgt ikke bare at tale om *partikler*. Jeg har også forsøgt at forklare begrebet *felt*, specielt begrebet kvantefelt, og dets forbindelse til kræfter og partikler. Standardmodellens succes beror fuldstændigt på erkendelsen af, hvor vigtigt dette feltbegreb er.

I første halvdel af bogen opridser jeg de vigtigste træk ved re-

lativitetsteori og kvanteteori, samt giver et fugleperspektiv over udviklingen af atomfysikken frem til elementarpartiklernes fysik. Den anden halvdel bruges på en mere detaljeret forklaring af kvar-ker og deres øvrige familiemedlemmer, som de spiller sammen i Standardmodellen.

Jeg vil gerne sige tak til Peter Hansen (ALEPH-gruppen) og Rasmus Møller (DELPHI-gruppen), begge Niels Bohr Institutet, for hjælp og mange oplysninger. Tak også til Inge Damm og Jan Teuber for støtte, råd og overbærenhed.

Glostrup, januar 1991

Jens Lyng Petersen

Indledning

Drømmen om det fundamentale

Fysik handler aldeles ikke om drømme. Det er netop styrken i den naturvidenskabelige metode, at eksperimenter og andre kendsgerninger ubønhørligt tøjler den fri fantasi. Men videnskaben drives af folk, der er fulde af drømme. Ofte fejlslagne drømme. Men der er også drømme, der går i opfyldelse ud over al forventning.

Historien om elementarpartiklernes fysik er et godt eksempel. Den handler om drømmen om den inderste indsigt i naturens måde at fungere på. Hvad er stoffets mindste byggesten selv lavet af? Hvorfor er "det hele", som det er? I løbet af de sidste 10-20 år er der sket et vældigt gennembrud i forståelsen af elementarpartiklernes fysik. Visse forventninger er blevet tilintetgjort, mens andre drømme er gået i opfyldelse over al forventning. Fysikerne synes, det hele nu er uhyre "smukt". De teorier, denne indsigt er baseret på, kaldes for *Standardmodellen* – med et lidt papagtigt udtryk. Det er alt det, som denne bog handler om.

Elementarpartikelfysikken er udviklet siden 2. verdenskrig som sidste skud på atomfysikkens stamme. For fagfysikere er der meget stor forskel på de tre discipliner: atomfysik, kernefysik og elementarpartikelfysik. Men de har udviklet sig af hinanden. Vi må derfor begynde med at se dem i sammenhæng.

Omkring århundredskiftet stod det klart, at alt stof består af atomer, ofte klumpet sammen i molekyler. Men de fleste tvivlede på, at man nogensinde ville blive i stand til at studere atomerne direkte, eksperimentelt. Der går nemlig lige så mange atomer på et knappenålshoved, som der er sandskorn i en solid klitrække langs hele Jyllands vestkyst. Forstørrer vi atomet op til en stor ballon, er atomets kerne selv som et lille sandskorn. Men de detaljer, partikelfysikerne nu kan studere, drejer sig om enkeltheder, der er mindre end en tusindedel af atomkernens udstrækning!

Hvad der foregår blandt atomer, kerner og elementarpartikler er så forskelligt fra, hvad vi oplever til hverdag, at det kan være en

god idé at begynde med at pege på dagligdags fænomener, hvor vi alligevel (med bagklogskab) kan skimte konsekvenser af stoffets atomare struktur.

Lad os tænke på bladene i et nyudsprunget bøgetræ. Alle bladene er lidt forskellige, men det er dog påfaldende så ens, de alligevel er. Især sammenlignet med anemoner eller med en flok zebraer. Der må være tale om, at de forskellige biologiske arter udvikler sig på basis af et forbløffende stabilt "program". Hvordan går det til? Svaret findes dybt i organismernes cellekerner som opkrøllede DNA-molekyler, trådlignende spiraler bestående af adskillige milliarder atomer. På disse dobbeltspiraler, som biologerne Watson og Crick erkendte i 1953, sidder den genetiske kode og styrer organismens livsforløb (sammen med en masse overflødig information). Alle de "koder", der hører til en bestemt biologisk art, bliver så forholdsvis ens, fordi DNA-molekylerne er opbygget af så stabile og solide og fuldstændig ens molekylgrupper. Den genetiske kode er "skrevet" på spiralen med bare to par ret simple molekyler, der altid er bygget af præcis den samme slags atomer.

Nu beror atomernes opdagelse som bekendt ikke på, at en eller anden kiggede lidt på bøgeblade. Omkring 500 år f.Kr. spekulerede græske filosoffer som Demokritos og Leukippos ganske vist på, om ikke alt stof (og alle sjæle!) skulle være dannet af udelelige små enheder. Udeleligt hedder på græsk "atomos". Men oldtidens førende filosof og videnskabsmand, Aristoteles, var ikke enig. Han mente, at stoffers egenskaber umærkeligt kunne ændres. Heraf opstod i Middelalderen hos araberne og alkymisterne i Europa den misforståelse, at man kunne omforme billige materialer til guld. Først sent i Renæssancen sivede sandheden ind: det kan man ikke! Det havde ikke været nok at drømme!

Gennembruddet for den "rigtige" kemi kom omkring 1810, da skotten John Dalton indså, at kemiske reaktioners og stoffers forhold blev meget simple at forstå, når man forudsatte eksistensen af atomer. Han genindførte ordet, men på videnskabelig basis. Hermed var der banet vej for den kemiske revolution i forrige århundrede. I 1860'erne opstillede russeren D.I. Mendeleev grundstoffernes periodiske system. Det opsummerer deres kemiske egenskaber på en måde, som peger frem mod en underliggende struktur hos atomerne: atomerne selv var måske ikke helt udelelige!

Århundredet ud var der dog stor skepsis blandt mange over for atomernes reelle eksistens. Men da englænderen E. Rutherford i 1911 havde opdaget atomets kerne, fik Niels Bohr ved hjælp af den nye kvantehypotese (M. Planck 1900, A. Einstein 1905, se kap. 2)

for alvor hul på forståelsen af atomernes opbygning. Han kunne ligefrem i detaljer forklare og uddybe det periodiske system.

Niels Bohrs atom- og kvanteteori fra 1913 til begyndelsen af 1920'erne var ufuldstændig. Men omkring 1925 skete et af de største gennembrud i fysikkens, ja måske i den menneskelige tænkningens historie: Den endelige udgave af kvanteteorien blev formuleret af folk som Heisenberg, Born, Jordan, Dirac, de Broglie, Schrödinger, Pauli, Ehrenfest. København med Niels Bohr kom til at lægge navn til kvanteteoriens mest udbredte fortolkning. Med ét slag fik man en magisk nøgle til en fuldstændig forståelse af atomernes og stoffernes egenskaber. Den dag i dag hviler det meste af vores moderne højteknologi på denne indsigt.

Men hvordan bærer atomer (der hører til et bestemt grundstof) sig så ad med at være så ens? Svaret er forankret i kvantebegreber. Atomerne består altså af en uhyre lille kerne, der vejer næsten det hele, men næsten ingenting fylder. Udenom svæver atomets elektroner og opfylder atomets rumfang. Kvantefysikken lærer os, at elektronerne kun kan optræde i visse såkaldte skaller, dvs. områder, der svarer til bestemte middelf afstande fra kernen. I hver skal kan elektronerne kun optræde i nogle få såkaldte kvantetilstande: 2 tilstande i den inderste skal, 8 i den næste, så 18 osv. Der er kun plads til en enkelt elektron i hver kvantetilstand (Pauli-princippet, kap. 3). Et bestemt grundstof har et bestemt antal elektroner i sine atomer. Ved meget høje temperaturer – som for eksempel på Solens overflade – kan elektronerne hoppe omkring mellem skallerne. Så udsender atomet lys: Solen skinner. Ved normale temperaturer ligger elektronerne "roligt" i de inderste skaller. Og så bliver atomerne (af samme grundstof) fuldstændig ens!

Dog under forudsætning af at alle elektronerne i alle atomer er ens! – og forudsat, at atomkernerne hørende til et bestemt grundstof er ens. Hvorfor er de det? Det er igen et kvantefænomen, der kræver en forklaring (kap. 2), og vi kommer hermed til elementarpartikelfysikken.

Hvor elementære er elementarpartikler?

I 1897 opdagede englænderen J.J. Thomson *elektronen*, den første kendte *elementarpartikel*. Atomernes kerner viste sig i 1930'erne at være opbygget af endnu to elementarpartikler: *protonen* og *neutronen*. De er nært beslægtede. Kernerne har som regel lidt flere neutroner end protoner. Kun protonen har elektrisk ladning.

Den er positiv, elektronens er negativ. Ellers har de to ladninger samme værdi. For at atomet kan blive elektrisk neutralt, må det altså omgive sig med nøjagtig lige så mange elektroner, som der er protoner i kernen. Stoffernes egenskaber, som vi ser dem til daglig, beror udelukkende på atomets elektronstruktur. Atomfysikere beskæftiger sig derfor næsten kun med atomernes elektroner, deres *elektronsky*.

Kernefysikerne beskæftiger sig derimod med den ca. 50.000 gange mindre kerne. Det var alt i alt mærkværdigt, hvordan de positivt ladede protoner kunne holdes sammen i en så lille kerne. De vil nemlig frastøde hinanden med elektriske kræfter, der er milliarder af gange større end de elektriske og magnetiske kræfter mellem elektronerne. Det er oplagt, at der må findes særlige *stærke kernekræfter*, der kan holde protonerne sammen alligevel. Det viser sig, at kernekræfterne adlyder love, som er meget forskellige fra dem, der gælder for de elektromagnetiske kræfter i atomet. Det er, som om protoner og neutroner er små kugler, der (via kernekræfterne) kun påvirker hinanden, når de rører ved hinanden. Så klistrer de sammen til det ejendommelige kernestof. Kernestoffet er i uophørlig bevægelse og kan igen kun beskrives ordentligt ved hjælp af kvantefysikken. Undertiden kan sådanne "blævrønde" kerner falde lidt til ro efter kortere eller længere tids forløb. Når de gør det, udsender de en eller flere partikler: vi har et radioaktivt henfald.

Nogle henfald skyldes de stærke kernekræfter, andre skyldes de elektromagnetiske. Men tidligt blev det klart, at visse henfald måtte skyldes en tredje slags: *de svage kernekræfter*, eller: de svage vekselvirkninger. Det viser sig, at begrebet "kræfter" ikke er praktisk eller entydigt i kerne- og partikelfysikken. Den måde, partikler påvirker hinanden på, betegnes som deres *vekselvirkninger*. De svage vekselvirkninger viser sig ofte ved, at en neutron omdannes til (henfalder til) en proton, en elektron og endnu en elementarpartikel. Det er den ganske spøgelsesagtige *neutrino*. Neutrinoen har ingen elektrisk ladning, den har heller ingen masse, men den kan udmærket bære energi. Den vekselvirker ufattelig svagt med stof. Mens læseren læser denne linje, gennemstrømmes han eller hun af omkring 10^{15} neutrinoer fra Solen, uden at der sker noget ved det.¹ Neutrinoerne er en slags usynligt solskin.

Ved slutningen af 1930'erne kendte man således 4 elementarpartikler: elektronen, neutrinoen (et nært familiemedlem af elek-

¹Vi vil ofte i denne bog skrive meget store tal på denne måde: $1000 = 10^3$, $10^{15} = 1.000.000.000.000.000$, osv.; tilsvarende vil 10^{-3} betyde $1/1000$ osv.)

tronen, se kap. 4), protonen og neutronen. Det var til at leve med, men denne lykkelige tilstand blev forstyrret efter 2. verdenskrig. Faktisk svarer de 4 til det, vi i dag i Standardmodellen kalder *stoffets første generation*. Men i hver generation optræder i virkeligheden et utal af partikelvarianter. Meget tyder nu på, at der findes netop to generationer mere. Men i slutningen af 1930'erne var fysikken helt domineret af de sensationelle fremskridt, der skete i kernefysikken. Så kom krigen, og fysikernes triumfer fik en uhyggelig bekræftelse af paddehatteskyer.

I 1947 opdagede man en ny elementarpartikel i den såkaldte kosmiske stråling. Elementarpartikelfysikken var født. Den ny partikel var nært forbundet med kernekræfterne. Ja, den var ligefrem teoretisk forudsagt i 1930'erne af japaneren Yukawa. Den fik navnet pi-mesonen eller *pionen*. Den kunne henfalde – tydeligvis via de svage kernekræfter – til endnu en ny elementarpartikel, der blev kaldt my-partiklen eller *myonen*. Den var til gengæld højst uventet. Den var en tung udgave af elektronen, viste det sig, og i øvrigt udstyret med sin egen neutrino-partner. Begyndelsen til stoffets anden generation var fundet. Og nu begyndte det at gå stærkt. I 1950'erne kunne man i nye accelerators begynde at undersøge protoner, neutroner og pi-mesoner enkeltvis. De virkede ikke særlig elementære! Når man "slog på dem", "ringede" de i bestemte resonansfrekvenser. "Tonen" var omkring 10^{19} gange højere end de højeste toner, vi kan høre. Efter kvantefysikken anses sådanne resonanser selv for elementarpartikler, så man havde snart mange. Og man fik flere og flere og flere. I 1960'erne kendtes over hundrede.

Dette kunne ikke være det "fundamentale" niveau! Og når en partikel "ringer" når man slår på den, er det for så vidt et godt tegn på, at der må være noget inde i. Vi skal høre i kap. 3 og 4, hvad det er for noget. I Standardmodellen taler vi om *kvarker* sammenbundet af *gluoner*. De er de mest elementære elementarpartikler, vi kender – indtil videre. De repræsenterer det niveau, vi ikke kan spalte. De er mindst flere tusinde gange "så hårde" som protoner, og også mindst lige så mange gange mindre. Men fra starten var der noget helt besynderligt ved kvarker: De kunne ikke produceres enkeltvis! Det kan alle "normale" partikler. Derfor skulle der også mere end 10 års overbevisende eksperimentel og teoretisk udvikling til, inden kvarkmodellen vandt almindelig tilslutning.

Med kvarkteorien blev der mulighed for at formulere såkaldte kvantefeltteorier, der indeholder de fuldstændige love for de tre

fundamentale vekselvirkninger: de stærke, de svage og de elektromagnetiske. I kap. 2 skal vi se nærmere på, hvad felter er, og hvad kvanteteorien siger om dem.

De tre vekselvirkninger bæres af feltkvanter, som kaldes fotoner (lys) for de elektromagnetiske, gluoner for de stærke, og W- og Z-partikler for de svage. For en teoretiker er det uhyre smukt, at der kun findes én klasse af teorier, som kan bruges i forbindelse med elektroner og kvarker. Og at det er den slags, naturen anvender! For eksperimentalfysikerne er det en fantastisk bedrift, at de har kunnet konstruere accelerators og detektorer, der kan bruges til at studere stoffet i den nødvendige detalje. Fra midten af 1970'erne er Standardmodellen blevet bekræftet igen og igen.

Denne forskning er kostbar og kræver "kontinentale" samarbejder. Den har været domineret af USA, USSR og det fælles europæiske center CERN ved Genève. USA har som regel været den ubestridte storebror. Men med opdagelsen af W- og Z-partiklerne i 1983 har CERN fået en solid triumf. I sommeren 1989 blev CERNs nyåbnede store accelerator, LEP, specielt indstillet på Z-produktion. Vi skal senere (kap. 4 og 5) uddybe betydningen af denne specielle partikel. Den har den foreløbige verdensrekord i vægt for partikler: den vejer næsten 100 gange så meget som en proton.

Hvad kan alt dette bruges til? Det ved først vore tipoldebørn rigtigt. Fysikkens historie viser, at der går lang tid fra opdagelser i grundforskningen til anvendelser. Radio- og TV-bølger baseres på Maxwells teori for elektricitet og magnetisme fra 1873, og selv de nyeste resultater inden for materiallære bygger på kvantefysikken fra 1925. Indtil videre må vi være glade for de teknologiske udviklinger, den eksperimentelle forskning fører med sig, og for de interdisciplinære udviklinger, der har vist sig på den teoretiske front. Men alt dette er ikke denne bogs emne.

Er Standardmodellen så afslutningen på partikelfysikken? Ingenlunde! Der projekteres allerede nye store accelerators til næste århundrede. Vi håber, de kan besvare nogle af de spørgsmål, som Standardmodellen selv stiller. Måske vil de lukke op for noget helt uventet.

Men i selve Standardmodellen er nedlagt et koncentrat af næsten al den viden om "fundamental" fysik, der er erhvervet i vores århundrede. Den er det 20. århundredes svendestykke.

1. Relativitetsteori og elementarpartikler

Den relativistiske fabrik

Fysikkens udvikling i det 20. århundrede baserer sig på to store rammeteorier: Relativitetsteorien og kvanteteorien. Ingen steder er de mere afgørende end i elementarpartiklernes fysik. Vi må derfor se at få nogle begreber på plads for begge teoriers vedkommende. For den moderne teknik, som vi møder i hverdagen, er kvantefysikken langt den vigtigste. Til gengæld er alle fortrolige med Einsteins romantiske kontrafej og har hørt om hans relativitetsteorier. Dem er der to af: den specielle fra 1905 og den almene fra 1915. I elementarpartikelfysikken er det næsten kun den specielle relativitetsteori, vi får brug for.

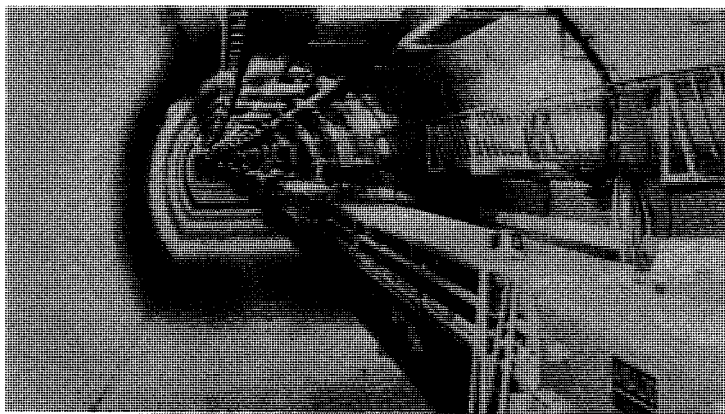
I 1905 sad Einstein som en ung mand på 26 år i en ganske ydmyg stilling på det schweiziske patentkontor i Bern. Men i dette år skrev han 3 afhandlinger, der alle var i Nobelprisklassen. En af dem indeholdt den specielle relativitetsteori. Han anmodede om at få den godkendt som en disputats, så han kunne undervise som Privatdozent – uden vederlag – på universitetet i Bern. Anmodningen blev afslået! (Lidt senere fik han dog et ekstraordinært professorat i Zürich.)

I 1922 fik Einstein Nobelprisen (for året 1921) – for én af de andre omtalte afhandlinger fra 1905! Den var af største betydning for kvanteteorierns tidligste udvikling. Men han fik ingen Nobelpris for sit imponerende livsværk, de to relativitetsteorier. Begrundelse: Teorierne savnede tilstrækkelig eksperimentel bekræftelse. Så meget desto mere ejendommeligt er det, at i dag fungerer alverdens forskningsanlæg for partikelfysik som en slags fabrikker, der helt og aldeles er baseret på den specielle relativitetsteoris love.

Lad os derfor begynde med at se lidt nærmere på nogle af dens mærkværdigheder, som de optræder ved en accelerator til brug for partikelfysik. Lad os kaste blikket på den største og nyeste accelerator, LEP acceleratoren ved CERN.



Figur 1.1 Luftfotografi af CERN, centret for det vesteuropæiske samarbejde for partikelfysik. Danmark er medlem, og danske fysikere deltager i adskillige eksperimenter. I forgunden ses lufthavnen i Genève og i baggrunden Jurabjergene klædt i skyer. Den store markerede cirkel viser LEP-acceleratoren (Large Electron Positron) med omkreds ca. 27 km. Den befinder sig omkring 100 m under jordoverfladen. Den "lille" cirkel viser SPS-acceleratoren (Super Proton Synchrotron) til acceleration af protoner og antiprotoner. Dens omkreds er ca. 7 km. CERN's bygninger skimtes til venstre for de to cirkler. Grænsen mellem Schweiz og Frankrig passerer midt igennem billedet. (CERN-Photo)



Figur 1.2 Et kig ind i det indre af LEP-tunnelen. De lange lyse "kasser" er afbøjningsmagneter og de mørkere er fokuseringsmagneter. (CERN-Photo)

CERN (Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire)¹ er det vesteuropæiske center for partikelfysik, oprettet i 1952 og beliggende på den schweizisk-franske grænse nær Genève. Dens "Large Electron Positron accelerator", LEP, blev åbnet sommeren 1989. Den studerer, som navnet siger, sammenstød mellem elektroner og anti-elektroner, kaldet *positroner*. Positroner er elektronernes *antipartikler*. De har helt samme masse som elektroner, også samme størrelse for den elektriske ladning, men positronens ladning er positiv (son protonens), mens elektronens er negativ. De to partikler kan slette, "annihilere", hinanden, og af den frigjorte energi kan nye partikler dannes. LEP er særligt bygget til at studere produktion af Z-partikler (kap. 5) i nogle år.

På fig. 1.1 ses et luftfotografi af CERN med en række forskellige acceleratorer markeret. LEP ligger i en enorm 26,7 km lang ringformet tunnel 100 m under jorden. I et mere end mandshøjt betonrør er monteret det lufttomme beam-rør, hvori partiklerne bevæger sig. Hundredvis af elektromagneter langs røret sørger for at holde partiklerne i deres beregnede bane. Det er nemlig sådan, at elektrisk ladede partikler, som flyver afsted, afbøjes, dvs. drejer lidt når de kommer ind i et magnetfelt, der står vinkelret på deres flugttretning. Herved kan de styres. I visse områder undervejs bliver partiklerne desuden *accelereret*. Man benytter sig af, at de elektrisk ladede partikler også påvirkes af elektriske felter. Gen-nemløber en elektron et elektrisk felt langs feltlinierne fra negativ til positiv spænding, vil den få tilført energi. I virkeligheden benyttes et svingende elektrisk felt fra en radiosender-agtig indretning. Alt i alt løber omkring 10^{12} elektroner i en lille pakke, et "bunch" på ca. 1 cm længde, men kun 1/100 mm på det tyndeste sted. Man forstår, at acceleratorfysikerne hele tiden må vide meget præcist, hvor partiklerne er, for at styre dem til sammenstød i de beregnede punkter. For positronerne sker noget tilsvarende. Med deres modsatte elektriske ladning løber de modsat rundt og bliver styret af de samme elektriske og magnetiske felter.

Før elektronerne kommer ind i selve LEP-acceleratoren, må de først trækkes ud af atomerne i et passende stof, omtrent som det sker med elektronerne i strålen i billedrøret i et fjernsyn. Positronerne er mere besværlige at få dannet. Man kan beskyde en metalplade med elektroner, og ud kommer så en syndflod af elektroner, positroner og fotoner (lyskvanter), som må sorteres og viderebehandles. Detaljerne er komplicerede, men ideen er enkel nok.

¹Det Europæiske Råd for Kernefysik, et forældet navn.

Her vil vi nu følge partiklernes hastighed og energi, efterhånden som de løber gennem acceleratorsystemet. Det mål for energi, man anvender i atom-, kerne- og partikelfysik, kaldes en *elektronvolt*, 1 eV. En partikel med en elementarladning (altså en elektron, en positron eller en proton, for eksempel), som "falder" gennem en spændingsforskel på 1 volt, får sin energi forøget med netop 1 eV. Den tilførte energi afhænger ikke af, om partiklen er let eller tung, kun af den elektriske ladning. 1 elektronvolt er en god enhed i atomfysikken, men i kerne- og partikelfysikken er den for lille til at være praktisk. Vi bruger i stedet

1 keV	=	1000 eV	
1 MeV	=	1000 keV	= 1.000.000 eV
1 GeV	=	1000 MeV	= 1.000.000 keV = 1.000.000.000 eV.

I LEP får elektronerne (og positronerne) efterhånden i mange, mange små skridt tilført mere og mere energi, indtil de tilsidst bringes op på for eksempel 45,6 GeV. Når så en elektron og en positron udsletter hinanden (annihilerer), frigøres $2 \cdot 45,6 \text{ GeV} = 91,2 \text{ GeV}$, som netop er den energi, der skal til for at skabe en Z-partikel.

Intet er hurtigere end lyset

Men nu kommer det mærkelige, der viser, at relativitetsteorien er på spil. Når elektronerne efterhånden har fået energien 1 MeV, er deres hastighed allerede kun 14 procent under lyshastigheden på 300.000 km/sek.² Når deres energi er blevet 1000 gange større, altså 1 GeV, er hastigheden kun knap og nap steget de 14 procent! Når elektronerne endelig accelereres fra 1 GeV til 45,6 GeV, stiger hastigheden slet ikke måleligt. Den kommer aldrig over lyshastigheden, men den ligger nu utrolig tæt på. Ved et kapløb mellem sådan en elektron og et lyskvant (en foton) herfra og til Månen ville elektronen kun være et par centimeter efter fotonen ved ankomsten.

Dette, at man kan tilføre meget energi til en partikel, uden at dens hastighed stiger nævneværdigt, ja at lyshastigheden er en uigennembrydelig hastigheds-mur – det er et af relativitetsteoriens hovedresultater. De regler, som fysikerne kendte for sammenhængen mellem hastighed og energi før Einstein, måtte modificeres radikalt, når det gjaldt hastigheder nær lyshastigheden. I partikelfysikken flyver partiklerne som regel næsten med lyshastighed,

²Helt præcist: 299.792,458 km/sek.

og så kan vi kun forstå, hvad der sker, ved hjælp af den specielle relativitetsteori fra 1905.

Lad os præcisere med et par formler. En af de mest berømte fra det 20. århundredes fysik er Einsteins udtryk for ækvivalensen mellem masse og energi:

$$E = mc^2$$

Eller med ord:

Energi = masse gange kvadratet på lyshastigheden.

I elementarpartikelfysikken er det højst upraktisk at måle partiklers masser i gram eller kg. Vi bruger altid Einsteins formel til at udtrykke masserne ved deres indre energi målt i eV. Lad os tage elektronmassen som eksempel. Man har målt, at når elektronmassen ganges med kvadratet på lyshastigheden, fås værdien 0,511 MeV. Altså er

$$\text{elektronmassen} = 0,511 \text{ MeV}/c^2.$$

Til sammenligning er

$$\text{protonmassen} = 938 \text{ MeV}/c^2.$$

Hvad det svarer til i gram, fremgår af, at der skal ca. $6 \cdot 10^{23}$ protoner til for at komme op på ét gram.³ Tallet $6 \cdot 10^{23}$ kaldes *Avogadros tal* efter den italienske kemiker, der videreudviklede Daltons atomteori. (Avogadros tal blev først målt længe efter hans død). Men i resten af bogen tænker vi bare i MeV og GeV. Som regel vil vi snyde lidt og skrive MeV i stedet for MeV/ c^2 , når vi opgiver masseværdier. Det er så underforstået, at vi tænker på den energimængde, massen svarer til. Vi siger derfor tit, at elektronens masse er 0,511 MeV og protonens masse er 938 MeV (eller 0,938 GeV). Vores måde overhovedet at tale om masser på er med andre ord helt afhængig af relativitetsteoriens indsigt.

Einstein opstillede også formelen for, hvor stor en partikels energi er, når partiklen ikke ligger stille, men flyver afsted med en vis hastighed, v . Formlen fra før modificeres så til

$$E = mc^2\gamma$$

³Protonens masse kan angives som $1,672623 \cdot 10^{-27}$ kg.

hvor størrelsen γ (det græske bogstav gamma, se listen bag i bogen) indgår i næsten alle formler i relativitetsteorien. Den udregnes fra hastigheden ved

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Læseren kan med lommeregneren overbevise sig om, at denne gamma-størrelse er praktisk taget $= 1$ for alle nogenlunde normale hastigheder. Til gengæld, hvis v er tæt på lyshastigheden, c , så er der ingen grænse for, hvor stor γ kan blive. For en elektron i LEP med energien 45,6 GeV er γ således 45.600 MeV/0,511 MeV $=$ ca. 90.000. Vi kalder partikler med et γ betydeligt større end 1 for *relativistiske*. Det er partikler i elementarpartikelfysikken næsten altid; de flyver stort set med lyshastighed.⁴

Vi har hørt om partiklers masse, deres hastighed og deres energi. Vi bør også forsøge at sige noget om deres *impuls* (bevægelsesmængde). Newton indførte i slutningen af 1600-tallet den vigtige størrelse impuls som masse gange hastighed. Einstein viste, at for hastigheder nær lyshastigheden må formlen modificeres. Vi erstatter simpelthen massen med energien (divideret med kvadratet på lyshastigheden). For små hastigheder spiller ændringen ingen praktisk rolle. Men da hastigheden *peger* i en bestemt retning, tænker vi også på impulsen som noget retningsbestemt. En partikels energi er et mål for dens evne til at udføre arbejde. Dens impuls er (meget forenklet) et mål for dens evne til at udføre et tryk. I praksis er impulsen ofte let at måle i eksperimenter. Når nemlig en ladet partikel flyver gennem et magnetfelt i en detektor, følger den en cirkulær bane, hvis radius direkte tillader at bestemme impulsen. Andre dele af detektoren kan så bruges til at stoppe partiklen og måle hvor meget energi, der afsættes. Energi og impuls! Det er nøglebegreberne for den eksperimentelle partikelfysik. Kan de måles, kan partiklens masse nemt beregnes efter formlerne. Det kan fx illustreres ved at se på, hvordan en Z-partikel produceres.

Et eksempel: Dannelse af Z-partikler

At energier og impulser er så vigtige skyldes, at de er størrelser,

⁴For at undgå misforståelser: I denne bog følger vi praksis i partikelfysikken og mener med ordet "masse" altid partiklens *hvilemasse*. I enkelte fremstillinger tales om en *relativistisk masse*, der simpelthen er energien divideret med c^2 . Denne talemåde bruges ikke her.

der altid er *bevaret*. Lad os illustrere, hvad det for eksempel betyder i LEP. Inden elektronen og positronen annihilerer, har de hver en energi på 45,6 GeV. Den samlede energi før sammenstødet er så (som allerede nævnt) 91,2 GeV. Hvordan med impulsen? Her flyver elektronen og positronen i modsatte retninger med lige store hastigheder, så da impulserne har "retning", ophæver de hinanden, og den samlede impuls før stødet er nul. Sådan er det så også efter annihilationen: Den dannede Z-partikel har impuls nul: Den ligger stille. Og den har en energi på 91,2 GeV. Men efter Einsteins formel betyder det, at massen så er $91,2 \text{ GeV}/c^2$.

Z-partiklen har den største masse, der nogensinde er målt. Den vejer næsten 100 gange så meget som en proton. Den har desuden den korteste levetid, der nogensinde er målt. Den lever i mindre end 10^{-24} sekunder, så kort, at det kun kan måles indirekte (se kap. 2). Hvordan kan vi så vide, at der overhovedet blev skabt en ny partikel? Igen kommer vi til en nøgleidé i eksperimentel partikelfysik. Den dannede Z-partikel omdannes – henfalder, siger vi – straks til visse andre partikler, og det er kun dem (eller deres henfaldsprodukter), der opdages i de kæmpemæssige detektorsystemer, der er opstillet omkring det punkt, hvor elektronen og positronen styres til at annihilere. I disse detektorer registreres et enormt antal elektroniske signaler. Hvis energien er noget væk fra de magiske 45,6 GeV beam-energi, for eksempel 42 GeV eller 49 GeV, så viser detektorsystemet kun noget interessant få gange i timen! Ved energien 45,6 GeV er tællehastigheden steget til mange "begivenheder" i minuttet. Ved beam-energiene 44,3 GeV og 46,9 GeV er tællehastigheden netop det halve af den maksimale. Vi ser, at tællehastigheden afhænger voldsomt af beam-energien og udviser et vældigt maksimum ved energien: 45,6 GeV. Det er på den måde, langt de fleste elementarpartikler "ses" (jf. kap. 4 og 5). Vi "ser" kun deres henfaldsprodukter, og de optræder særlig hyppigt, når deres energi og impuls lægger sig sammen til værdier svarende til en bestemt masse: massen af den partikel, der blev skabt og som derefter henfaldt.

Relativitetsteoriens baggrund

Lad os omsider sige lidt om, hvad der førte Einstein til den specielle relativitetsteori. Vi må tilbage til 1860'erne, hvor den britiske fysiker og matematiker J.C. Maxwell forsøgte at skabe en syntese af alt, hvad man vidste om elektricitet og magnetisme. Der var for eksempel H.C. Ørstedes banebrydende opdagelse i 1820 af

forbindelsen mellem elektricitet og magnetisme. Den havde siden udmøntet sig i præcise love. Og der var M. Faradays betoning af ideen om elektriske og magnetiske *felter* (se kap. 2 for en nærmere omtale af *felter*). Jorden er omgivet af et magnet*felt*. Og mellem elektriske ladninger er der et elektrisk felt. Feltet er udtryk for en særlig tilstand, som rummet kan være i, og som karakteriseres ved den måde hvorpå en elektrisk ladning eller en lille magnetnål påvirkes. Maxwell benyttede den nyeste matematik på den tid til en raffineret formulering af alle kendte love om ladninger, magnetnåle og *felter*. Han indså specielt, at én af de kendte love måtte modificeres lidt for at undgå urimelige matematiske følger-slutninger. Herved gjorde han det 19. århundredes største fysiske opdagelse. I 1864 skrev han til kollegaen Lord Kelvin: "Jeg har også en afhandling på bedding, med en elektromagnetisk lysteori, som jeg, indtil jeg bliver overbevist om det modsatte, anser for en tung kanon."

Det var ingen overdrivelse. Maxwell havde udledt et fantastisk resultat fra sine nu berømte Maxwell-ligninger for det elektriske og magnetiske felt: Der var mulighed for, at bølgesvingninger kunne forplante sig i *felterne*. Grunden for radioteknikken var lagt. Men ikke nok med det. Maxwell kunne beregne, hvilken hastighed disse bølger ville udbrede sig med. Resultatet pegede direkte på en forbløffende konklusion: udbredelseshastigheden var lig med lysets hastighed! Han måtte slutte, at lyset selv var sitrende elektriske og magnetiske *felter*: Bølger, men i hvad? Man havde allerede et ord parat. Man talte om *æteren*. Det gør folk den dag i dag, skønt Einsteins hovedbudskab med relativitetsteorien netop var: der er ikke nogen æter! Men for Maxwell var den en nødvendighed. Og den ganske bestemte bølgehastighed – den måtte betyde, at hans fine ligninger kun kunne gælde for apparater, der lå stille i den der æter. Tænk på lydbølger i luft udsendt af en kørende ambulance. Ambulancen kører modvind op, og målt i forhold til ambulancen løber lyden langsommere fra ambulancen forud, og tilsvarende hurtigere bagud. Sådan måtte Maxwell også tænke sig det med lysbølger. De kunne ikke bare sådan have én enkelt, bestemt hastighed altid!

Men hvad med Jorden, vi lever på? Den løber rundt om Solen. Så den må fra tid til anden flyve med forskellig fart i forhold til denne æter. Kunne dette måles? I 1890 opfandt amerikaneren A. Michelson et apparat, der benyttes endnu til hyper-nøjagtige målinger af afstande ved at tælle lysbølgelængder. Men det kunne også anvendes til at måle forskelle i lyshastigheden, alt afhængigt

af, om lyset havde æter-modvind eller æter-medvind. Det højst overraskende resultat af Michelsons målinger (og andres i årtierne efter 1890) var, at der ikke var nogen forskel! Lyset havde altid nøjagtig den samme hastighed, ligegyldigt hvilken vej lyset bevægede sig, og ligegyldigt hvor Jorden befandt sig i sin bane om Solen. Fysikerne var dybt forvirrede, og de mest bizarre forslag om æterens indvirkning på Michelsons apparat blev fremsat.

Så kom Einstein i 1905 med sin elegante, men chokerende løsning: Der er ingen æter; Maxwells ligninger er bedre end Maxwell troede. De gælder uanset vores bevægelsestilstand, og lyshastigheden har altid den samme værdi. Dette er den specielle relativitetsteori. Og dens relativitetsprincip siger, at naturlove som Maxwell-ligningerne ikke kan afhænge af sådan noget som en ætervind. Men Einstein måtte betale en begrebsmæssig pris, som hans samtidige i første omgang fandt meget høj: Tid er ikke noget absolut. Den går langsommere – tilsyneladende – for folk, der har en hastighed i forhold til os. Dette mærkværdige forhold viser sig af største betydning for elementarpartikelfysikken. Så vi vil studere det nærmere.

Tidens relativitet

Lad os tænke på et rumskib, der flyver langt borte, måske i Månens afstand, og lad os forestille os, at det passerer hen over himlen lidt over horisonten. Vi tænker os rumskibets gulv nedad mod horisonten og loftet opad. Lad os tænke på, at det har en hastighed, som nærmer sig lysets (foreløbig en teknisk umulighed). Hvis vi kunne se ind ad vinduerne i rumskibet, så ville vi ifølge Einstein se, at astronauterne derinde levede et liv i slow-motion.

Dette er i virkeligheden en meget simpel konsekvens af, at lyshastigheden har samme værdi for dem som for os. Tænk bare på et lysglimt, som starter ved rumskibets gulv og bevæger sig op mod loftet og spejles mellem gulv og loft. Astronauten om bord observerer signalet flyve op med den velkendte lyshastighed. Men vi, der står på Jorden, ser det samme signal flyve i en ganske skrå bane: mens det bevæger sig mod loftet, flytter rumskibet sig, så derfor ser vi signalet bevæge sig en længere vej, end astronauten ser. Signalet har den samme hastighed set af os, så da det bevæger sig en længere vej, bruger det også en længere tid! Astronauten vil måske finde, at signalet kan bevæge sig 10^8 gange op og ned for hvert pulsslæg af hans hjerte. Det vil vi så også se, men altså slår hans hjerte også langsommere set fra vores ståsted! Alt går

langsommere. De læsere, der er dygtige til at bruge Pythagoras's sætning om retvinklede trekanter, kan måske ligefrem udlede, hvor meget langsommere tiden går i rumskibet. Svaret er givet ved den samme gamma-faktor, som vi omtalte i forbindelse med partiklers energi! Det er i øvrigt ingen tilfældighed. Der er en dyb forbindelse mellem tid og energi, som ikke helt kan forklares i denne bog.

Det lyder måske paradoksalt. Men Einstein beviste, at der ikke er nogen *logisk* modstrid. Det er ikke nok til at bevise, at verden virkelig er indrettet efter hans teori, men her kommer partikelfysikken til hjælp. De fleste elementarpartikler er ustabile. De har en ganske bestemt middellevetid, som i mange tilfælde kan måles med stor nøjagtighed. Efter (sådan ca.) denne levetid henfalder elementarpartiklen til andre mere stabile partikler. Ifølge det foregående skulle det nu være sådan, at partiklers målte levetid afhang af deres flugthastighed. Partikler, der har en hastighed tæt på lysets, bør leve længere end partikler, der flyver langsomt. Og den faktor, hvormed de lever længere, er nøjagtigt forudsagt, det er vores ven gamma-faktoren.

For at gøre en lang historie kort: Det passer perfekt! Lad os tage et enkelt berømt eksempel. Vi har i indledningen talt om my-partikler. De dannes i stort tal i de øverste lag af Jordens atmosfære, når protoner i den kosmiske stråling med høj energi rammer kernerne i atomerne i atmosfæren. Mere præcist dannes først pi-mesoner, som så henfalder til myoner. En myon, der ligger stille, har en middellevetid på $2,2 \cdot 10^{-6}$ sek. Hvis den kunne flyve med lyshastighed ($3 \cdot 10^8$ m/sek), ville vi måske forvente, at den kunne løbe 660 m i middel, før den henfaldt.

Men rent faktisk ser vi myoner i massevis ved jordoverfladen, selv om de er produceret i adskillige kilometers højde. Det bekræfter, at Einsteins formel for tidsforlængelsen fungerer. My-partiklerne flyver nemlig med en hastighed meget tæt ved lyshastigheden. Så får de en stor værdi af gamma, og så lever de gamma gange så længe. Relativitetsteoriens regel er, at når en partikels energi er større end hvileenergien med en faktor gamma, så lever den også længere med præcis den samme faktor gamma. En myon vejer 106 MeV. Hvis den for eksempel måles at have en energi på 30 GeV, så har den altså et gamma på $30.000 \text{ MeV} / 106 \text{ MeV} = \text{ca. } 280$, og så løber den i middel ikke blot de 660 meter fra før, men $660 \cdot 280 \text{ m} = \text{ca. } 185 \text{ km}$, og så har den ingen problemer med at nå jordoverfladen.

Et par ord om den almene relativitetsteori

Den specielle relativitetsteori forudsætter, at vi kan se bort fra tyngdekræfter. I årene efter 1905 var Einstein optaget af at generalisere den, og resultatet, den almene relativitetsteori, står som en af de smukkeste og mest fascinerende tankebygninger, en enkelt mand nogensinde har udformet. Einsteins afgørende indsigt var, at tyngdefeltet kan fortolkes som en ændring af rummets og tidens geometri. Vi lærer i skolen, at summen af vinklerne i en trekant er 180 grader. Det er rigtigt nok, hvis trekanten er flad, men hvis trekanten ligger på den krumme jordkugle, passer det ikke. Og hvis trekantens sider er fastlagt af lysstråler, så gælder reglen heller ikke helt, når der er et tyngdefelt i nærheden. Einstein opstillede ligninger for, hvad der sker i detaljer. De er blevet bekræftet ved præcisionsmålinger i astronomien.

Den almene relativitetsteori giver også en meget spændende basis for forståelse af hele universets udvikling, det vi kalder kosmologi, specielt i forbindelse med den såkaldte "big-bang" teori. Men mange træk er endnu gådefulde. Den største gåde af alle beror på, at den almene relativitetsteori *ikke* umiddelbart kan forenes med kvantefysikken! Her ligger kimen til megen af den forskning, der foregår i disse år. Et andet gådefuldt træk er, at Standardmodellens teorier for de svage, de stærke og de elektromagnetiske vekselvirkninger ganske vist slet ikke tager hensyn til den almene relativitetsteori, men dog i deres matematiske struktur har en række slående lighedspunkter med den, skønt de netop er helt forenelige med kvantefysikken. Ofte kan vi derfor få lyst til at regne den almene relativitetsteori med til Standardmodellen. Men tyngdekræfterne mellem elementarpartiklerne er i praksis umåleligt små i forhold til de tre andre naturkræfter.

2. Kvanteteori og elementarpartikler

Tiden er inde til at stifte nærmere bekendtskab med kvanteteorien. Den blev udviklet gennem den første fjerdedel af det 20. århundrede. Aldrig før eller siden er der i den grad blevet ændret ved vores forståelse af selve vilkårene for overhovedet at formulere naturlove. Vi kan slet ikke i denne bog komme ind på alle de mærkelige træk, der kendetegner kvanteteorien, men vi må alligevel beskæftige os med nogle få af dem for at kunne forstå partikelfysikken.

Som noget af det første vil vi forsøge nærmere at omtale kvantefelter og deres forhold til elementarpartikler. En af de vigtigste opdagelser, der er nedfældet i Standardmodellen, er nemlig, at det synes at være en ualmindelig god idé at formulere de (indtil videre) mest fundamentale naturlove ved hjælp af kvantefelter.

Kvantefysikken arbejder med forestillinger, som ofte er radikalt anderledes end dem, man anså for selvindlysende i tidligere tiders fysik. Det er derfor blevet almindeligt at omtale de fysiske begreber fra før kvantefysikkens tid som *klassiske*. Det er dem, vi alle sammen mere eller mindre bevidst baserer vores hverdagserfaringer på.

Kvantefysikken er så at sige den rigtige. Men der findes masser af fysiske situationer, hvor de mærkelige kvantefænomener ikke spiller nogen nævneværdig rolle. Det var kun sådanne fysiske situationer, man mødte indtil omkring år 1900. I disse situationer kan vi stadig med stor nytte anvende de gode gamle klassiske begreber. Noget af det mærkelige ved de kvante-felter, vi snart skal høre om, er, at de somme tider opfører sig ganske som klassiske *partikler* – altså aldeles ikke som *felter* – men til andre tider ganske som klassiske *felter* – og altså aldeles ikke som partikler. Sådan er det virkelig, men det kræver en nærmere uddybning. Lad os derfor begynde stille og roligt med at se på klassiske *felter*.

Klassiske felter

Det kan ofte virke forvirrende, at fagfolk bruger dagligdags ord i højst specifikke betydninger. Anvendelsen af ordet *felt* er et eksempel. Hvad mener fysikerne, når de bruger det ord? Lad os give et par eksempler.

Tænk først på en rolig vandflade. Overfladen i et badekar fyldt med vand, eller overfladen i et lille gadekær en stille dag. Tænk derefter på en lille vanddråbe, der falder ned på vandoverfladen. Vi ser som bekendt nydelige ringe udbrede sig væk fra stedet, hvor dråben faldt. Inde i ringen er vandfladens niveau en smule anderledes end udenfor, hvor der er ro. Vi har her et eksempel på et felt: Vandoverfladens niveau i forhold til niveauet, da fladen var i ro. Feltet kan angives ved en talværdi hørende til hvert eneste punkt på vandfladen. Inden dråben falder, er feltets værdi $= 0$ overalt på vandfladen. Efter dråbens fald kan vi tænke på feltets værdi i et bestemt punkt et stykke væk fra stedet, hvor dråben faldt. Straks efter er feltets værdi her stadig $= 0$, men lidt senere, når ringen når det punkt, vi peger på, ja så ændrer feltet sig; vandfladen her skvulper lidt op og ned, hvorefter feltet efterhånden falder til ro igen i værdien 0. Der kan altså forekomme bølgesvingninger i feltet. De vil vise sig at være i forbavsende nær familie med vores emne, elementarpartiklerne. Hvis vi lader en jævn strøm af dråber falde, for eksempel 4 dråber i sekundet, så dannes et vedvarende bølgetog, og vi siger, at bølgens *frekvens* er 4 svingninger pr. sekund, eller 4 Hz (hertz). Afstanden mellem bølgetoppene (i udbredelsesretningen) kalder vi *bølgelængden*.

Et andet godt eksempel har vi i luftens tryk i et lokale. Normalt har trykket samme værdi overalt, men lyder en tone gennem luften, vil trykket vibrere med en frekvens på fx nogle hundrede Hz. Feltets værdi i et bestemt punkt i lokalet er trykkets afvigelse fra værdien, når der er stille. Lyd er bølgefænomener i dette trykfelt.

Næste eksempel vil vise sig at ligge lige op ad partikelfysiken. Lad os tænke på elektriske og magnetiske felter. Lad os først tænke på magnetfeltet fra en legetøjsmagnet. Vi kan ligefrem "mærke" feltet, når vi nærmer et jernsøm eller sådan noget til magneten. Vi kan også tænke på Jordens magnetfelt. Et kompas viser, at dette magnetfelt "peger". Legetøjsmagneten forstyrrer kompasset, hvis vi nærmer de to til hinanden. Magnetfelter kan altså være kraftige eller svage ligesom vandbølge- og lydbølge-felter, men de kan også noget nyt: de kan pege. Elektriske felter har det på samme måde. De påvirker ikke magnetnåle, men elektriske lad-

ninger. En elektrisk ladning, der slippes fri i et elektrisk felt, vil løbe hurtigere og hurtigere i feltets retning, som vi omtalte det i kapitel 1 i forbindelse med en partikel-accelerator. Det *elektromagnetiske* felt er altså ret så indviklet at beskrive.

Som Maxwell opdagede, kan det elektromagnetiske felt også bølge. Hvilke frekvenser og bølgelængder kender vi godt? Et blik på FM-modtageren viser, at FM-radiofrekvensen ligger omkring 100 MHz. 1 MHz står for 1 Megahertz eller 1.000.000 Hz = en million svingninger pr. sekund. Altså

$$\text{frekvensen} = 10^8 \text{ Hz} = 10^8 \text{ pr. sekund}$$

Bølgelængden hørende hertil er ca. 3 m. Det er derfor, VHF-antenner har sådan cirka den størrelse. Der gælder reglen

$$\text{bølgelængde} \cdot \text{frekvens} = \text{lyshastighed.}$$

Det passer fint her: $3 \cdot 10^8$ m/sek er virkelig lyshastigheden.

Vi har nævnt, at radiobølger og almindeligt lys er bølger i det samme felt, blot med vidt forskellig frekvens og bølgelængde. For rødt lys har vi således en bølgelængde på ca. $7 \cdot 10^{-7}$ m og en frekvens på ca. $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz. For blå lys er bølgelængden ca. $4 \cdot 10^{-7}$ m og frekvensen $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz. Synligt lys har altså en bølgelængde på hen ved halvdelen af en tusindedel af en millimeter.

Lad os slutte med at understrege, at klassiske felter synes at være så forskellige fra partikler, som noget næsten kan være. En partikel er punktformig; felter er noget, der flyder ud over et helt område. Så hvorfor skal vi høre så meget om felter i en bog om partikelfysik? Forklaring følger straks.

Det elektromagnetiske kvantefelt: fotonfeltet

Kvantehypotesen blev formuleret af tyskeren Max Planck i året 1900. Lad os se hvordan. Et af de problemer, som optog fysikerne i 1890'erne, drejede sig om at forstå farvesammensætningen af lyset fra lyskilder med forskellig temperatur. Solen udsender lys i alle mulige farver – alle mulige bølgelængder og frekvenser. Vi ser "alle regnbuens farver", når lyset brydes. Tilsvarende med lyset fra en elektrisk pære. Men lyset fra en pære er noget mere rødtligt end lyset fra Solen. Det skyldes, at pæren har en temperatur på under 3000 grader, mens Solens overflade har en temperatur på næsten 6000 grader. Jo koldere lyskilde, jo rødere lys, og jo varmere lyskilde, jo mere blåligt lys. Men hvorfor?

I 1890'erne havde man en god forståelse af, hvad varme og kulde betyder for eksempel for den luft, vi indånder. Luftens molekyler er i uophørlig og forvirret bevægelse med masser af sammenstød til følge. At luften er varm betyder, at molekylerne løber hurtigere i gennemsnit, end hvis luften er kold. Der gælder en simpel lovmæssighed, som understreger, at det vigtige begreb ikke direkte er molekylernes hastighed, men deres bevægelsesenergi. Der er en helt præcis regel for hvor stor en del af molekylerne, der har en bestemt energi ved en bestemt temperatur. Der er flere molekyler med høj energi i varm luft end i kold luft.

Men hvad nu med lyset? Har blå lys mere energi end rødt lys? Der er jo mest blå lys i varme lyskilder? Men vi kender allesammen til kraftigt rødt lys med høj energi og svagt blå lys, så i lang tid kunne ingen fysiker rigtig få det til at passe. Men Planck fandt en løsning. Den så ganske vist højst mærkelig ud, og den skulle i sandhed vise sig at have de mest vidtrækkende konsekvenser. Planck påpegede, at alt kunne forstås meget smukt, hvis han forudsatte, at lys af en bestemt frekvens kun kan forekomme i visse mindste portioner: *kvanter*. Heraf: kvantehypotese, kvanteteori osv. Tanken er mærkelig. Tænk på lys af en bestemt frekvens, eller farve. Vi kan forestille os, at vi skruer ned for lysstyrken – mere og mere. Kvantehypotesen postulerer nu, at for hver frekvens er der noget, vi kunne kalde "det svageste lys". Enten er der ingenting, eller også er der mindst ét kvant, én *foton* (græsk: phos = lys). For at få sammenhængen mellem farve og temperatur til at passe, måtte Planck bruge følgende regel: Et lyskvant (en foton) med en høj frekvens har en høj energi, og et lyskvant med en lav frekvens har en lav energi. Kvantehypotesen siger helt præcist, at der findes et tal, Plancks konstant, så at

$$\text{kvante-energi} = \text{frekvens} \cdot \text{Plancks konstant}.$$

Plancks konstant plejer man at kalde h .⁵ Ligesom lyshastigheden kan stå som en slags overskrift for relativitetsteorien, sådan kan Plancks konstant stå som overskrift for kvanteteorien. Når vi ser på den svageste stjerne, vi kan skimte på himlen, modtager vores øje fra den ca. 1000 fotoner pr. sekund. Ser vi på Solen, brænder vi øjet af med 10^{16} fotoner pr. sekund. Det kan give en idé om, hvor lille Plancks konstant er.

"Røde" fotoner har altså mindre energi end "blå" fotoner. Det passer med reglen om, at "kolde" lyskilder lyser rødligt. Vi kan

⁵Dens værdi er $6,62608 \cdot 10^{-34}$ Joule · sek.

sagtens have rødt lys med megen energi. Det kræver bare flere fotoner end blå lys.

En foton, altså et lyskvant, er kvantefeltteoriens udgave af en partikel. Tanken, at lysbølger sådan skulle kvantiseres og have partikelegenskaber, var næsten for mærkelig i begyndelsen af århundredet. Men faktisk havde fysikerne i de selvsamme år – uden at vide det – opdaget et fænomen, hvor man uden vaklen kunne skelne de enkelte fotoner. I 1896 havde franskmanden Henri Becquerel opdaget, at uransalte udsendte mærkelige stråler. Hans kolleger, ægteparret Pierre og Marie Curie, indledte systematiske undersøgelser over denne naturlige radioaktivitet. De fandt, at den bestod af 3 helt forskellige slags stråling: alfa- beta- og gamma-stråling (når man ikke aner, hvad der foregår, kan man lige så godt begynde forfra i det græske alfabet). Først meget senere blev det klart, at disse stråler blev udsendt af ustabile, store, tunge atomkerner. Alfa-strålerne er helium-kerner, beta-strålerne er såmænd elektroner, mens gamma-strålerne er – ja: fotoner. Enhver, der har hørt gammastråler sige klik, ..., klik, ... i en tæller, har fået en levende fornemmelse af deres yderst partikel-agtige egenskaber. At de er så meget mere partikelagtige end synlige fotoner, skyldes et eneste simpelt forhold: deres bølgelængde er omkring en million gange mindre – og frekvensen tilsvarende en million gange højere. Det er "MeV-fotoner", der har energier i omegnen af en million elektronvolt, mens fotoner af synligt lys er "eV-fotoner", som har energier i omegnen af en elektronvolt (se kapitel 1).

Mere om fotoner

Det elektromagnetiske felts kvanter kaldes altså fotoner. De har *både* bølgeegenskaber og partikelegenskaber. Lad os se nærmere på fotonernes partikelegenskaber. Vi så i kapitel 1, at en partikel er karakteriseret ved sin energi og sin impuls. Energien for en foton har vi talt om. Den er Plancks konstant gange frekvensen. Men lys har også impuls. Den viser sig for eksempel ved det lystryk, der puster den ene af en komets to haler væk fra Solen. Maxwell beviste, at impulsen i en lysbølge er lig med bølgens energi divideret med lyshastigheden, c . Det samme gælder for vores lyskvanter, fotonerne. Efter den specielle relativitetsteori (kapitel 1) kan vi nu finde fotonernes masse. Formlerne giver det måske overraskende svar: Fotonens masse er 0! Det er nu ikke så sært endda. Vi så, at partikler med masse større end 0 aldrig ville kunne løbe lige så hurtigt som lyset. Men lyset selv, ja det løber minsandten med

lyshastighed. Eneste løsning: massen af en foton er 0.

Fotonerne har yderligere en vigtig egenskab, vi vil interessere os for. De har et vist *spin*. Fysikere og ingeniører måler legemers spin. En legetøjs-snurretop har et spin, der er meget mindre end jordkuglens spin. Spinnet er stort for legemer, der er store, tunge og drejer hurtigt rundt. At lysbølger besidder et vist spin, er igen noget, allerede Maxwell var klar over. Fænomenet er relateret til lysets polarisation. Man skærer den ene af to polarisationer væk, når man bruger solbriller med polariserende glas. Men hvor stort er så spinnets for en enkelt foton?

Igen løber vi ind i et mærkeligt forhold vedrørende selve kvanteteorien. Det viser sig, at partiklers spin også er "kvantiseret". Der er grænser for, hvor lidt et eller andet kan "dreje rundt": enten er spinnets 0, eller også er det et vist helt tal gange "det mindste spin, der findes". Det mindste spin, der findes, er næsten Plancks konstant. Man indfører betegnelsen $\hbar$ for Plancks konstant divideret med 2π ($\pi = 3,1415\dots$), altså $\hbar = h/2\pi$. Spinnets kan angives i enheder af $\hbar$. Jordkuglen har et spin på ca. $7 \cdot 10^{67} \hbar$, mens en grammofonplade, der spiller, har et spin på $4 \cdot 10^{31} \hbar$. Vi ser igen, at Plancks konstant er en uhyre lille størrelse. $\hbar$ kan angives som $6,6 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{sek}$.

Hver elementarpartikel har sit eget karakteristiske spin, som er en meget vigtig egenskab ved partiklen. Elementarpartiklerne kan deles i to store grupper: (1) De, der har et spin på $\hbar$ gange et vist helt tal (herunder dem, der har spin 0). De kaldes *bosoner* (efter den indiske fysiker S. Bose). Vi siger, de har heltalligt spin. (2) De, der har et spin, som er $1/2$ eller $3/2$ eller $5/2$ osv. gange $\hbar$. De kaldes *fermioner* (efter italieneren E. Fermi). Vi siger, de har halvtalligt spin. Kvanteteorien lærer os, at andre muligheder ikke findes, ligegyldigt om det drejer sig om spinnets af en elementarpartikel, en atomkerne, et atom eller hvad som helst andet. Man har da også målt tusindvis af spinværdier, og altid fundet overensstemmelse med reglen.

Det viser sig nu, at fotoner har et spin på 1 (gange $\hbar$). Dels er det målt utallige gange, dels er det faktisk en matematisk følge af den lidt indviklede måde, det elektromagnetiske felt måtte beskrives på. Det faktum, at felterne kan "pege", oversættes via kvanteteorien til størrelsen af fotonens spin: 1. Fotonen er altså en boson. Vi skal se, at den er prototypen på de partikler, (gluoner, W- og Z-partikler), der så at sige formidler kræfterne mellem de øvrige partikler i Standardmodellen.

Elektroner, positroner og deres felt

Elektroner kan også betragtes som kvanter i et særligt *elektron-felt*. Faktisk "forklarer" et elektronfelt straks en aldeles bemærkelsesværdig omstændighed: alle elektroner er fuldstændig ens. De har samme masse, samme ladning, og samme spin $= 1/2$ (underforstået: gange $\hbar$). Elektronerne er altså fermioner. Det er denne totale identitet af alle elektroner (og tilsvarende alle protoner osv.), vi fremhævede i indledningen. Den er en følge af *kvantefelt*-begrebet: alle elektroner repræsenterer bølgeanslag i et og samme elektronfelt. Den mindste felt-eksitation (som vi kalder dette "anslag") er kvantefeltteoriens udgave af en elektron. Et af de dybeste resultater i kvanteteorien er følgende: Når vi behandler to så vidt forskellige systemer som (1) et klassisk felt, og (2) identiske klassiske partikler efter kvanteteorien regler, fås i begge tilfælde nøjagtig det samme resultat: et kvantefelt.

Ligningerne for det elektromagnetiske felt blev som nævnt fundet af Maxwell i 1860'erne. Ligningerne for elektronfeltet blev fundet af englænderen P.A.M. Dirac omkring 1930. Diracs elektronteori blev en bemærkelsesværdig teoretisk triumf. For det første førte den til partikler med halvtalligt spin, noget, man ikke tidligere havde forstået. For det andet medførte den, at elektronen måtte have en *antipartikel*. Elektronfeltet er ganske kompliceret at beskrive. Det kan ikke bare angives ved en simpel talværdi. Det kan heller ikke beskrives ved noget, "der peger", sådan som det elektromagnetiske felt kunne. Det har andre slags "måder at være på", "frihedsgrader", som vi ikke kan komme nærmere ind på. Men disse frihedsgrader er sådan, at det nødvendigvis vil kunne anslås på en måde, som svarer til en partikel med samme masse og spin som elektronen, men med præcis modsat elektrisk ladning. I 1932 fandt amerikaneren C.D. Anderson "den positive elektron". Den fik navnet positronen, som allerede nævnt. Positroner kan nu massefabrikeres som omtalt i kapitel 1.

Elektroner og positroner er altså partikler med energi, impuls, masse og spin – som sig hør og bør for partikler. Men de er også felt-eksitationer med bølgelængde og frekvens. Frekvensen bestemmes ganske som for fotoner efter reglen

$$\text{energi} = h \cdot \text{frekvens}$$

(h = Plancks konstant), og bølgelængden bestemmes efter reglen

$$\text{impuls} \cdot \text{bølgelængde} = h$$

Disse regler gælder for samtlige elementarpartikler! De er værd at bide mærke i.

Vi sagde før, at fotonfeltet er prototypen på "kraft-felter" i standardmodellen. Tilsvarende vil elektronfeltet vise sig at være prototypen på "stof-felter", som man sommetider kalder dem.

Heisenbergs ubestemthedsrelationer

Den økonomisk bevidste læser, der så på luftfotografiet af CERN i kapitel 1, kunne spørge: "Hvorfor skal man bruge sådan en stor accelerator til at studere sådan nogle små partikler?" Dette spørgsmål kan vi nu besvare. En partikelaccelerator kan sammenlignes med et mikroskop. Vi ønsker jo at "se på" meget små partikler. Et almindeligt mikroskop kan kun studere genstande større end ca. $1/1000$ mm, simpelt hen fordi bølgelængden af synligt lys har ca. denne størrelse. For at studere mindre ting må vi have stråling med kortere bølgelængde. Reglen fra før, at impuls gange bølgelængde er lig med h viser, at vi for at få en meget lille bølgelængde må bruge partikler med meget stor impuls. I et elektronmikroskop kan man således ret nemt have elektroner med bølgelængder 100 gange mindre end synligt lys. Men for at studere detaljer i en atomkerne med en diameter på ca. 10^{-15} m, må vi have fat i bølger med bølgelængder, der er mindst 10^9 gange mindre end for synligt lys. Vi har set, at fotoner af synligt lys har energier af arten 1 eV. I partikelfysikken må vi derfor have fat i energier på 10^9 eV = 1 GeV eller mere. (Egentlig var det ikke energien, men impulsen, vi skulle se på, men for relativistiske partikler er argumentet korrekt). Vi forstår nu, hvorfor partikelacceleratorer arbejder med GeV-partikler. I LEP havde vi således ca. 50 GeV pr. beam, og i andre tilfælde kan man producere protoner med energier på ca. 1000 GeV, og derved studere detaljer mindre end 1 promille af en proton-diameter!

Altså: acceleratorerne skal være så store, fordi vi må frembringe meget høje partikel-energieer for at kunne studere meget små detaljer. Partikel-acceleratorerne er bygget efter Einsteins specielle relativitetsteori, har vi sagt. Men selve årsagen til de høje energier ligger i kvanteteoriens sammenhæng mellem bølgelængde og impuls.

Alt dette er nært forbundet med Heisenbergs berømte kvantefysiske *ubestemthedsrelationer*. En kvantepartikel med en bestemt impuls har altså en bølgelængde. Det er måske klart, at den så ikke rigtig kan stedfæstes mere nøjagtigt end inden for sådan ca.

en bølgelængde. For at stedfæste en partikel med stor nøjagtighed må den derfor have en lille bølgelængde, men det kræver en stor impuls! En partikel, der ligger helt stille (har impuls 0) kan strengt taget slet ikke stedfæstes. Tyskeren Werner Heisenberg var en central person i udviklingen af kvanteteorien. Han opholdt sig ofte hos Niels Bohr i København i de "gyldne" år efter 1925. Om natten kunne han gå rundt i Fælledparken, dybt forvirret over, om verden virkelig kunne være så mærkelig, som kvantefysikken krævede. Det kunne den! Hans ubestemtheds-relation for en partikel kan udtrykkes:

$$(\text{ubestemthed i impuls}) \cdot (\text{ubestemthed i sted}) > \hbar$$

Der er endnu en udgave af ubestemthedsrelationerne, vi vil få meget brug for. Lad os tænke på en ustabil partikel, der henfalder til andre partikler. Det kan kun ske for partikler med en masse større end 0. Lad os tænke på, at den ustabile partikel ligger stille. Den har en vis middellevetid. Hvornår den præcist henfalder, kan vi ikke vide. Men hvis der er mange ens partikler, betyder det, at efter et stykke tid – den såkaldte halveringstid – er halvdelen af partiklerne henfaldet. Venter vi halveringstiden en gang til, er halvdelen af resten henfaldet, osv. (Middel-levetiden kan vises at være ca. 1,44 gange halveringstiden).

Lad os nu se, hvordan denne situation beskrives i feltteorien. Den hvilende partikel svarer til et felt, der vibrerer med en frekvens, som er hvile-energien divideret med h . Der er ingen bølgeudbredelse, da partiklen ligger stille. Feltet står bare og "synger" med den der frekvens. Hvileenergien er efter Einsteins formel lig med massen gange c^2 (c = lyshastigheden). Frekvensen er altså fastlagt af massen. At partiklen henfalder, betyder, at feltudsvingene dæmpes (stort set) til det halve i en halveringstid. (Samtidig vokser andre felter frem. De beskriver de nye partikler, den gamle henfalder til.)

Enhver musiker ved, at når man anslår to strenge, som stemmer næsten, men ikke nøjagtigt ens, så optræder en stødtone, lydstyrken varierer i tiden. Omvendt: enhver tidsvariation af en lydstyrke betyder, at der må være toner med lidt forskellige frekvenser. Ligeså for feltet. Når feltudsvingene henfalder, kan feltet ikke vibrere med en helt bestemt frekvens. Men det betyder så igen, at partiklens masse ikke kan have en helt bestemt værdi! Det skal vi møde flere eksempler på. Det er igen et udtryk for Heisenbergs ubestemthedsrelationer. Reglen er, at ustabile elementarpartikler med en vis middellevetid vil have deres masser

"udtværet" med en vis størrelse. Denne størrelse kaldes *partiklens bredde*. Der gælder reglen

$$\text{bredde} \cdot \text{middellevetid} = \hbar.$$

Vi har allerede mødt eksemplet med Z-partiklen. Den observeres som en resonans-top med bredden 2,5 GeV (se også kap. 5). Denne bredde er altså et udtryk for, at massen er udtværet med så og så meget. Vi kan bruge formlen til at finde (middel-)levetiden for Z-partiklen: $2,6 \cdot 10^{-25}$ sek.

3. Fra atomer til kvarker

Kvantestigen

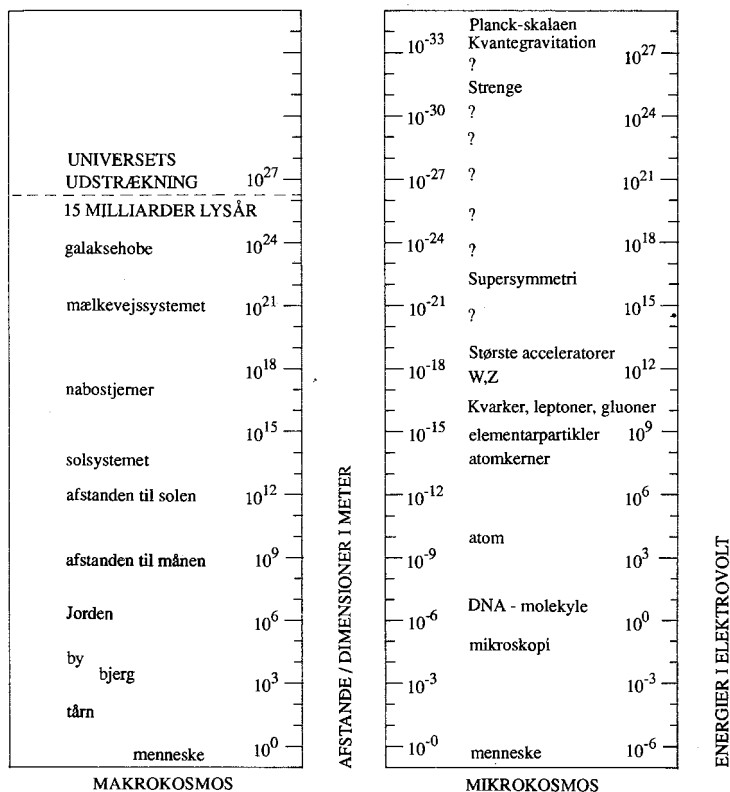
I H.C. Andersens eventyr "Vanddraaben" sidder naturforskeren Krible-Krable med et "...Forstørrelsesglas, ..., der gjør Alting hundrede Gange større end det er ...". Han ser på mikroskopiske dyr, der "...trak i hverandre og aad af hverandre ...", og han viser det hele til "...en anden gammel Trolde, som ikke havde noget Navn...", og som fornøjet udbryder: "Det er overordentlig morsomt!". "Ja, men hvad tror du, det er?" spurgte Krible-Krable. "Kan du finde det ud?" "Det er da godt at se, ..., det er jo Kjøbenhavn eller en anden stor By ..."

Dette er ikke stedet at udlægge Andersens lignelse, som vel er nok så tydelig. Vi vil nøjes med lidt tørt at fremhæve, at "Trolde, som intet Navn havde", jo selvfølgelig heller ikke havde ret. (Krible-Krable havde unægtelig kommet "Hexeblood" i "Vanddraaben"). Men alene det er i grunden en tanke værd: Hvorfor ser vi *ikke* små mennesker mage til os selv, når vi ser i et mikroskop? Og hvorfor er vi *ikke* selv mikrober i håret på en eller anden kæmpe? Hvorfor gentager fænomenerne *ikke* bare sig selv i det uendelige ved mindre og større skalaer?

Disse forhold er opsummeret i den pædagogiske fremstillingsform, der er kaldt *kvantestigen*.

Figuren med kvantestigen har vi delt i to for at få bedre plads. Hvert inddelingsmærke svarer til at gange eller dividere alle størrelser med 10. På den måde får vi plads til så at sige alle skalaer lige fra hele universet og ned til de mindste elementarpartikler. I dette kapitel vil vi se nærmere på intervallet fra ca. 10^{-10} m til 10^{-19} m. Det er det interval, der dækkes af de tre fagdiscipliner atomfysik, kernefysik og partikelfysik. I *mikrokosmos*-halvdelen af figuren har vi dels – til venstre – markeret størrelsen af atomer, kerner osv. målt i meter; dels har vi – i højre side – indsat nogle energier, målt i elektronvolt. Meningen er, at hvis et mærke på venstre side er bølglængden for en foton, så svarer højre side til energien af denne foton. Eksempel: en bølglængde på 10^{-7} m

KVANTESTIGEN



Figur 3.1 Den østrigsk-amerikanske fysiker V. Weisskopf har indført begrebet kvantestige som en pædagogisk sammenfatning af bemærkelsesværdige forhold i naturen, som må forstås på basis af kvantefysikken. Ved forskellige karakteristiske størrelser skal der tilsyneladende helt nye begreber til for at beskrive fænomenerne: stigen har trin.

I makrokosmos-halvdelen går vi til større og større fænomener, når vi går opad i figuren. Hver streg svarer til en faktor 10. I mikrokosmos-halvdelen går vi til mindre og mindre detaljer, når vi går opad i figuren. Kvantefysikken tillader os at relatere disse mindre og mindre skalaer til større og større energier ved hjælp af Plancks konstant og lyshastigheden (kapitel 2). Disse energier er afmærket yderst til højre.

svarer til fotoner med energien ca. 2 elektronvolt, nemlig et punkt lidt over mærket for $10^0 = 1$ eV.

Denne sammenhæng mellem længde og energi er et udtryk for, at kvantefysikken har været på spil: vi har brugt Plancks konstant (kap. 2). Heraf navnet *kvantestige*. Og stigen har trin: Forskellige niveauer – to-tre faktorer 10 – har deres egne karakteristiske begreber. Ved en skala på ca. 10^{21} meter er det mælkevejssystemer eller galakser, det handler om, medens begreber som bjerge og byer ingen rolle spiller. Tilsvarende, når vi tænker på skalaen omkring 10^{-10} m. Her handler det om atomer, medens igen bjerge og byer er irrelevante, ja selv de fleste elementarpartikler er ganske uinteressante for en atomfysiker.

Stigetrinene er helt forskellige: En galakse kan slet ikke opfattes som et "kæmpe-atom", for eksempel. Vi vil forsøge at forstå trinene fra atomer til kvarker. Denne forståelse er på en måde grundlaget for forståelsen af hele resten.

Lad os se nærmere på energiskalaen yderst til højre. Vi ser, hvordan partikelfysikken er domineret af GeV-energi (1 til 1000 GeV nu om dage). Tilsvarende handler kernefysik om MeV-energi, medens atomfysikkens fænomener foregår ved eV-energi. De inderste elektroner i atomet kan udsende røntgenstråler (fotoner) med keV-energi, og det er meget i forhold til synlige eV-fotoner, men stadig meget lidt i kerne- eller partikelfysikken. (Husk fra kap. 1, at $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$, $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$).

Selve årsagen til kvantestigens forskellige trin må søges i en subtil balance betinget af vigtige naturkonstanter. Der findes ingen mikromennesker, fordi der ikke findes mikroceller med mikro-DNA-molekyler lavet af mikroatomer. Atomerne kan kun have den størrelse, de har. Den er bestemt af (kvante-)fysikkens love samt af de der naturkonstanter. Plancks konstant og lyshastigheden er særlig vigtige, men også elektronmassen (for kernerne: pionmassen) spiller en afgørende rolle. Det skal vi nu se nærmere på.

Atomer og deres natur

I 1911 blev den moderne atomfysik født. Englænderen Rutherford opfandt en eksperimentel teknik, der førte til opdagelsen af atomets kerne: Næsten hele atomets masse findes inden for et lille område på 10^{-15} til 10^{-14} m, kun ca. 1/100.000 af atomets totale udstrækning. Hvordan kunne man se noget så småt? Pudsigt nok ved at benytte sig af selve den kerne, man ikke havde drømt om

at finde. I 1911 var den naturlige radioaktivitet ret velstuderet, og Rutherford brugte naturlige alfa-partikler som et beam, der blev skudt ind på et guldfolie, hvis atomer derved blev undersøgt. Alfapartiklerne selv havde befundet sig inden i for eksempel en urankerne i årmillioner, før kernen var henfaldet og havde udsendt dem. Derfor havde de nødvendigvis en bølgelængde omtrent som kernens udstrækning (se kap. 2), og *derfor* kunne de just bruges til selv at skelne noget så småt som en atomkerne. Hvis atomets positive elektriske ladning *ikke* havde været samlet i en kerne, ville alfapartiklerne kun være blevet afbøjet ganske lidt. Rutherford og hans medarbejdere Geiger og Marsden observerede, at de undertiden blev afbøjet med meget store vinkler. Beregninger viste, at det netop svarer til, at hele den positive ladning er samlet i en meget lille, tung kerne.

Rutherfords eksperiment blev i princippet gentaget ved langt højere energier fra slutningen af 1960'erne. Det førte til opdagelsen af *protonens* "kerner": kvarkerne! Herom lidt senere.

Rutherford kunne nu fremsætte sin atom-model. Kernens positive ladning tiltrækker elektronernes negative ladninger via sit elektriske felt. Den matematiske lov herfor har samme form som loven for Solens tiltrækning af planeterne. Han foreslog derfor en model, hvorefter elektroner kredser om kernen som planeter om Solen. Men som især Niels Bohr påpegede, måtte der være alvorligt knas med modellen. Sådanne kredsende elektroner skulle nemlig hele tiden udsende lys (ifølge Maxwell og den gryende radioteknik). Derved ville de miste energi, svæve tættere på kernen, hvorefter atomerne og alt det stof, vi er lavet af, dels altid ville lyse, dels meget hurtigt blive til næsten ingenting. Det sker heldigvis ikke! Men hvorfor?

I Niels Bohrs banebrydende arbejde fra 1913 skitseres løsningen ved hjælp af Plancks kvantehypotese. Lad os prøve en forståelse baseret på kap. 2. Hvis elektronerne skulle ende med at kredse helt ind i kernen, så ville det kræve en meget, meget lille bølgelængde for elektronerne, derved en meget, meget stor impuls, og derfor: en meget stor energi – i modstrid med, at elektronerne skulle have *mistet* energi! Atomernes stabilitet skyldes altså et snedigt samspil: På den ene side søger kernens elektriske ladning at "suge" elektronerne tæt ind på sig. På den anden side sørger elektronernes kvante- og bølgeegenskaber for, at de ikke kan komme alt for tæt på. Det er fysikkens opgave at beregne i detalje, hvor balancepunktet – atomets *grundtilstand* – kommer til at ligge. Atomfysikere kan udføre disse beregninger med enorm nøjagtighed (i hvert fald

for de simpleste atomer).

Hvor stærkt "suger" kernens og elektronens ladning mod hinanden, for eksempel i et brintatom? Naturen giver os sin egen "naturlige" målestok. Den er – jo såmænd – Plancks konstant ganget med lyshastigheden. Målt i denne enhed er produktet af elektronens og protonenes ladninger (for det er den størrelse, vi har brug for) et berømt tal: $1/137$, kaldet finstrukturkonstanten og kendt med 10 betydende cifre.⁶

Hver partikel har endvidere sin egen "naturlige længde"⁷: Fysikere taler om Compton-bølgelængden. Den vil vi møde igen og igen. Vi finder den fra kvantestige-figuren. Elektronens masse er $0,51 \text{ MeV} = 0,51 \cdot 10^6 \text{ eV}$. Vi ser på kvantestigen, at det svarer til ca. $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}$. Så stort ville atomet have været, hvis ladningerne havde haft den "naturlige" størrelse. De svagere ladninger lader imidlertid brintatomet blive 137 gange så stort. Og vi får brintatoms størrelse: ca. $0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Man taler om en "Bohr-radius". Vi aner, hvordan naturkonstanterne sammen med læren om kvanteteori osv. giver os en forståelse af stoffets "mursten", atomerne.

Lad os tænke lidt mere på det simpleste atom, brintatomet, med kun én proton som kerne og kun en enkelt elektron udenom. I fredelige omgivelser er sådan et atom meget stabilt. Det har tilsyneladende ikke andre egenskaber end sin masse (og sit spin). Det er virkelig "udeleligt", så længe det ikke påvirkes for voldsomt. Først hvis forstyrrelserne når op i eV området for hvert atom, sker der noget. Således på Solens overflade, hvor atomerne ustandselig støder sammen. Her "anslås" (eksciteres) de: deres elektroner forlader grundtilstanden. Elektronfeltet finder sig til rette i et højere energileje – vi siger, at elektronen springer op i en højere kvantetilstand. Men den forlades snart igen til fordel for den lavere energitilstand. Den overskydende energi afleveres så som en foton, som lys. Elektronerne har kun mulighed for at eksistere i visse ganske bestemte kvantetilstande, svarende til ganske bestemte energiforskelle. De udsender derfor deres lys i ganske bestemte frekvenser, dvs. farver: i spektrallinier.

⁶Der indgår i sammenhængen mellem ladning og finstrukturkonstant desuden et ubenævnt tal, som afhænger af enhedssystemet, men som ikke har nogen selvstændig fysisk betydning.

⁷Det betyder ikke, at partiklen er "så lang" eller overhovedet har denne størrelse, men at partiklens indflydelse på omgivelserne er særlig vigtig inden for denne afstand.

Pauli-princippet og stofpartikler

Lad os også tænke på et lidt mere indviklet atom, for eksempel et iltatom. Kernen består af 8 protoner og 8 neutroner. Det færdige atom må så omgives af 8 elektroner for at blive elektrisk neutralt. Lad os tænke på at "drysse" de 8 elektroner på én ad gangen. Den første indfanges og afleverer eventuelt noget energi som lys, før den når ned til sin grundtilstand. Men nu er kerneladningen 8 gange større end for brintatomet, så elektronen suges 8 gange længere ind mod kernen. Næste elektron drysses på, og så fremdeles. Men hvordan vælger de at lægge sig?

Vi kommer til en ganske afgørende egenskab ved elektroner, ja ved alle fermioner: partikler med halvtalligt spin (se kap. 2). Sådanne fermioner tåler ikke selskab af andre i en bestemt kvantetilstand. Elektron nr. 2 kan derfor ikke helt ligge i samme tilstand som nr. 1. Godt nok kommer nu elektronspinnet til hjælp. Elektroner har et spin på $1/2$ (se kap. 2), og, viser det sig – på ny et kvantefænomen – elektroner kan kun spinne på præcis 2 måder: enten den ene vej rundt eller også den anden vej rundt: De kan eksistere i netop 2 *spin*-tilstande. Elektron nr. 2 kan derfor gå ned og få samme energi som elektron nr. 1, blot må den have et andet spin. Herved bliver det, vi kalder første elektron-skal fyldt op: der er nu ikke længere plads til flere elektroner så tæt på kernen. Elektron nummer 3 må pænt gå ud i skal nummer 2, hvor den er knap så hårdt bundet. Herude er der – viser det sig – egentlig plads til 8 elektroner i forskellige kvantetilstande. Men vores iltatom er dog bygget færdigt, når vi har drysset 6 mere på; så har vi brugt alle 8. Det færdige atom er kun lidt større end brintatomet. (Iltatomet vil gerne have sin 2. skal fyldt helt op, hvis det kan komme til det. Det kræver 2 elektroner mere. Derfor er ilt divalent, som vi ser det i vandmolekylet: H_2O .)

Den kendsgerning, at elektroner og andre fermioner (partikler med halvtalligt spin) kun kan være én ad gangen i hver kvantetilstand, kaldes *Pauli-princippet* (efter den østrigske fysiker W. Pauli). Det får fermioner til at virke "hårde", mere "stof-agtige" end bosoner (dem med heltalligt spin). Bosoner er anderledes selskabelige og lægger sig med fornøjelse i samme kvantetilstand. En laser er et eksempel. Fotoner er jo bosoner, og laserlyset er så farve- og faserent, fordi det indeholder et stort antal fotoner i nøjagtig samme kvantetilstand. Lys og andre bosoners selskabelighed gør dem mindre stof-agtige end fermioner. Atomer er så solide, fordi elektroner er fermioner, der adlyder Pauli-princippet. Disse mærkelige forhold er både eksperimentelt og teoretisk særdeles

velforståede. De er dybt forankret i kvanteteorien og relativitetsteorien.

Atomernes forskellige kerner

Vi bevæger os fra atomet og dets eV-fysik til kernen og dens MeV-fysik. At energien er så meget større, hænger sammen med, at kernen er ca. 100.000 gange mindre. Derfor bliver protonerne og neutronerne inden i kernen nødt til at have bølgelængder 100.000 gange mindre end elektroner i atomer, og altså impulser 100.000 gange større. Tager vi hensyn til, at protonerne og neutronerne har masser på omkring 940 MeV, kan vi beregne, at deres energi må være i MeV-området. Protonerne frastøder hinanden ganske stærkt fordi de har samme elektriske ladning, men de holdes sammen af *de stærke kernekrafter*. Kernekrafterne er stærke, når protoner eller neutroner "rører hinanden", dvs. har en afstand på ca. 10^{-15} m. Denne afstand kalder vi 1 fermi. Fjerner vi dem mere fra hinanden, falder kernekrafterne hurtigt til næsten ingenting. Det er noget af det mest karakteristiske ved de stærke vekselvirkninger: de har netop denne rækkevidde på ca. 1 fermi.

Den japanske fysiker Yukawa indså i 1935, at den bestemte rækkevidde havde en yderst interessant fortolkning. Et blik på kvantestige-figuren viser, at 10^{-15} m modsvares af en energi på lidt over 10^8 eV: faktisk ca. 200 MeV. Og Yukawa argumenterede for, at den mest naturlige fortolkning var, at kernekrafterne skulle beskrives ved et felt, hvis bølger svarer til en elementarpartikel med en masse på de samme sådan cirka 200 MeV. Men, som han konkluderede: da en sådan partikel ikke var kendt, var argumentet jo nok forkert. Men tværtimod! I 1947 opdagedes, som vi har omtalt, pionen (eller pi-mesonen) med en masse på ca. 140 MeV. Pionen er den mest almindelige elementarpartikel, der produceres i accelerator-eksperimenter, og den spiller netop den rolle for kernekrafterne, som Yukawa talte om. Vi vil møde Yukawas vigtige argument i andre sammenhænge. De elektriske felter i atomet har ikke sådan en rækkevidde. Hvorfor? Fordi feltets partikler, fotonerne, ikke har nogen masse: den er 0.⁸

Atomter med mange elektroner er ikke ret meget større end atomter med få: de inderste elektroner bliver bare suget tættere ind til kernen af det kraftigere elektriske felt. Men tunge kerner er større end lette. Hvis vi tænker på en proton som en vin-

⁸Bedre: i en vis forstand er rækkevidden ubegrænset.

drue, er et iltatom med 8 protoner og 8 neutroner som en lille drueklase, og en urankerne med 92 protoner og 146 neutroner som en hel posefuld. Men druerne "fræser rundt" med en fart på 30.000 km/sek! Alligevel har atomkernerne en grundtilstand ligesom atomerne. En fredelig kerne befinder sig i dem og er ganske upåvirket af forstyrrelser under ca. 1 MeV. Under sådanne forhold er kernen som en "elementarpartikel". Men ved kraftigere stød og andre påvirkninger viser den sig som det sammensatte objekt, den er. Den kan "anslås" til højere energitilstande. Der er kerneskalere analoge til atomskalere, fordi protoner og neutroner er fermioner. Men kernestoffet kan også optræde væskeagtigt. Ved at studere, hvordan atomer og kerner kan anslås, lærer man om deres opbygning.

Protoner og neutroner

Man var tidligt klar over, at kernen vejede (over) det dobbelte af sine protoner. Men det var først i 1932, at englænderen Chadwick påviste neutroner som selvstændige elementarpartikler. Neutroner er næsten som protoner, hvad angår deres stærke vekselvirkninger. Men neutronen har ingen elektrisk ladning. En fri neutron bremses derfor ikke af elektronerne i stoffets atomer. Den standser først, når den braser ind i en af de bittesmå kerner. Så anslås den ramte kerne. Den "ringer": Når den falder til ro igen, afleverer den sin overskudsenergi som radioaktiv stråling. Frie neutroner lever i gennemsnit et kvarter. Så henfalder de til en proton, en elektron og en neutrino. Det kommer vi tilbage til, når vi skal lære om de svage vekselvirkninger. Men neutroner inden i stabile atomkerner kan ikke henfalde. Det er der ikke plads til i energiregnskabet.

Protoner og neutroner er fermioner ligesom elektroner, ja de har samme spin på $1/2$. De vejer blot små 2000 gange mere end elektroner. Som nævnt udviklede Dirac omkring 1930 en smuk teori for spin- $1/2$ partikler, og den passede perfekt på elektroner. Det var derfor noget af en skuffelse, at den *ikke* passede på protoner og neutroner. Fortolkningen er, at de ikke er nær så elementære som elektroner. I stedet er protoner og neutroner lavet af de underlige tingester, vi kalder *kvarker*. Kvarkerne har den pragtfulde egenskab, at de er lige så elementære som elektroner: De adlyder Dirac's ligning. Lad os se på et par argumenter for at opfatte protoner og neutroner som "ikke særligt elementære elementarpartikler".

En klassisk snurretop, som både har et vist spin, og som også er

forsynet med elektrisk ladning (passende jævnt fordelt), opfører sig som en lille strømspole og dermed som en lille magnet, hvis "styrke" – det *magnetiske moment* – kan beregnes efter Maxwells teori. Det kan også måles, og pengene passer. Elementarpartikler har også et magnetisk moment, og det er fornuftigt at angive størrelsen af det i forhold til, hvad det ville have været, hvis elementarpartiklen bare var en klassisk snurretop. Disse magnetiske momenter kan faktisk måles med stor nøjagtighed. Ja kernernes magnetiske momenter er grundlaget for en moderne medicinsk diagnosteknik: NMR-scanning. Det var en vældig triumf for Dirac's elektronteori, at den gav en værdi for elektronens magnetiske moment på præcis 2 (gange "snurretop-værdien")⁹. Denne værdi (og ikke 1!) er nemlig nødvendig for at forstå visse detaljer i lysspektrene fra atomerne. Men protonen og neutronen har ikke Dirac-værdien for deres magnetiske momenter. Protonens er 2,79. Og neutronens er ikke nul, hvad man ellers skulle tro, da dens elektriske ladning er nul! Neutronens magnetiske moment er -1,91 gange protonens værdi. Det tyder virkelig på, at neutronen er bygget af mindre dele, der *har* elektrisk ladning.

Et andet tegn på protoners og neutroners sammensatte natur er, at de kan anslås. Anslagsenergien måles ikke i eV som for atomerne eller i MeV som for kernerne. Ved sådanne anslag er protoner og neutroner "elementarpartikler". Men "slår man på dem" med 200 MeV eller mere, går de over i nye energi-tilstande. Vi taler om partikel-*resonanser*. I løbet af 1950'erne og 1960'erne fandt man dusin på dusin af sådanne resonanser, og man blev mere og mere forvirret. Hvordan skulle man nogensinde få styr på så mange "elementarpartikler".

Et af de smukkeste og mest overbevisende tegn på, at protoner og neutroner er bygget af kvarker, udløste Nobelprisen i fysik for 1990 til amerikanerne Friedman og Kendall og canadieren Taylor. Disse folk stod i spidsen for en ny type eksperimenter, der blev udført fra ca. 1968 ved Stanford-acceleratoren SLAC i USA, og som siden er gentaget ved højere energier og med langt bedre præcision. Ideen er sådan set helt den samme som i Rutherfords opdagelse af atomets kerne. I stedet for alfapartikler ved MeV-energi bruges elektroner med energier på mange GeV. De sætter det elektromagnetiske felt i en forstyrrelse svarende til bølgelængder langt mindre end 1 fermi. Herved kan vi så at sige lyse ind i protoner

⁹Særlige kvantefluktuationer giver ganske små afvigelser fra tallet 2. De har kunnet beregnes og måles med mange decimaler, og bekræfter kvantefeltteorien, QED (kap. 5).

og neutroner og "se", hvad de er lavet af. Der kommer ikke noget fotografi ud af det, men et utal af magnetbånd med data. De må analyseres, og analysen må fortolkes. Alt passer perfekt med et billede, hvorefter protoner og neutroner indeholder nye spin-1/2 partikler af Dirac-typen: *kvarker*. Derfor er der god grund til at anse kvarkerne for langt mere fundamentale end protonerne og neutronerne selv.

Kvarker

Kvark-hypotesen blev fremsat i 1964 af de to amerikanere Gell-Mann og Zweig uafhængigt af hinanden, men det blev Gell-Manns mærkelige ord, der slog an. Der skulle gå mange år før især teoretikerne (mærkeligt nok) kunne tage ideen alvorligt. Ordet kommer fra en gådefuld linie i James Joyce's *Finnegan's Wake*: "Three quarks for Muster Mark", (måske noget i retning af: 3 kvarker gør målet fuldt). Gell-Mann brugte netop 3 kvarker i sin oprindelige formulering af kvarkhypotesen. I de næste 2 kapitler skal vi se, hvordan fysikerne er blevet aldeles overbevist om kvarkernes eksistens. Kvarker er spin-1/2 fermioner. De fås i 3 *generationer* eller *familier*. Alt normalt stof kan forstås alene på grundlag af *første generation*, så den nøjes vi med lige nu. I hver generation er der 2 kvarker og 2 *leptoner*. De 2 leptoner i første generation er elektronen og dens neutrino (samt deres anti-partikler!). De 2 kvarker kaldes *up* og *down*: u og d. De har mærkelige elektriske ladninger: $+2/3$ for u og $-1/3$ for d (underforstået: gange protonens ladning). De tilhørende anti-kvarker, $\bar{u}$ og $\bar{d}$, har ladningerne $-2/3$ og $+1/3$. Kvarker og leptoner er de mest fundamentale stofpartikler, vi kender.

Protoner og neutroner er bygget af 3 kvarker. Protonen er bygget som (uud), altså af 2 u-kvarker og 1 d-kvark. Det passer med, at den elektriske ladning så er $+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$. Neutronen er bygget som (ddu) med ladningen $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$. Det passer også. Endnu bedre: med denne opbygning kan vi beregne protoners og neutroners magnetiske momenter baseret på, at kvarkerne har den simple Dirac-værdi. Og nu passer det fint! Pi-mesonerne findes der 3 slags af: π^+ , π^- og π^0 (udt.: pi-plus, pi-minus og pi-nul) med elektriske ladninger $+1$, -1 og 0 . De er bygget af en kvark og en anti-kvark:

$$\begin{aligned}\pi^+ &= u\bar{d} \text{ og } \pi^- = d\bar{u}, \\ \pi^0 &= u\bar{u} \text{ eller } d\bar{d}.\end{aligned}$$

Man kan nemt overbevise sig om, at ladningerne passer. Hvad meningen egentlig er med π^0 'ens opbygning, vil føre os lidt for vidt ud i kvantefysiske detaljer.

Læseren kunne nu spørge: "Hvis det virkelig passer med de der kvarker, hvad skal vi så med protoner og neutroner? Burde vi nu ikke sige, at atomkernerne bare er en "sæk" kvarker?" Svaret er et rungende nej! Man kunne lige så godt spørge: Hvad skal vi med atomer? Er vi ikke bare selv en "sæk" elektroner og atomkerner? Men nej! Atomerne er solide, udelelige "elementarpartikler" i forhold til det, vi normalt udsætter dem og os selv for. Inde i Solens centrum er det anderledes. Her er der for varmt til, at atomer kan eksistere: ved de idelige sammenstød tilføres elektronerne anslagsenergier langt over atomfysik-niveau: dér er frie kerner og elektroner, en plasma. Men der er "rigelig koldt" til, at protoner og neutroner kan eksistere. Først ved partikelfysikkens påvirkninger på mange GeV afslører kvarkerne for alvor deres eksistens. Fremtidige eksperimenter vil måske endda kunne påvise eksistensen af en "kvark-plasma".

Men kvarkerne spiller kun deres rolle på "det øverste trin" af kvantestigen!

4. De stærke, de svage og de elektromagnetiske

To underlige tretaller

Lad os snakke lidt om "stof-partikler", altså om spin-1/2 fermioner. De, der er lavet af kvarker, er meget mindre elementære end kvarkerne selv, så vi begynder med de elementære: kvarkerne og leptonerne. En af de vigtigste opdagelser, vi har gjort, er, at stof-partiklerne optræder som beslægtede familiemedlemmer, der naturligt opstilles i 3 generationer eller familier. Der var det første af de to 3-taller! Hvorfor der lige skulle være 3, aner vi ikke, men der er meget gode grunde til at tro, at der netop er: 3. Hver generation indeholder to kvark-"brødre" og to lepton-"søstre". Kvarkerne kan påvirkes af alle de tre fundamentale vekselvirkninger. Leptonerne kan *ikke* påvirkes af de stærke, kun af de svage og de elektromagnetiske, og neutrinoerne – skrevet med det græske bogstav ν , ny – endda kun af de svage. Vi opstiller de tre generationer i 3 lodrette søjler sådan her:

kvarker	u	c	t
	d	s	b
leptoner	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e^-	μ^-	τ^-

(tabel 4.1 giver flere detaljer). Vi har allerede mødt 1. generation: Alt det stof, vi ser omkring os i universet, er bygget af u- og d-kvarker, samt af elektroner og elektron-neutrinoer (1. generations leptoner). Hertil kommer alle disses anti-partikler, som vi altid vil underforstå. Men naturen gentager sig selv på en underlig overflødig måde: Der er to generationer mere.

STOF-PARTIKLER/FELTER I STANDARDMODELLEN

elek- trisk ladning	1. Generation		2. Generation		3. Generation	
	navn (masse)	opdaget år	navn (masse)	opdaget år	navn (masse)	opdaget år
+2/3	u (5)	1910	c (1350)	1974	t (>80 000) ?	?
-1/3	d (9)	1932	s (160)	1953	b (4800)	1977
0	ν_e (0)	1933	ν_μ (0)	1963	ν_τ (0)	1980
-1	$e^-(0,511)$	1897	$\mu^-(106)$	1936	$\tau^-(1784)$	1975

Tabel 4.1 Standardmodellens spin-1/2 fermioner ("stof-partikler"), kvarker og leptoner. Kvarkernes fulde navne er (på engelsk): u: up, d: down, c: charm, s: strange, t: top (eller: truce), b: bottom (eller: beauty). Masserne er anført i parentes i MeV. Kvarkernes masser er indirekte bestemt og ret usikre. Årstal for "opdagelse" refererer til en vigtig begivenhed, som set med bagklogskab kan tolkes sådan. My- (μ) og tau- (τ) leptonerne er partikler, der opfører sig som tunge elektroner; de har samme elektriske ladning, de adlyder Dirac-ligningen, og de vekselvirker kun svagt og elektromagnetisk. Stærke vekselvirkninger er forbeholdt kvarkerne. De har samme ladninger som u- og d-kvarken: +2/3 for den øverste og -1/3 for den nederste. Bemærk, at forskellen på deres ladning er 1, ganske som for leptonerne: neutrinoer har ladningen 0, mens nederste lepton har ladning -1. Topkvarken er endnu ikke fundet, men det vil være et kæmpe-chok, hvis den heller ikke findes: Så er der noget helt galt med Standardmodellen. Den forventes produceret en gang i 1990'erne. Masserne for leptonerne og kvarkerne varierer "vildt". Vi aner ikke, hvorfor de har disse værdier. Neutrinoerne er masseløse (inden for målesikkerheden). De flyver altså altid med lyshastighed, ligesom lyset selv med sine masseløse fotoner. Neutrinoerne har ingen elektrisk ladning: de kan kun påvirkes af de svage vekselvirkninger.

Kvark-hypotesen blev fremsat 1964, men først efter 1975-76 var den alment anerkendt trods mange tidligere succeser. Hvorfor? Især fordi man aldrig dengang eller siden har "set" en enkelt fri, isoleret kvark, hvis særlige egenskaber kunne verificeres. Kvarkerne er spærret inde i elementarpartiklerne. Et godt billede består i at tænke på kvarkerne som stående bølger inden i bobler på størrelse med ca. 1 fermi ($= 10^{-15}$ m). En proton er sådan en boble med tre stående bølger: én for hver af de to u-kvarker og én for d-kvarken. (På engelsk taler man om "bag"-modellen: "sæk"-modellen). Elektroner kan sagtens frigøres fra atomerne, og protoner og neutroner kan sagtens frigøres fra deres kerner. Men kvarkerne må for evigt blive inden i de elementarpartikler, de selv er "mursten" for. Er det så ikke "snyd" overhovedet at tale om dem? Vi skal efterhånden se, hvorfor svaret er: nej!

Partikler bygget af kvarker er de eneste, der påvirkes af de stærke vekselvirkninger. De kaldes *hadroner*. Dem er der selvfølgelig to slags af – som for alle andre partikler – nemlig: bosoner (med heltalligt spin) og fermioner (med halvtalligt spin). Men når vi taler om hadroner, bruger vi som regel andre ord: bosonerne kaldes *mesoner*, og fermionerne kaldes *baryoner*. (Ordene stammer fra den tid, da man forstod meget lidt. "Leptoner", "baryoner" og "mesoner" betyder: de lette, de tunge og "dem midt imellem"). Alle mesoner er ustabile og henfalder før eller siden til elektroner, neutrinoer og fotoner. Alle baryoner, *på nær protonen*, er også ustabile, og henfalder før eller siden til en proton samt evt. elektroner, neutrinoer og fotoner.

Her er kvarkteoriens to nøgleregler:

1. *Alle mesoner er bygget af en kvark og en anti-kvark.*
2. *Alle baryoner er bygget af 3 kvarker.*

Dér var 3-tal nummer to! Dette 3-tal indgår på en helt afgørende måde i Standardmodellen, men vi aner ikke, hvad der dybest set ligger bag.

Hvert andet år udsender en international komité en fortegnelse over data for elementarpartikler. Den fylder flere hundrede sider og omhandler flere hundrede partikler – en veritabel og højst forvirrende "zoologisk have". Men både opstillingen i 3 generationer og reglerne for at bygge mesoner og baryoner gør det hele meget mere overskueligt. I tabel 4.2 og 4.3 findes en fortegnelse over de letteste mesoner (kvark-antikvark partikler) og deres kvark-opbygning; i tabel 4.4 og 4.5 findes en opstilling over de letteste baryoner (3-kvark partikler) og deres kvark-opbygning.

SPIN-1 MESONER

	$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{c}$	$\bar{b}$
u	$\rho^0 (768)$ $\omega (782)$	$\rho^+ (768)$	$K^{*+} (892)$	$\bar{D}^{*0} (2007)$	
d	$\rho^- (768)$	$\rho^0 (768)$ $\omega (782)$	$K^{*0} (896)$	$D^{*-} (2010)$	
s	$K^{*-} (892)$	$\bar{K}^{*0} (896)$	$\phi (1019)$	$D_s^{*-} (2110)$	
c	$D^{*0} (2007)$	$D^{*+} (2010)$	$D_s^{*+} (2110)$	$J/\psi (3097)$	
b					$\Upsilon (9460)$

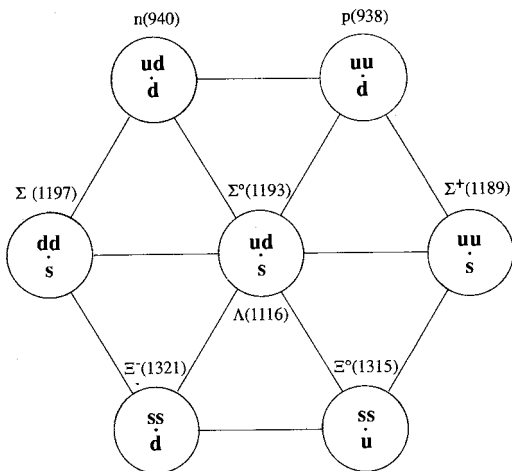
SPIN-0 MESONER

	$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{c}$	$\bar{b}$
u	$\pi^0 (135)$ $\eta (549)$	$\pi^+ (140)$	$K^+ (494)$	$\bar{D}^0 (1865)$	$B^+ (5278)$
d	$\pi^- (140)$	$\pi^0 (135)$ $\eta (549)$	$K^0 (498)$	$D^- (1869)$	$B^0 (5279)$
s	$K^- (494)$	$\bar{K}^0 (498)$	$\eta' (958)$	$D_s^- (1969)$	
c	$D^0 (1865)$	$D^+ (1869)$	$D_s^+ (1969)$	$\eta_c (2980)$	
b	$B^- (5278)$	$\bar{B}^0 (5279)$			

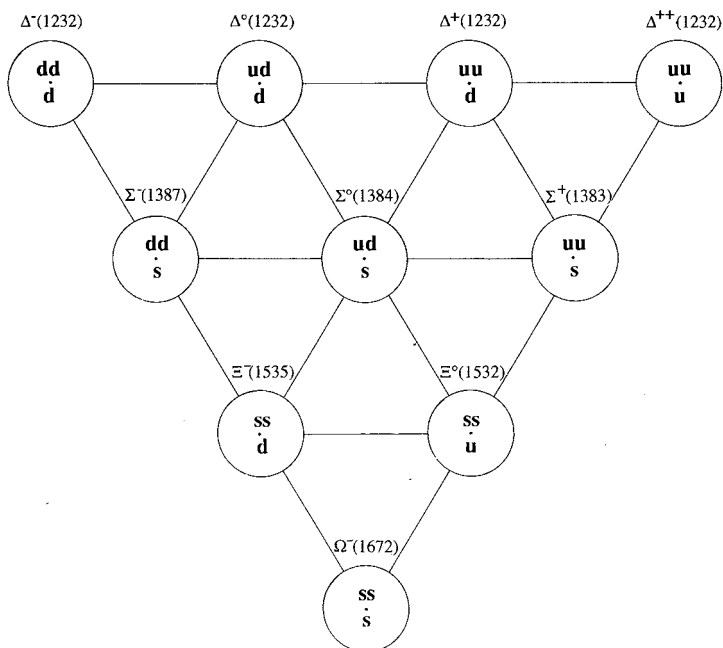
Tabel 4.2 Spin-0 mesoner bygget af en kvark og en anti-kvark. Navnene er der ikke meget interessant at sige om. Listen over græske bogstaver bag i bogen kan måske være nyttig. Partiklernes masser i MeV er angivet i parentes. Da kvarker og antikvarker har et spin på $1/2$, kan de to spin enten snurre samme vej med resultatet spin 1, eller de kan snurre hver sin vej med resultatet spin 0. Tabelindgangen viser kvarksammensætningen. Eksempel: Partiklen $D^+(1869)$ er lavet af en c-kvark og en anti-d-kvark; den har massen 1869 MeV, og dens spin er 0. Læg mærke til, at partikler, der blot adskiller sig ved, at en u- og d-kvark er byttet om, har forbløffende ens masser. De stærke vekselvirkninger kan næsten ikke kende forskel på u- og d-kvarker. (Fysikerne taler om isospin-invarians). Læseren kan more sig med at finde ud af, hvor meget de forskellige kvarker bidrager til mesonmasserne og til baryonmasserne (tabellerne 4.4 og 4.5). Herved fås en vis forståelse for masseangivelserne i tabel 4.1. Man må dog huske, at da kvarkerne er spærret inde i et område på ca. 1 fermi, har de bølgelængder af ca. denne størrelse og derfor impulser omkring 200 MeV/c. Selv masseløse kvarker vil derfor bidrage med ca. 200 MeV til hadronmassen. Det er omtrent sådan, u- og d-kvarkernes massebidrag må ses. Indgangene for u-anti-u og d-anti-d refererer til subtiliteter, vi ikke vil komme for meget ind på her: de to angivne partikler er en slags blanding af $u\bar{u}$ og $d\bar{d}$. Kun få partikler med b-kvarker kendes; de er vanskelige at producere og detektere eksperimentelt. Spin-0 mesonerne er mesonernes "grundtilstande" (jf. kap. 3 om atomer og kerner). De fleste er stabile over for stærke henfald; de henfalder "svagt" eller "elektromagnetisk" og kan ofte ses som spor i detektorer.

Tabel 4.3 Spin-1 mesonerne henfalder via de stærke vekselvirkninger til spin-0 mesoner. De lever derfor så kort, at de ikke kan erkendes som spor i en detektor, jf. fig. 4.1. Se iøvrigt forklaring til tabel 4.2.

SPIN - 1/2 BARYONER



SPIN - 3/2 BARYONER

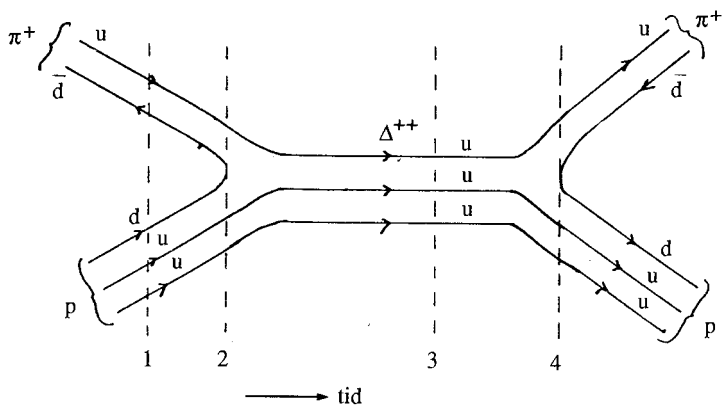
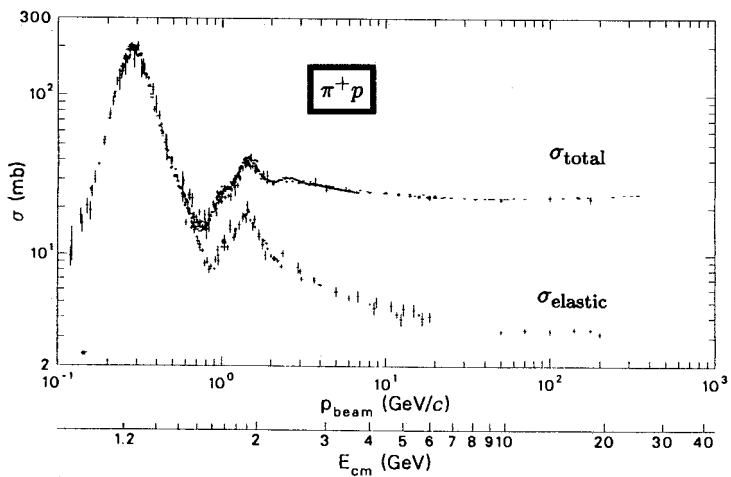


Tabel 4.4 og 4.5 Spin-1/2 baryoner (4.4) og spin-3/2 baryoner (4.5) dannet af 3 kvarker. Afhængigt af, om de tre spin snurrer samme vej, eller om to snurrer modsat, kan vi få baryoner med spin 3/2 eller spin 1/2. Partiklernes masser i MeV er angivet i parentes. I disse to tabeller har vi indskrænket os til at se på baryoner lavet af de 3 letteste kvarker: u, d og s. Det var kun dem, man kendte før 1974, så i lang tid var her endnu et mystisk 3-tal. Det er der ikke mere. Vi genfinder vores bekendte, protonen p og neutronen n, blandt spin-1/2 baryonerne. Disse diagrammer er lavet lidt anderledes end for mesonerne. I øverste række har baryonerne ingen s-kvark, i den næste én osv. Inden for hver række har vi flest u-kvarker længst til højre. Et skridt til venstre erstatter en u-kvark med en d-kvark. Der kendes kun 4 baryoner med en c-kvark og ingen med b-kvarker. Men alle muligheder findes utvivlsomt. Protonen p er stabil. De øvrige spin-1/2 baryoner er stabile over for stærke vekselvirkninger, men henfalder svagt eller elektromagnetisk. Bemærk, at i kvarkmodellen kan en baryon med spin 1/2 ikke bestå af 3 ens kvarker: uuu, ddd eller sss; det kan kun spin-3/2 baryoner. De fleste spin-3/2 baryoner henfalder via de stærke vekselvirkninger og ses derfor kun som resonans-toppe (fig. 4.1). Den eneste undtagelse er Omega-minus (Ω^-), som henfalder svagt.

Ud over partiklerne i disse tabeller findes hundredvis af "anslåede" tilstande, hvor kvarkerne må tænkes at "skvulpe" omkring. De svarer til atomers og kerner's anslåede tilstande. De har højere masser og ofte højere spin, men kan alle forstås ved hjælp af samme kvark-opbygning.

Bemærk, at efter kvarkmodellen findes der ingen mesoner med dobbelt ladning. Naturen har det på samme måde. Efter kvarkmodellen findes nok baryoner med dobbelt positiv ladning, men ingen med dobbelt negativ ladning. Naturen har det ligesådan. For anti-baryonerne er det omvendt. (De fleste antibaryoner er blevet observeret). Mange andre mere indviklede detaljer støtter kvarkmodellen på denne måde.

Et utal af partikler er studeret i fantastisk detalje. Vi må nøjes med ganske få eksempler.



Figur 4.1 π^+ -partikler henfalder i gennemsnit efter $2,6 \cdot 10^{-8}$ sekunder til en myon og en my-neutrino via de svage vekselvirkninger. Med lyshastighed ville de kunne løbe 7,8 m, men på grund af relativitetsteoriens gamma-faktor (kap. 1) løber de som regel meget længere. Ved en energi på 1400 MeV og en pi-masse på 140 MeV er gamma-faktoren 10, og så kan de løbe 78 m! De kan derfor udmærket bruges i et praktisk beam. Når positive pi-mesoner skydes ind på protoner, kan flere reaktioner finde sted. Den lodrette akse angiver et mål for hyppigheden for en sådan reaktion. Vandret er vist π^+ -mesonens impuls (p_{beam} , målt i GeV/c), og allernederst: massen (E_{cm}) af den partikel-resonans, som dannes i sammenstødet. (Datapunkterne σ_{elastic} refererer til de "elastiske" tilfælde, hvor slutresultatet igen er en π^+ og en proton. I andre tilfælde kan der for eksempel dannes to π^+ -mesoner og en neutron. Summen af alt er noteret som σ_{total} .) Vigtigst her er den store top ved massen 1232 MeV. Det er Δ^{++} -resonansen fra tabel 4.5. Læg mærke til, at resonanstoppen når op til mærket 200 (vi vil ikke nærmere forklare enheden mb). Ved den halve højde, 100, er bredden ca. 115 MeV. Hertil svarer en middellevetid på $0,6 \cdot 10^{-23}$ sekunder; en så kort tid kan slet ikke måles. Sådanne resonanser ses kun som toppe af den her viste slags. Figuren viser desuden flere resonanstoppe ved endnu højere energier. (Particle Data Group, Phys. Letters vol. 239, B; 12. april 1990).

Figur 4.2 Kvarkdiagram for processen $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$. Man skal tænke sig tiden løbende fra venstre mod højre og med fingeren følge kvarkernes udviklingshistorie. De stærke vekselvirkninger kan ikke lave om på kvarker: Kvarklinierne forløber ubrudt gennem kvarkdiagrammet. Men en kvark og en anti-kvark kan "par-dannes". Det svarer til kvarklinier, der ser ud, som om de løber frem og tilbage i tiden. Men fortolkningen er altså mindre mystisk: et kvark/antikvark-par er blevet dannet (til højre i figuren) eller også udslettet (til venstre i figuren). Linier med pil i tidens retning svarer til kvarker, medens dem med pil modsat tidens retning svarer til antikvarker. Der ligger en bestemt matematisk formalisme bag denne tegnemåde. De lodrette stiplede linier angiver "snit" til bestemte tider. Ved 1 har vi en π^+ og en proton. Ved 2 annihilerer anti-d-kvarken i π^+ med d-kvarken i protonen. Ved 3 har vi en Δ^{++} -resonans. Ved 4 pardannes en d-kvark og en anti-d-kvark.

I fig. 4.1 ses et godt eksempel på resultatet af en eksperimentel undersøgelse, hvor man skyder π^+ -mesoner ind på protoner og så måler, hvad der sker. Den store, flotte top til venstre på figuren viser den måde, vi "ser" Δ^{++} resonansen (udt. delta-plus-plus, se listen over græske bogstaver bag i bogen): Ved en energi på 1232 MeV "ringer" protonen og bliver til en Δ -resonans, som næsten omgående "stråler lyden (overskudsenergien) af sig" ved at henfalde til en proton og en π^+ igen (for eksempel). Det er som sådanne resonanstoppe, de allerfleste partikler "ses".

Forskellen på pi-mesoners levetid ($2,6 \cdot 10^{-8}$ sek) og Δ -resonansens levetid ($0,6 \cdot 10^{-23}$ sek.) er slående. Den er et udtryk for, at Δ -resonansen henfalder via de stærke vekselvirkninger ("henfalder stærkt"), medens pi-mesonen henfalder svagt. Pi-mesonens levetid måles ved at se, hvor langt den kan løbe, før den henfalder. Δ -resonansens levetid måles ved at se på bredden af resonanstoppen, jf. kap. 2.

Fig. 4.2 viser en nyttig anskueliggørelse af Δ -resonansens produktion og senere henfald: et kvark-diagram.

Neutrinoer

Hvad bruger naturen de svage vekselvirkninger til? Noget ret så vigtigt: Solens energiproduktion kunne ikke foregå uden! I normale stjerner frigøres energi ved at brint (protoner) omdannes til helium, hvis kerner jo er alfa-partikler bestående af to protoner og to neutroner. Så vi må have lavet et par protoner om til neutroner på en eller anden måde. Men protonen er lettere end neutronen, så det kræver et trick. I Solens indre sker det ved, at den dannede neutron binder sig så hårdt til en naboproton, at der bliver plads i energiregnskabet: der dannes en deutron, en kerne af "tung brint". Protonens ladning udsendes som en positron ledsaget af en neutrino. Denne proces foregår via de svage vekselvirkninger. Det er nødvendigt: en u-kvark omdannes til en d-kvark; det kan de stærke vekselvirkninger ikke klare. Resultatet er, at Solen "skinner" næsten lige så meget med neutrinoer som med lys! Men neutrinoernes energi "går til spilde". Neutrinoerne vekselvirker så fantastisk svagt, at dem, der rammer Jorden, går direkte igennem uden at opdage, at den overhovedet er der. Ikke færre end ca. 10^{15} sol-neutrinoer pr. kvadratmeter pr. sekund rammer Jorden (og læseren). Neutrinoerne ville kunne passere en bly-mur mange gange tykkere end solsystemets udstrækning uden at standses. Men statistikkens love fungerer, og ganske, ganske få neutri-

noer giver anledning til en kernefysisk begivenhed, der undertiden kan opfanges i eksperimenter. Det siger sig selv, at neutrinoer fra andre stjerner slet ikke kan detekteres.

Og så dog! For ca. 170.000 år siden eksploderede en stjerne i den satellit-galakse til vores mælkevejssystem, som kaldes den Store Magellanske Sky. Den blev en supernova. Efter at have opbrugt sit forråd af brint var stjernen gået i gang med i stedse hastigere tempo at "forbrænde" sit kernestof, indtil der ikke var mere tilbage (som kunne udvikle energi). Det sidste, desperate skridt bestod i, at en samling stof med en masse større end Solens på en brøkdel af et sekund blev forvandlet til jern-atomkerner. Den herved udsendte energi er ufattelig og markerer stjernens eksplosion. Den 23. februar 1987 kl. 7:36, Verdenstid, nåede beskeden herom Jorden. Ikke som lys, men som neutrinoer! I Kamiokande-blyminen i Japan og i Thiokol-saltminen, Ohio (USA), stod kæmpemæssige partikelfysik-detektorer opstillet i ly for den kosmiske stråling, for at undersøge helt andre ting, vi ikke her vil komme ind på. Eksperimenterne var stort set negative: Detektorerne ligger ørkesløse hen i årevis og besøges kun med mellemrum af fysikere. Men hin 23. februar opfangedes de to steder på samme tid, i løbet af 2 sekunder, 13 neutrinobegivenheder (med et par efternølere de følgende sekunder). Først flere timer senere lyste stjernen op på himlen og blev opdaget af astronomerne og fik status som supernova SN 1987A. Dette er præcis, som teorier for supernova-eksplosioner ville forvente forløbet. Ved eksplosionen må der i den fatale brøkdel af et sekund være frigjort neutrinoer med en energi på omkring hundrede gange den energi, vores egen Sol har udsendt i hele sit 4,5 milliarder år lange liv! Ellers kunne de nævnte detektorer ikke reagere som observeret. Igen stemmer dette med beregningerne. Neutrinoerne kunne straks ved dannelsen temmelig uhindret trænge gennem de yderste lag af den eksploderende stjerne, mens lyset blev holdt tilbage, indtil disse lag var blæst så langt væk, at det indre af stjernen blev synlig. Hvert år observeres adskillige supernovaer i fjerne galakser, men det tyste neutrinoglimt fra SN 1987A er det første, vi har set til selve det katastrofale eksplosionsøjeblik dybt i supernovaens indre.

På trods af de ekstremt lave sandsynligheder for neutrinoreaktioner foregår der rutinemæssigt studier af dem ved alle de større laboratorier. Fidusen er at få enormt mange neutrinoer i sving, og så at bruge høje energier. En række centrale bekræftelser på Standardmodellen er bragt i hus ved hjælp af denne neutrinofysik.

Først og fremmest viser det sig, at neutrinoer, produceret sam-

men med elektroner, kun kan producere elektroner igen – aldrig my-partikler. Det gælder de neutrinoer, der kommer fra Solen eller fra en kernereaktor. Omvendt med hovedparten af dem, vi producerer ved accelerator-anlæg. De dannes især ved at bruge de neutrinoer, der frigøres sammen med myoner i pi-henfald. De vil senere kun kunne producere myoner igen – men aldrig elektroner. Det er derfor, vi må forsyne hver ladet lepton med sin egen neutrino-”søster” i tabel 4.1: e-neutrinoen for elektronen, my-neutrinoen for myonen og tau-neutrinoen for tau-leptonen.

Partikelgeneration nummer to

I 1936 blev de første partikler i 2. generation opdaget: my-partikler i kosmisk stråling. Man troede først, det måske var Yukawas partikel (kap. 3), men i 1947 blev misforståelsen opdaget, da man blev klar over, at my-partiklerne var *henfaldsprodukter* af Yukawas partikel, pionen. Men man undrede sig såre over denne partikel, der bare var en ”tung” elektron. ”Hvem i alverden har bestilt den?” var det almindeligt at spørge. I dag lyder spørgsmålet: Hvorfor i alverden er der flere generationer? Men vi kan kun komme med tågede gæt.

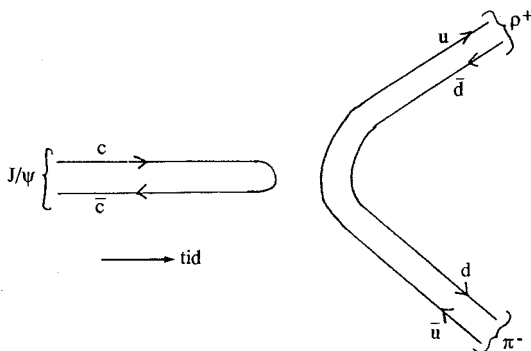
I 1946 så man – ligeledes i den kosmiske stråling – de første tegn på hadroner med s-kvarer. I 1953 indførte den unge Gell-Mann udtrykket *strangeness* (”særhed”): De blev tilsyneladende dannet lettere end de henfaldt. Lad os ikke her gå i detaljer med dette, men straks springe til 1963 og forudsigelsen af partiklen Omega-minus: Ω^- . På den tid kendtes alle spin $3/2$ baryonerne i tabel 4.5, *bortset fra* Ω^- . Gell-Mann og israeleren Ne’eman opstillede de da kendte partikler netop som i tabellerne 4.4 og 4.5 (de brugte en forløber for kvarkmodellen). Næsten alle pladser i skemaet svarede til kendte partikler, men Ω^- manglede altså – og blev derfor forudsagt af skemaet. Ikke nok med det. Partiklerne i tabel 4.5 henfalder alle stærkt: de ses kun som resonanstoppe. Men forudsigelsen af Ω^- var så præcis, at man kunne fastslå, at den måtte henfalde svagt. Året efter blev partiklen fundet netop som forudsagt. Det blev en af partikelfysikkens milepæle.

Lad os til sidst omtale c-kvarken, charm-kvarken, den sidste brik i 2. generation. Den 11. november 1974 kimede telefonerne i Brookhaven- og Stanford-centrene i USA. Fysikere fra hele verden ville høre om den forbløffende ny partikel, der var blevet opdaget af to uafhængige grupper de to steder. Ved et tilfælde (der lignede en tanke) blev de to opdagelser meddelt samtidigt. Hvad var det,

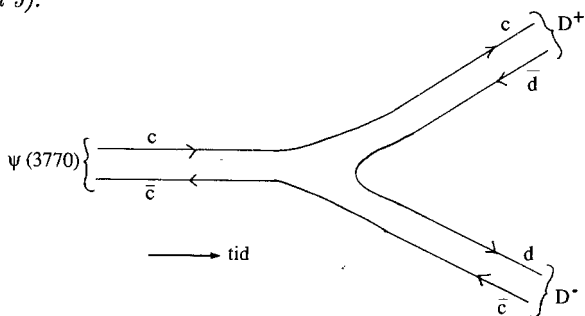
der var så fantastisk? En ny partikel var forlængst ophørt med at være en sensation. Men den, man nu havde fundet, blev regnet for så fin, at den senere fik lov til at få et dobbeltnavn – et navn fra hver af de to eksperimentelle grupper: J/ψ partiklen (udt.: J-psi).

Den var usædvanlig af følgende grunde: Den var for det første tung, ca. 3,1 GeV (tabel 4.3). Det var den hidtil tungeste elementarpartikel. En så tung partikel skulle ventes at have en stor bredde. Det havde alle andre tunge partikler. En bredde på et par hundrede MeV eller mere ville have været passende. Men J/ψ -partiklen var noget af det smalleste, man nogensinde havde set: Dens bredde var kun ca. 70 keV = 0,070 MeV, altså mindre end en tusindedel af det forventede! Noget ganske usædvanligt måtte være på færde. Opdagelsen af J/ψ -partiklen skulle da også blive en af de allermest betydningsfulde begivenheder i partikelfysikkens historie. Det var så at sige her, den sidste skepsis over for kvarke forduftede. Nogle ret få fysikere havde nemlig lidt tidligere påpeget nødvendigheden af at have kvarke og leptoner til at optræde i pæne, hele, fyldte generationer med to leptoner og to kvarke i hver. Ellers kom kvarkteorien i de største vanskeligheder. Mange havde reageret med et skuldertræk: Man troede alligevel ikke på de der kvarke. Men da nu faktisk den manglende kvark i 2. generation, c-kvarken, dels blev fundet, dels viste sig at have netop de ejendommelige egenskaber, der var forudset, ja så var det på tide for kvarkmodstanderne (inklusive forfatteren!) at besinde sig. Fortolkningen af J/ψ -partiklens mærkelige opførsel er vist i figurerne 4.3 og 4.4.

I årene efter 1974 kortlagdes i stor detalje J/ψ -resonansens mange anslåede tilstande. De viser tilsammen meget tydeligt, at der er tale om et system opbygget af en fermion og en antifermion: charm-kvarken og dens antikvark.



Figur 4.3 Kvarkdiagram for processen $J/\psi \rightarrow \rho + \pi^-$. J/ψ er lavet af en c -kvark og en anti- c -kvark (tabel 4.3), der hver for sig vejer halvdelen GeV eller deromkring, så at J/ψ kan få sin masse på 3,1 GeV. Kvarkdiagrammet adlyder reglen for stærke henfald: ingen kvarklinie skifter identitet. Men der er noget sært ved figuren sammenlignet med alle de andre kvarkdiagrammer, vi har set (fig. 4.2 og 4.4): den kan adskilles i en højre og en venstre halvdel, uden at kvarklinier skæres over. Processer med sådanne kvarkdiagrammer er kraftigt undertrykt mht. tunge partikler. Denne regel vides nu at fungere særdeles effektivt, og vi har en vis forståelse af den på baggrund af vores QCD-teori (se kapitel 5).



Figur 4.4 Kvarkdiagram for processen $\psi(3770) \rightarrow D^+ + D^-$. Her er $\psi(3770)$ en anslået resonans-tilstand af J/ψ -partiklen. Dens masse er større end massen af de to D -mesoner tilsammen: 3738 MeV (tabel 4.2). De overskydende 32 MeV bruges til at give D -mesonerne en lille smule bevægelsesenergi. De henfalder svagt med en levetid på ca. 10^{-12} sek., nok til, at det kan måles. $\psi(3770)$ har en resonansbredde på 27 MeV. Det er ret lidt, men mere "normalt" end J/ψ -partiklens bredde på 0,07 MeV.

Sammenfatning

Opdagelsen af 3. generation fulgte kort tid efter opdagelsen af charm-kvarken, men nu var sensationen knap så stor. Det er værd at bemærke, at den supertunge Ypsilon-partikel Υ (9460) er endnu lidt smallere end J/ψ ! Som nævnt er top-kvarken endnu ikke fundet. Vi ved kun, at dens masse må være mere end ca. 80 GeV, og det er allerede mærkeligt.

Lad os sammenfatte lidt. Vi har set, at partikler, der kun kan henfalde svagt, dvs. for hvilke et stærkt henfald er forbudt på grund af manglende energi, godt nok lever meget kort (10^{-8} eller 10^{-10} sek. eller så), men dog længe nok til at tegne spor i vores detektorer. Partikler, der henfalder stærkt, ses som resonanser med bredder i 100 MeV-området (med de markante undtagelser J/ψ og Υ). Men der er også en tredje slags henfald, vi må nævne: de elektromagnetiske. De er væsentlig stærkere end de svage, men meget svagere end de stærke. Et godt eksempel har vi med den elektrisk neutrale pi-mesons henfald: Den henfalder til to fotoner, fingeraftrykket for, at elektromagnetiske kræfter har været på spil. Processen foregår med en levetid på ca. $8 \cdot 10^{-17}$ sek. Det er meget mindre end levetiden for de ladede pioner, $2,6 \cdot 10^{-8}$ sek., men det er dog meget mere end levetiden på 10^{-23} sek. for et normalt stærkt henfald.

5. Standardmodellen

Vi har stiftet bekendtskab med den simpleste del af Standardmodellen: dens indhold af "stof-partiklerne" kvarker og leptoner i 3 generationer. Vi har også hørt en del om de tre fundamentale naturkræfter, de stærke, de svage og de elektromagnetiske. Men vi mangler at forklare om den mere detaljerede forståelse af disse vekselvirkninger. Den er Standardmodellens største succes. Vi begynder med de elektromagnetiske.

QED

Kvanteelektrodynamik, forkortet QED efter det engelske Quantum Electro Dynamics, er en teori, som er en syntese af flere elementer, vi allerede har hørt om: Maxwells teori, den specielle relativitetsteori, kvanteteorien, og Diracs teori for fermioner. Kvarker og leptoner er jo Dirac-fermioner. Den endelige formulering af QED blev nået efter adskillige kvaler omkring 1950. Så stod man til gengæld med noget, som lignede en mønsterteori. Den var smuk. Den tillod systematiske beregninger. Og den stemte med eksperimenterne, i visse tilfælde med en rent ud fantastisk nøjagtighed. At komme frem til noget lige så flot for de andre vekselvirkninger virkede som en fjern, uopnåelig ønskedrøm.

QED formuleres med en ganske kompliceret matematik. Men heldigvis repræsenteres matematikken af billeder, der giver en ganske god idé om, hvad der foregår. De er udviklet af amerikaneren R.P. Feynman i 1949 og kaldes *Feynman-diagrammer*. Kvarkdiagrammerne fra sidste kapitel er faktisk en primitiv efterligning.

Lad os se på et simpelt, men vigtigt eksempel: én bestemt af de mange processer, der kan forekomme i LEP-acceleratoren ved CERN (kap. 1):

$$\text{elektron} + \text{positron} \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

(det græske bogstav μ , my, står for myonen). Den benyttes som den standard, alle andre processer i praksis sammenlignes med.

Fig. 5.1 viser et Feynman-diagram for processen. Det modsvarer i QED-teorien af et ganske bestemt matematisk regneudtryk. Det giver allerede en ret god forudsigelse af, hvor ofte LEP vil vise os denne proces.

Diagrammet i fig. 5.1 giver kun en tilnærmet værdi. Der er i virkeligheden en uendelighed af korrektioner, der egentlig også skulle beregnes og lægges til. De svarer til mere og mere indviklede diagrammer, og mere og mere (umådeligt!) indviklede beregninger. Men heldigvis også til mere og mere ubetydelige korrektioner, så man får i praksis en fantastisk god beskrivelse ved blot at medtage nogle få Feynman-diagrammer. (Se fig. 5.2 og fig. 5.3).

I Standardmodellen optræder QED ikke isoleret, men i et elegant samspil med teorien for de svage vekselvirkninger, jf. nedenfor.

QCD

Sådan kaldes Standardmodellens teori for de stærke vekselvirkninger, tydeligvis som en parallel til QED, men vi venter lidt med at forklare navnet.

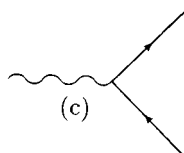
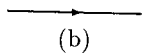
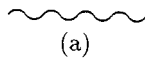
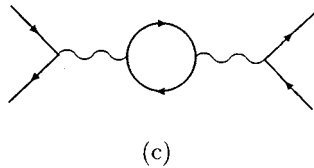
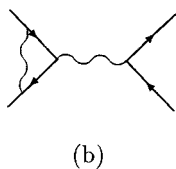
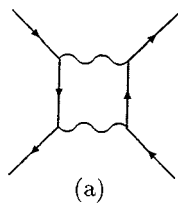
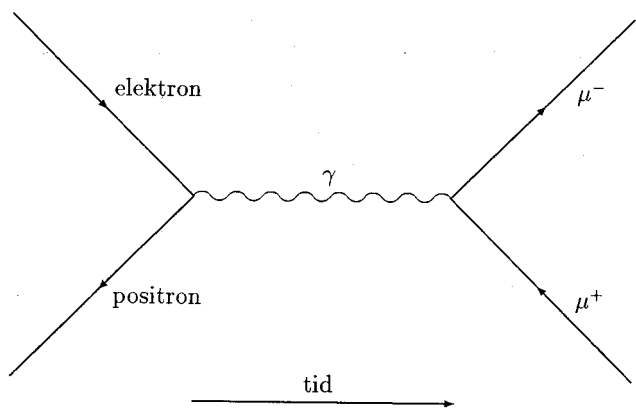
QCD-teorien blev født omkring 1973 ud af et skrækindjagende dilemma for kvarkmodellen. Lad os opridses dilemmaet, som det tegnede sig omkring 1970. Man havde udført et stort antal eksperimenter for at finde disse kvarker. Deres "fingeraftryk" skulle være tydeligt nok: de har jo underlige tredjedels-ladninger. Men ingen kvark blev nogensinde fundet. Protoner, pi-mesoner osv. blev splittet ad i millioner af sammenstød, men stumperne indholdt aldrig kvarker, kun protoner, pi-mesoner og andre hadroner. Energien i sammenstødet blev altid kun brugt til at producere "mere af det samme". Kvarkerne syntes fastholdt i et jerngreb.

Altså, påstand nr. 1: Kræfterne mellem kvarkerne inden i hadronerne er meget store.

Men kvarkmodellens succes såvel som den allerede omtalte nye udgave af Rutherfords eksperiment, SLAC-eksperimenterne, hvor højenergetiske elektroner blev brugt til at "lyse" ind i hadronerne med, ja det tydede altså sammen på, at kvarkerne stort set løb frit omkring inde i hadronerne.

Altså, påstand nr. 2: Kræfterne mellem kvarkerne inden i hadronerne er små!

Kvarkmodstanderne rystede på hovedet. Det var, som om kvarkerne både måtte puste og have mel i munden.



Figur 5.1 Feynman-diagram for processen $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$. Ligesom kvark-diagrammer skal det læses fra venstre mod højre som en tidslig udviklingshistorie. En positron og en elektron, produceret i acceleratoren, er vist som de fuldt optrukne linier til venstre i diagrammet. Elektronlinien har pil i tidens retning; anti-elektronlinien (positronlinien) har sin pil modsat tidens retning. Når de to (partikler eller bølger) støder sammen, er der en vis sandsynlighed for, at de udletter hinanden, og at feltenergien i stedet oplagres et ganske kort øjeblik i det elektromagnetiske felt, foton-feltet, vist som en bølgelinie. Endelig er der en vis sandsynlighed for, at det "blævrende" fotonfelt sætter gang i μ -feltet, og at det hele ender med μ -bølger, som udbreder sig mod vores detektorer og registreres som μ^+ - og μ^- -partikler. Svarende til diagrammet opstilles en formel, som giver et bestemt tal, kaldet den kvantemekaniske amplitude. Kvadratet på denne amplitude er et mål for hyppigheden af processen. Sådan fungerer kvanteteorien!

Figur 5.2 Feynman-diagrammer svarende til de første korrektioner til fig. 5.1. De forskellige udviklingsforløb beskriver mere og mere indviklede "felt-fluktuationer", som beregningen tager hensyn til. I (c) ses for eksempel en pardannelse og senere annihilation af et elektron-positron par. Hvert par af vertexer (se nedenfor) bidrager med en faktor $1/137$ ($1/137,03599\dots$), vores gamle ven finstrukturkonstanten (fra kap. 3). Man kan forstå, at indviklede diagrammer bliver til små korrektioner: $1/137$ ganget med sig selv flere gange er et meget lille tal.

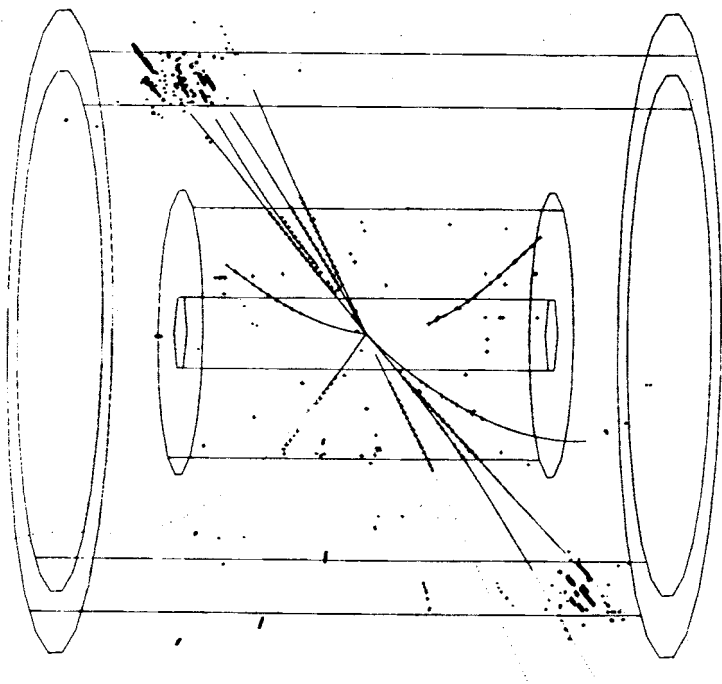
Figur 5.3 De tre elementer til Feynman-diagrammer for QED: (a) foton-udvikling, (b) fermion-udvikling og (c) foton/fermion-vertex. Formlen for deres bidrag i de matematiske udtryk kan føres tilbage til Maxwell-ligningerne.

Og så var der en tredje vanskelighed. Den skulle dog ende med at føre til løsningen på det hele. I Tabel 4.5 så vi eksempler på baryoner (medlemmer af proton-familien) bygget af tre helt ens kvarker: $\Delta^{++} = (uuu)$, $\Delta^{-} = (ddd)$ og $\Omega^{-} = (sss)$. En nærmere analyse viser, at de tre kvarker ligger i én og samme kvantetilstand. Men det er forfærdeligt! Det må og kan de ikke gøre, for kvarkerne er fermioner, der har at adlyde Pauli-princippet (kap. 3). Ellers forstår vi slet ingenting. Problemet blev løst på en måde, der først så utrolig søgt ud. Man påstod – og alt tyder nu på, det virkelig er rigtigt – at hver kvark forekommer i *tre* varianter (ét af de to 3-taller fra kap. 3). Ordmageren, Gell-Mann hjalp ved at sige, at hver kvark findes med tre forskellige "farver": rød, grøn og blå. Der er selvfølgelig slet ikke tale om rigtige farver, men blot om, at kvarkerne har "3 måder at være på". Nå, men hvis det er tilfældet, så kan for eksempel de tre s-kvarker i en Ω^{-} godt være i forskellige kvantetilstande, selv om det ser ud som om, de er i den samme: de har bare hver sin farve. Hokus Pokus Filiokus!

Er det nu ikke det rene vrøvl? Som svar, lad os straks se på et eksperimentelt resultat, der ville have vakt forbløffelse anno 1970.

Vi går til et LEP-eksperiment igen, men ser nu på et af de mange tilfælde, hvor elektronen og positronen forvandles til noget andet end til et my-par, nemlig til et *kvark-par* (iøvrigt via et Feynman-diagram fuldstændig som fig. 5.1). Jamen kvarkerne kan jo ikke produceres! indvender læseren. Nej, men hør nu bare: Vi ser ved store energier næsten altid pi-mesoner (og andre hadroner) produceret i to "sprøjt" (jets), der nøje følger den retning, kvarkerne ville være løbet, hvis de kunne komme ud. Der *blev* produceret et kvark-par! Men allerede da kvarkerne var omkring en proton-diameter fra hinanden, blev deres energi omdannet til hadroner. (Fig. 5.4).

Det billede, der tegner sig, er forbløffende overbevisende. Efter Feynman-diagrammet fig. 5.4 kan vi nøje beregne, hvor hyppigt de to jets kommer ud i forskellige retninger. Svaret afhænger af kvarkernes spin, og eksperimentet stemmer med et kvark-spin på $1/2$, som vi forlanger. Det samlede antal jet-begivenheder kan også beregnes. Svaret afhænger kritisk af kvarkernes mærkelige ladninger. Det er jo størrelsen af dem, der bestemmer, hvor godt fotonfeltet er til at "ruske op" i kvark-felterne. De observerede antal passer fint med at: 1) kvarkerne virkelig har ladninger på $2/3$ og $-1/3$, samt at 2) kvarkerne forekommer i netop *tre udgaver hver*. Uden de tre farver ville beregningerne kun forklare en tredjedel af det observerede!



Figur 5.4 En computer-rekonstruktion af en begivenhed i DELPHI-detektoren (med dansk deltagelse) ved LEP-acceleratoren (CERN). Man ser den tøndeformede detektor med en diameter på ca. 10 m. Elektronen og positronen kommer ind fra hver sin side langs tøndens akse og annihilere i midten. Det dannede kvark/antikvark-par er forvandlet til to jets af hadroner, mest pi-mesoner. Deres spor er optegnet. Sporenes krumning skyldes det påtrykte magnetfelt, som bruges til at måle impulser. De mest krumme spor kommer fra partikler med lille impuls (og energi) og spiller en uvæsentlig rolle. Man ser tydeligt de to partikel-sprøjt, der kan opfattes som en af de mest slående bekræftelser på kvark-teorien. De to jets fungerer næsten som "kvark-spor". Jets er tydeligere og tydeligere ved højere og højere energier. Den viste begivenhed er optaget ved Z-massen 91,2 GeV.

Ideen med tre farver kan udbygges med følgende regel: rigtige hadroner, dem, vi ser i eksperimenter, er altid "hvide" (dvs. indeholder alle farver ligeligt, jf. et farvefjernsyn): baryoner må have tre kvarker i hver sin farve; mesoner må bestå af kvark og anti-kvark i "modsatte" farver (komplementærfarver). Ordene her modsvares af helt præcis matematik. Og reglen "forklarer", hvorfor der ikke findes hadroner dannet af to kvarker osv.: 2 farver kan ikke give hvidt.

Men farve-ideens allerstørste triumf var at give anledning til en komplet teori for de stærke vekselvirkninger: QCD. Og nu kan vi forklare betydningen: Quantum Chromo Dynamics, af det græske ord *chroma* for farve. Det var selvfølgelig igen Gell-Mann, der var "ordvrider". Teorier af denne type (ikke-abelske gauge-teorier, eller Yang-Mills-teorier)¹ havde været studeret af matematiske fysikere siden slutningen af 1950'erne, men man vidste ikke, om de havde noget med virkeligheden at gøre.

Det er bedst at tænke på dem som generaliseringer af vores teorier for elektricitet og magnetisme: QED er også en gauge-teori (men abelsk). Tænk engang på to faste kugler med modsatte elektriske ladninger. Der går et elektrisk felt fra den positive til den negative. Tænk så i stedet på to hypotetiske kugler med en "kvark-farve" på den ene og med en "anti-farve" på den anden. Det er måske plausibelt, at der kan konstrueres en teori, hvorefter der så går et slags "farve-elektrisk" felt fra den ene til den anden. Men der er nu hele tre slags farver for feltet at begynde i, og hele tre slags anti-farver at ende i. Derfor bliver der åbenbart ikke mindre end $3 \cdot 3 = 9$ slags elektriske felter, hver med både farve og anti-farve. Nu viser det sig ganske vist, at en "hvid" blanding af dem opfører sig ganske som vores gamle ven, fotonfeltet. Den blanding har ikke noget med de stærke vekselvirkninger at gøre. Men der er immervæk 8 helt nye felter, både "elektriske" og "magnetiske". Faktisk er det forbløffende (og uhyre smukt!), at man kun kan få teorien til at virke på én eneste måde uden at bryde relativitetsteoriens eller kvanteteoriens krav. Det kunne være det rene skrivebordspjat, men alt tyder nu på, at naturen virkelig er sådan indrettet. Disse farve-elektromagnetiske-felter kaldes *gluon*-felter (eng.: glue = lim; de "limer" kvarkerne sammen inden i hadronerne).

¹Engelsk: gauge, [gæjtch] = justering; Abel, norsk matematisk geni (1802-29); Yang og Mills, amerikanske fysikere. Vi kan desværre ikke begrunde alle disse ord.

Kvantekromodynamikken i praksis

Teorien har en række slående konsekvenser. For det første bør gluonfelterne kunne anslås nogenlunde som fotonfeltet. Så får vi gluoner, og altså 8 slags. Som fotonen har de masse nul og spin 1. Kan de observeres? Ja og nej! Det er ganske som med kvarkerne. Gluoner kan heller ikke observeres direkte: de er ikke hvide, de er "dobbelifarvede". Men som kvarker kan de danne jets. Den simpleste situation er den, hvor en kvark når at udstråle en gluon, inden den selv bliver til en jet. Så skulle vi se tre jets: én for kvarken, én for anti-kvarken og én for gluonen. Teorien tillader at beregne, hvor hyppigt det skulle ske, og hvor ofte vinklerne er sådan og sådan. Fænomenet er utvetydigt observeret siden slutningen af 1970'erne. Det blev det tyske accelerator-laboratorium DESY ved Hamborg, der kom først med opdagelsen, som teorien havde forudsagt. Ved hjælp af denne "jet-fysik" føler vi næsten, at vi "ser" kvarker og gluoner lige så godt som de almindelige partikler via deres spor i detektorer.

Der er en anden meget vigtig egenskab ved QCD. De dobbeltfarvede gluoner kan noget, som fotoner (der ellers minder meget om dem) ikke kan: de kan føle hinanden. Fotonerne kan kun føle partikler, der har elektrisk ladning, men har ingen selv. Gluonerne derimod har selv (dobbel) farve. Dette forhold viser sig mærkeligt nok at løse problemet med både "at puste og have mel i munden" for kvarkerne! Fænomenet er en meget snedig konsekvens af kvanteteoriens anvendelse på QCD-teorien og blev opdaget i 1973 samtidigt af amerikanerne Gross og Wilczek, og af Politzer. Lad os først spørge: hvor stor er kvarkernes farve-ladning? Da vi har stærke vekselvirkninger, vil vi vente, den er større end de sølle $1/137$ for (kvadratet på) elektronens elektriske ladning. Det er den også, men det snedige er, at værdien *afhænger* af kvarkernes (og gluonernes) bølgelængde: For tilstrækkelig små bølgelængder bliver kvarkernes farve-ladning svagere og svagere. Omvendt for store kvarkbølgelængder: dér er farveladningen stærk. Jamen det er det bedste, vi kunne drømme om: Kvarkmodellen har brug for, at kvarkerne ikke kan komme ud. Det begynder vi nu at forstå: ved store afstande/bølgelængder er kræfterne stærke. Men kvarkmodellen havde også brug for, at kvarkerne var næsten frie inden i hadronerne ved små afstande/bølgelængder. QCD-teorien havde denne egenskab helt af sig selv. Og at der overhovedet er en vis grænsebølgelængde mellem svage og stærke farvestyrker passer med, at de stærke vekselvirkninger netop har en bestemt rækkevidde (kapitel 3 og 4).

Først for ganske nylig i 1990 er disse forudsigelser blevet direkte eftervist ved LEP: Når bølgelængden er 1 procent af en fermi, er farvestyrken $1/5,3$. Når bølgelængden bliver 5 gange mindre, falder farvestyrken til $1/8,3$. Ikke meget, men just, hvad man kunne vente. (Husk, at 1 fermi er ca. diameteren af en proton.)

Vi får nu følgende billede af 2-jet produktionen fig. 5.4: Straks efter dannelsen af kvarken og antikvarken "synger" kvark/antikvark-feltet med en ren, høj "tone" (lille bølgelængde) ved de høje energier – uforstyrret som en fri kvark og antikvark. Men når deres afstand er nået op på ca. 1 fermi, begynder gluonfeltet at "få øje på dem" og at "brumme med", og de lavere frekvenser, længere bølgelængder og kraftigere farvestyrker river mere og mere indviklede bølger af kvark-gluonfeltet op. Til sidst har vi den kaskade af "torskesmut", som er jet'en af pi-mesoner.

Processer med jets ved meget høje energier kan vi beregne fint og nøjagtigt, og alt passer smukt. Men ved længere bølgelængder er QCD simpelt hen for indviklet til, at vi kan håndtere matematikken godt. Vi kan derfor faktisk ikke påstå, at vi forstår i detaljer, hvorfor kvarkerne er indespærret; hvorfor hadron-masserne er netop, som de er; hvorfor kun "hvide" hadroner forekommer, osv. Der er dog håb forude. Det er muligt at simulere QCD's opførsel på en datamat. Alt ser lovende ud, men en virkelig overbevisende nøjagtighed forventes først med nye computere omkring årtusindskiftet.

QCD giver også i princippet en teori for (de stærke) kernekræfter, der holder protoner og neutroner sammen. Igen er teorien for indviklet til, at vi kan følge detaljerne, men kernekræfterne kan siges at være analoge med visse af de kemiske kræfter mellem atomerne. Ligesom de kemiske kræfter er en (ganske vist indviklet) konsekvens af QED, sådan er kernekræfterne en (ganske vist indviklet) konsekvens af QCD.

GSW

H.C. Ørstedes opdagelse i 1820 viste, at elektricitet og magnetisme er to sider af samme naturfænomen. Standardmodellen forener tilsvarende, omend mindre fuldstændigt, vores forståelse af de svage og de elektromagnetiske vekselvirkninger.

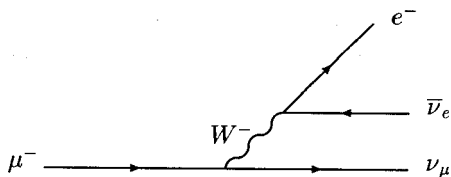
Lad os begynde med at se på to typiske svage processer: my-henfald og neutron-henfald (fig. 5.5). Neutronen henfalder ved, at dens ene d-kvark henfalder på en måde, der til forveksling minder om my-henfaldet. Henfaldet er formidlet af et særligt felt, analogt

til fotonfelter og gluon-felter. Det er $W^\pm$ -feltet, og de tilhørende partikler kaldes W^+ og W^- . De er hinandens antipartikler. De er skam også fundet i 1983, men lad os gå tilbage til 1963, da dette billede af processen havde en yderst hypotetisk karakter.

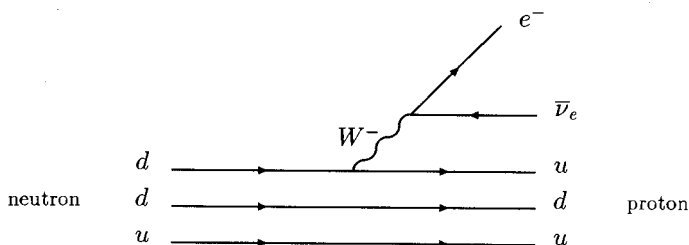
Amerikaneren Glashow foreslog da en gauge-teori for svage vekselvirkninger baseret på disse forestillinger (fig. 5.5). Denne gang har vores fermioner ikke 3 slags "måder at være på" som med kvark-farverne. De har 2 slags: de kan stå foroven eller de kan stå forneden i deres ("kvark-brødre-" eller "lepton-søster-") dublet (jf. side 45). Vi får derfor nu $2 \cdot 2 = 4$ felter at tænke over. Men denne gang ønsker vi ikke at gemme det ene (den "hvide blanding") til en anden lejlighed: den er der nu! De 2 af de 4 kan vi straks forstå: de svarer til W^+ og dens anti-partikel W^- . Hvad om vi alligevel så bort fra den fjerde lidt? Så ville vi bare have en tredje, og den må være elektrisk neutral, viser det sig. Lad os kalde den W^0 . Det skulle vel aldrig være fotonen? Glashow sagde korrekt nej. Svage W-felter vides nemlig (siden 1956) at adskille sig markant fra fotonfeltet ved at kunne se forskel på partikler og deres spejlbilleder – en stor overraskelse i 1956. (At der overhovedet er forskel, skyldes partiklernes spin: partiklen og spejlbilledet spinner hver sin vej).

Men så kan W^0 altså ikke være fotonen. Vi bliver derfor nødt til at have fat i den fjerde mulighed. Det giver os den vanskelighed, at teorien så forudsiger svage vekselvirkninger formidlet af den neutrale W^0 , og sådan nogen var aldrig set i 1963. Det er de unægtelig blevet siden! Men der var en anden skrækkelig vanskelighed for Glashow: En gauge-teori kan kun give felter med masseløse partikler ligesom fotoner og gluoner. Og noget af de sikreste, man vidste i 1963 var, at de hypotetiske W-partikler måtte være supertunge. De blev som nævnt fundet i 1983 og havde massen 80,6 GeV. Det er forståeligt, at næsten ingen hæftede sig ved Glashows teori.

I 1967 så situationen lysere ud. Skotten Peter Higgs havde gjort opmærksom på, at gauge-partikler udmærket kan "se ud, som om de har masse" under særlige omstændigheder. Faktisk havde man glemt, at man kendte tilfælde, hvor selv fotonen ser ud, som om den har en masse. Det drejer sig om superledende metaller, kendt siden 1911. Ved meget lave temperaturer forsvinder deres elektriske modstand, og så udviser de den karakteristiske "Meissner-effekt": de udstøder magnetfelter. Eller rettere, magnetfeltet kan kun trænge et ganske lille stykke ind i superlederen. Det magnetiske felt (en del af fotonfeltet) har altså en rækkevidde i superlederen.



my-leptonens henfald



netronens henfald

Figur 5.5 Feynman-diagrammer for μ^- -henfald og for neutron-henfald. d-kvarkens henfald i neutronen minder næsten til forveksling om μ^- -henfaldet: lepton-dubletten (ν_μ, μ^-) er blot skiftet ud med kvark-dubletten (u,d) (jf. kapitel 4). Bevarelse af elektrisk ladning betyder, at W her må have negativ ladning.

Læsere, der husker Yukawas erkendelse af sammenhængen mellem rækkevidde og masse, bør nu sige: bingo! Den normalt ganske masseløse foton ser ud som om den har en masse inde i superlederen! Faststof-fysikken lærer os, at det skyldes tilstedeværelsen af et "felt" af såkaldte Cooper-par (af elektroner).

Vi behøver derfor blot at postulere, at der i det tomme rum findes endnu et felt, Higgs-feltet (analogt til Cooper-parrene), der får det tomme rum til at opføre sig som en slags superleder for de der $W^\pm$ -felt/partikler! Det er faktisk en stiv påstand at sluge selv for fysikere, men resten af teorien ser nu minsandten ud til at fungere. Tunge W-partikler svarer til, at de svage vekselvirkninger har en kort rækkevidde. Faktisk er det derfor, de er svage: De er ikke særlig svage inden for deres rækkevidde, men denne er ca. 600

gange mindre end for de stærke vekselvirkninger.

I 1967 blev Glashows teori genopdaget af amerikaneren Weinberg, men han løste problemet med $W^\pm$ -massen ved hjælp af "Higgs-mekanismen". Pakistaneren Salam var inde på lignende tanker. Heraf navnet (og Nobelprisen 1979): Glashow-Salam-Weinberg-, eller: GSW-teorien. Weinberg udviklede også beskrivelsen af forholdet mellem W^0 og den elektrisk neutrale ekstra "4. mand", lad os kalde den X^0 . Ingen af de to svarer til fysiske partikler! Men visse blandinger af dem svarer til (i) fotonen og (ii) den Z-partikel, vi allerede har snakket om mange gange (og som man ofte kalder Z^0). Blandingsforholdet beskrives ved den såkaldte Weinberg-vinkel, som nu er målt til 28,7 grader.² Havde den været 0 grader, ville Z^0 simpelt hen have været W^0 , og X^0 ville have været fotonen. De svage og de elektromagnetiske vekselvirkninger ville da intet have haft med hinanden at gøre. Nu er de derimod blandet sammen.

Selv i 1967 var der ikke mange, der hæftede sig ved teorien, især fordi Weinberg ikke vidste, hvordan man kunne håndtere kvanteformuleringen af så indviklet en teori. Men i 1971 påviste den unge hollænder G.'t Hooft i sit Ph.D.-arbejde, at det kunne gøres – elegant. I 1974 observeredes på CERN de første tegn på svage vekselvirkninger formidlet af Z-partiklen, og efterhånden viste det sig, at sådanne eksperimenter – neutrino-eksperimenter – kunne beskrives smukt ved hjælp af Weinbergs vinkel. Da dens værdi blev kendt, blev det muligt fra teorien at forudsige W- og Z-masserne til ca. 80 GeV og ca. 90 GeV. Det var alt for meget til, at de kunne produceres dengang. Og mange følte stadig, at teorien virkede håbløst fortænkt: Man påstod, at fotonen med en masse på 0 skulle være beslægtet med en W og Z^0 med masser på næsten 100 GeV! Og så dette vanvittige Higgs-fænomen.

På CERN gik man (under ledelse af hollænderen Van der Meer) i gang med at ombygge den nye SPS-accelerator (omkreds 6,9 km, beregnet til protoner med energi på flere hundrede GeV, se fig. 1.1) til at kunne masseproducere og accelerere anti-protoner. I 1983 blev de første W- og Z-partikler fundet, nøjagtig som forudsagt (projektlederen var italieneren C. Rubbia, som nu er generaldirektør for CERN). En af de største triumfer i elementarpartikelfysikkens historie var i hus. Selv overbeviste teoretikere stirrede igen vantro på deres egne lange regninger med tossede symboler: Det var ligegodt utroligt, at verden virkelig fungerede sådan!

Men eksperimenterne var ekstremt komplicerede at analysere.

²Normalt angives kvadratet på vinklens sinus, altså i dette tilfælde 0,230.

Der sker så meget, når en proton og en anti-proton annihilerer, at W- og Z-partiklerne er som meget små nåle i meget, meget store høstakke.

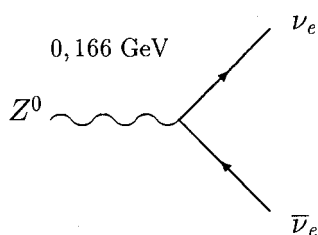
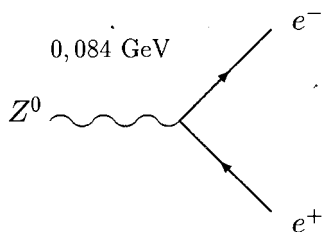
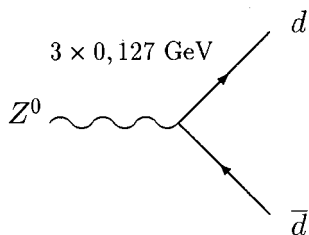
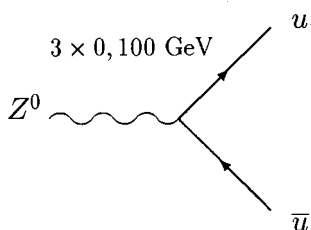
Z^0 -partiklens fysik

Med den splinterny LEP-accelerator har vi fået en ren og skær Z^0 -fabrik. Vi har omtalt Z^0 -produktion ved LEP allerede i kap. 1. Hvis QED alene havde været den korrekte teori, ville der ved LEP produceres mindre end ét my-par i timen. Men på grund af Z^0 -resonansen ved 91,18 GeV stiger tællehastigheden flere tusinde gange her: Z^0 gør LEP flere tusinde gange nyttigere.

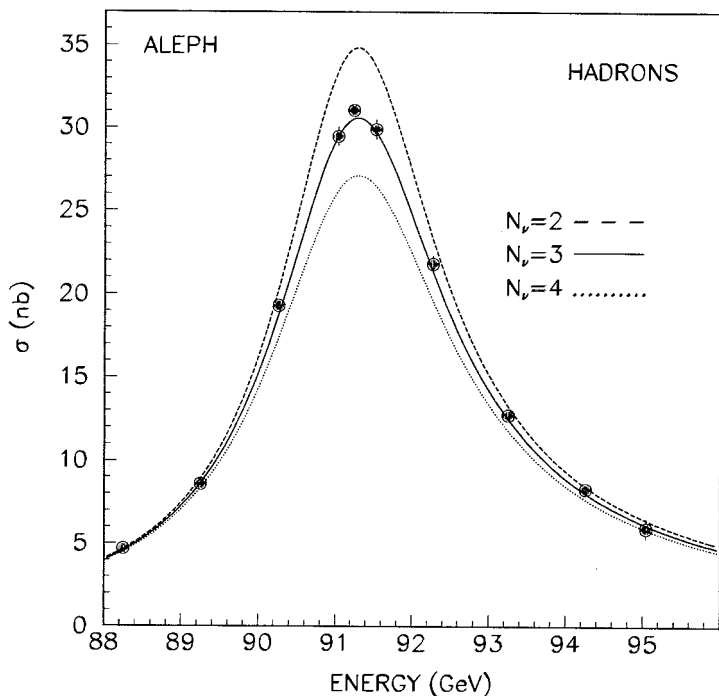
Standardmodellen giver en fuldstændig præcis forudsigelse for, hvordan Z^0 -resonansen vil henfalde. Konklusionerne heraf er meget vidtrækkende. Lad os følge denne pointe. Z^0 henfalder på en meget enkel måde. Altid til en fermion og den selvsamme antifermion blandt Standardmodellens "stof-partikler". Hvert af de mulige henfald foregår med en vis "villighed", som vi nøjagtigt kan beregne og angive som et bidrag til Z^0 -resonansens totale henfaldsbredde (fig. 5.6). I fig. 5.7 er så endelig vist de eksperimentelle resultater for en måling af, hvor hyppigt der sker noget i LEP, når energien varierer hen over Z^0 -massen omkring 91,2 GeV. Det er tydeligt, at kun kurven med 3 generationer passer.

Lad os forklare dette vigtige resultat lidt nøjere. Tænk engang på Z^0 -henfald til et neutrino/antineutrino-par. Hvordan ser vi det? Vi ser det slet ikke! Neutrinoerne vekselvirker så svagt, at de i praksis aldrig udløser detektoren. Men neutrino-henfaldene bidrager med et solidt beløb til den totale Z^0 -bredde, så deres betydning kan alligevel efterprøves. Lad os nu forestille os, at der fandtes en 4. generation af fermioner, som vi endnu ikke kendte, fordi kvarkerne og den ladede lepton var alt for tunge. Det kunne vel nok tænkes? Nej! Ikke hvis denne 4. generation indeholder en "normal", masseløs neutrino. Dens bidrag ville give Z^0 -resonansen en bredde, der er 0,17 GeV større end det målte, meget mere end måleusikkerheden kan tolerere.

Det er en ganske betagende tanke, at vi hermed tør påstå, at der nok ikke findes flere end de 3 generationer, vi allerede kender! Vi har virkelig bestegt et solidt nyt trin på kvantestigen.



Figur 5.6 Feynman-diagrammer for Z^0 -henfald til fermioner i 1. generation. Tallene angiver bidraget fra hver proces til Z^0 'ens totale bredde. Bemærk 3-tallet for kvarker på grund af kvarkernes farve. Det er altså igen blevet bekræftet i Z^0 -fysik – med meget stor nøjagtighed. Generationerne 2 og 3 giver helt samme bidrag, og læseren kan more sig med at lægge sammen og finde ud af, at den totale bredde forudsiges til 2,50 GeV. Her må man huske på, at Z^0 ikke kan henfalde til et par af t -kvarker i 3. generation, da t -kvarken simpelt hen er for tung (forudsat den findes).



Figur 5.7 Måling af resonanstoppen for Z^0 -partiklen ved ALEPH-detektoren (med dansk deltagelse) ved LEP. Datapunkternes lodrette placering er et mål for, hvor hyppigt en Z^0 produceres ved de forskellige energier, afsat vandret. Vi ser, at resonanstoppens bredde i halv højde netop er 2,5 GeV (med en måleusikkerhed på 0,02 GeV). Figuren viser også Standardmodellens beregninger svarende til 2, 3 og 4 generationer. (Figuren hentyder forsigtigt kun til antallet af masseløse neutrinoer, N_ν , jf. teksten). Data-punkterne følger perfekt den beregnede kurve svarende til 3 generationer i Standardmodellen, medens kurverne svarende til 2 eller til 4 generationer er modbevist af de eksperimentelle data.

6. Perspektiver

Det kosmologiske perspektiv

Atom-, kerne- og partikelfysik beskæftiger sig med det mindste af det mindste. Kosmologien (læren om universets dannelse og udvikling) beskæftiger sig med det største af det største. Men de to belyser forbavsende nok hinanden. Kosmologerne har også deres "Standardmodel". Ifølge den blev universet "skabt" i "the big bang", det "store brag", for ca. 15 milliarder år siden. Lyset fra vore nabostjerner er år om at nå os, og lyset fra galakserne millioner af år. På den måde ser vi tilbage mod skabelsen. Hvor langt tilbage kan vi se? Med almindeligt lys kan vi faktisk se gennem de fleste af disse milliarder år. Men der findes mere effektive metoder. Den kosmologiske standardmodel, baseret på Einsteins almene relativitetsteori, fortæller os, hvordan universet kølede af efter "the big bang". Da det var 1 sekund gammelt (!), havde det en temperatur på ca. 10 milliarder grader, og de typiske energier var kernefysik-energier på 1 MeV. Ved en alder på 4 sekunder var temperaturen den halve, 100 sekunder senere var den faldet til en tiendedel osv. På få minutter var den kernefysiske fase forbi. Herefter var universet præget af atomfysik i ca. 1.000.000 år. I al den tid var det glødende, lysende, uigennemsigtigt. Men derefter holdt det op at lyse og blev gennemsigtigt. Hvor blev det sidste lys af? Vi "ser" (med mikrobølgeantenner) resterne af det den dag i dag som den berømte kosmiske mikrobølge-baggrundsstråling, der kommer alle vegne fra. Dens temperatur er målt til knap 3 grader (over det absolutte nulpunkt) i nøje overensstemmelse med, hvad den fortsatte nedkøling skulle have bevirket. Baggrundsstrålingen er den kosmologiske models første store triumf. Ved hjælp af den kan vi altså se tilbage til den tid, da universet "kun" var ca. 1 million år gammelt, en titusindedel af dets nuværende alder.

Kernefysikken tager os meget længere tilbage: Kerne- og partikelfysiske beregninger viser, at i de første få minutter skulle ca. 25 procent af alle baryoner omdannes til heliumkerner, mens resten skulle være brintkerner – under forudsætning af, at der netop er

de 3 generationer af fermioner i Standardmodellen. Det passer med observationer af grundstofindholdet i universet! Det er den kosmologiske models anden store triumf. Og det er et eksempel på, hvordan kosmologi og fysik hjælper hinanden. (Tungere grundstoffer som metaller er dannet langt senere ved, at supernovaeksplosioner efterhånden har "forurennet" eller rettere beriget det gamle univers en lille smule. Det er den smule, der er baggrunden for at liv kunne opstå.)

Med partikelfysikken kommer vi endnu meget, meget tættere på selve skabelsesøjeblikket. Protoner og anti-protoner kunne dannes, da de typiske energier svarede til massen af de to, ca. 2 GeV. Sådanne energier fandtes, da universet kun var ca. 10^{-6} sekunder gammelt. Det var ved den tid, at rasende varme kvark- og gluonfelter afkøledes så meget, at protonerne (samt neutronerne og disses antipartikler) kunne "fryse ud". Vi kan ligefrem måle partikelfysikkens fremskridt ved at pege på, hvor langt tilbage mod skabelsen, vi tør påstå at forstå de fysiske processer. Z^0 -partiklen med dens masse på ca. 100 GeV svarer således til, at vi forstår universets fysik tilbage til, da det var 10^{-10} sekunder gammelt! Partikelfysikere spejder begærligt efter at forstå eksplosionens endnu tidligere faser. Der har allerede nogle år været forbløffende konkrete spekulationer fremme herom. Måske vil de kosmologiske observationer ligefrem være blandt de mest effektive til at komme videre i partikelfysikken. Vi ved således i dag, at langt den overvejende del af stoffet i universet findes *uden for* stjernerne! Vi ved ikke i hvilken form, men det menes *ikke* at være som baryoner, altså som almindeligt stof! Partikelfysikere gør sig adskillige ret konkrete spekulationer over mulighederne. Hvis én af dem kan bekræftes, vil det give forskningen en vældigt skub fremad.

Det erkendelsesmæssige perspektiv

Bekræftelsen af (partikelfysikkens) Standardmodel betyder, at vi er kommet til en "afrundet fase" i vores forståelse af stoffets mindre og mindre bidder, universets tidligere og tidligere faser og de mere og mere "fundamentale" lovmæssigheder. Vi synes det er smukt, når vi erkender kvarkerne som langt simple partikler end protoner og pi-mesoner, at elektronen og de andre leptoner åbenbart er i familie med kvarkerne, at alle de tre vekselvirkninger beskrives med samme teori-typer (gauge-teorier) baseret på generaliserede elektriske og magnetiske felter (og deres kvanter, fotoner, gluoner,

W og Z). Men vejen til denne erkendelse var meget besværlig. En enorm mangfoldighed af helt andre ideer har været fremme. Standardmodellen har udkonkurreret dem alle. Ikke *fordi* den er smukkere, eller fordi vi bedre kan lide den. Men fordi den som den eneste levede op til naturvidenskabens ubønhørlige krav: En teori er ikke en teori før den er i stand til at gøre markante forudsigelser, der senere bekræftes eksperimentelt. De andre teorier kunne undertiden også komme med forudsigelser, men de blev blot modbevist af eksperimenterne. Standardmodellen forudsagde gluoner, W- og Z-partikler osv., samt angav talværdier for deres egenskaber i meget stor detalje. Utroligt mange af disse forudsigelser er blevet perfekt bekræftet i 1980'erne. Vi bør stadig være lidt skeptiske. Flere aspekter er endnu ikke blevet efterprøvet eksperimentelt. Og mange af de nødvendige beregninger er vore computere endnu ikke store nok til. I princippet kunne det derfor tænkes, at Standardmodellen var forkert. Men det er lidt ligesom at bide i et æble og hver gang opdage, der er et kernehus indeni. På et eller andet tidspunkt holder man op med tvivle på, at alle æbler er sådan. Efterhånden er vi blevet så overbevist om Standardmodellen, at vi tør skrive bøger om den!

Hinsides Standardmodellen

Betyder det så, at partikelfysikken er afsluttet? At der aldrig mere vil blive opdaget noget, som Standardmodellen ikke kunne forudsige? Alle partikelfysikere er rørende enige om at svaret er: nej! Ellers burde de måske også lave noget andet. Men der er meget stærke argumenter, der taler for, at Standardmodellen – som alle andre fysiske teorier – blot repræsenterer en foreløbig tilnærmelse, der nok passer i et langt større erkendelsemæssigt område end alle tidligere teorier, men som dog har sin begrænsning. Begrænsningen ventes at vise sig ved, at der ved endnu højere energier – endnu mindre afstandsskalaer – faktisk findes helt nye fænomener. Lad os se på hvorfor folk tror, det må være sådan.

Der er de rent filosofiske grunde. Trods alle sine smukke fortrin ligner Standardmodellen ikke "den endegyldige teori". Den lader en række spørgsmål stå tilbage "bøjlet i neon": Hvorfor vælger naturen lige disse gauge-teorier? Hvorfor er der generationer af fermioner med to kvarker og to leptoner i hver? Og hvorfor lige tre? Hvad er det for noget med Higgs-fænomenet, altså at "det tomme rum" er "superledende" for $W^\pm$ - og Z^0 -felter? Findes der

virkelig en Higgs-partikel? Hvorfor har vi ikke set den endnu? Hvorfor er kvarkers og leptoners masser netop, som de er, og så forskellige?

Og så er der tyngdekrafterne. Einsteins almene relativitetsteori er en enestående smuk teori for tyngdekraften, men den kan ikke forenes med kvanteteorien! Hvad betyder det? Det betyder med usvigelig sikkerhed, at der ved tilstrækkelig høje energier må findes aldeles nye fænomener. Vi kan endda sige ved hvilke energier. Allerede Planck gjorde opmærksom på, at en kombination af hans konstant, lyshastigheden og Newtons tyngdekonstant pegede på en bestemt karakteristisk energi- og længdeskala, Planck-skalaen, hvor tyngdekrafternes kvantefænomener uundgåeligt vil dominere.

Desværre (eller heldigvis?) ligger denne energi ved 10^{19} GeV, langt, langt over, hvad vi kan drømme om at undersøge de næste hundrede år. Men tilstrækkelig tidligt i universets skabelse må universet have været domineret af denne helt sære fysik. Vi kan kun sige med sikkerhed, at ved disse energier bryder begreber som rum og tid fuldstændigt sammen! Specielt har det ingen mening at spørge, hvad der var før "the big bang".

Er fysikerne gale nok til at spekulere på den slags? Ja, netop i 1980'erne er der kommet ideer frem, der direkte handler om sådan noget. Det drejer sig om den selv i medierne meget omtalte strengteori, som har været genstand for en enorm udforskning. Strengteorien "lugter" af noget rigtigt. Den forklarer, hvorfor der er gaugeteorier. Den indeholder Einsteins almene relativitetsteori som passende specialtilfælde, og den kommer med et virkligt bud på, hvilken ny fysik, der må vise sig ved Planckskalaen. Den gør det på en måde, som er i overensstemmelse med kvantefysikkens regler. Og den er hævet over forestillinger som rum og tid: den har en erstatning, som er matematisk i orden, selv om der er langt igen, før vi forstår den fysiske fortolkning. Dens største problem er, at hverken vi eller vore efterkommere i flere generationer kan håbe på en eksperimentel undersøgelse af Planckskala-fysik. Der er derfor fysikere, der anser studiet af den som et tegn på manglende sund sans.

Ifølge strengteorien skal vi tænke på kvarker, leptoner osv. som kvantetilstande af små lukkede (gummibånds-agtige) strenge. De kan blævre og vibrere alt efter hvor meget energi, de indeholder. Men bare det at anslå dem et enkelt trin over deres grundtilstand kræver en gang Planck-energi. Så længe vi ikke magter at anslå dem, kan vi heller ikke erkende dem som udstrakte strenge: de er blot som partikler. Men det kunne er, at de partikler, der kommer

af sådanne streng-grundtilstande, nødvendigvis må vekselvirke på en måde, der minder meget om Standardmodellen.

Men strengteori eller ej, så forventer vi alle, at ét eller andet nyt må vise sig ved højere energier.

Det samfundsmæssige perspektiv

Den eksperimentelle partikelfysik foregår ved et dusin kæmpestore acceleratoranlæg rundt omkring i USA, Vesteuropa, Sovjetunionen og Japan. For eksempel på CERN ved Genève, DESY ved Hamborg, Fermi-Laboratoriet nær Chicago, SLAC nær Stanford, Serpukov nær Moskva, KEK nær Tokyo. Desuden eksisterer planer for fremtidige anlæg. De mest ambitiøse er de amerikanske SSC-planer, som nu er godkendt til udførelse i Texas. Her vil man bygge en accelerator til sammenstød af protoner. Dens omkreds bliver 87,12 km (!) og beam-energien $20 \text{ TeV} = 20.000 \text{ GeV}$. Den vil anvende superledende teknologi. Den ventes færdig omkring årtusindskiftet. CERN har planer om et projekt i LEP-tunellen, der for væsentligt færre penge vil kunne præstere 8 TeV (LHC projektet). Disse projekter burde kunne vise, om top-kvarken findes, kaste lys over for eksempel Higgs-fænomenet, og måske afklare hvorvidt strengteori-agtige ideer overhovedet går i den rigtige retning. Mange håber især på den helt ny, uventede overraskelse.

Disse projekter repræsenterer investeringer til mange, mange milliarder kroner. Hvorfor er samfundet villig til at investere alle disse penge? Her er nogle af de svar og pointer, man kan fremføre:

Partikelfysik er grundforskningens grundforskning. En umiddelbar nyttevirkning af de egentlige opdagelser er ikke i sigte. Den historiske erfaring har vist, at anvendelser af grundforskning altid optræder senere. Det er svært at se, hvordan det skulle ske med partikelfysik. Men det er også svært at forestille sig, at en så dybtliggende indsigt skulle forblive aldeles unyttig.

På den anden side er der mere umiddelbare sidegevinster. Den teknologiske udvikling bliver på visse felter presset til sit yderste. Det er en spore til nyudviklinger, som alle de industrialiserede lande og kontinenter ønsker at være med i. Det er nyttigt, at ikke kun militære hensyn præger denne udvikling. Man kan pege på anvendelse af superledende teknologi i ret stor skala og på udvikling af store og avancerede måle- og edb-systemer, ja på forsøg med helt nye former for strålebehandling af cancer. Endelig har der omkring eksperimentel partikelfysik udviklet sig en særdeles frugtbar tradition for internationale, fredelige samarbejder, der i

sig selv har store perspektiver.

Den teoretiske forskning har været til gavn for andre discipliner end de partikelfysiske, både rent matematiske, men også fysiske områder meget tættere på anvendelserne.

Det er nok sådan, at de forskere, der er involveret, ikke i synderlig grad er motiveret af anvendelses-orienterede drømme. De er ofte delvist drevet her og nu af ønsket om kollegial anerkendelse – ganske betryggende for kvaliteten af det, skatteyderne betaler for. Men det afgørende er og bliver en dyb nysgerrighed efter at nå til erkendelse om naturens inderste sammenhænge. Partikelfysikken befinder sig endnu på et lykkeligt uskyldighedsniveau. Visse vilde forslag til anvendelser i det amerikanske SDI-projekt ("stjernekrigsprojektet") synes skrinlagt. Når vi forestiller os fremtidige anvendelser for samfundene, må vi samtidig håbe på, at disse anvendelser bliver af den lykkelige slags.

Det 20. århundredes menneske har rakt ud efter frugterne på kundskabens træ. Det har spist deraf så det forslår. Vores viden og indsigt inden for alle forskningens og teknologiens områder har demonstreret, at det i princippet skulle være muligt at udrydde fattigdom og sult og drastisk at forbedre levevilkårene. Den har unægtelig også skabt mulighed for masseødelæggelse og økologiske katastrofer samt afsløret groteske sider af mennesket selv. For at håndtere disse farer må vi nødvendigvis bruge den samme videnskabelige forståelse, der har været med til at skabe dem.

Håbet for det 21. århundrede må basere sig på, at langt flere får medindsigt i alle de vigtigste forskningsresultater. Det er ikke kun en demokratisk forpligtelse, det er spændende som et eventyr. Det synes som om den verden, naturvidenskaben skildrer, hele tiden fremstår utroligere, smukkere og mere fascinerende, jo mere vi lærer om den.

REGISTER

- Abel, N. 66
Accelerator 13, 14, 31, 71,
72, 79
Alfa-stråle eller -partikel
28, 37
Anderson, W. 30
Annihilation 15, 16
Anti-farve 66
Antikvark 49, 65, 68
Antipartikel 30, 69
Antiproton 71, 76
Arbejde 18
Aristoteles 8
Atom 8, 34, 44
Atomkerne, se kerne
Avogadros tal 17
Baryon 47, 51, 64, 66
Beam 15, 37, 53, 79
Beauty se bottom
Becquerel, H. 28
Beta-stråle 28
Bevægelsesmængde, se
impuls
Big Bang 75
Bohr, N. 8, 37
Bohr-radius 38
Born, M. 9
Bose, S. 29
Boson 29, 39, 47
Bottom- eller b-kvark 46
Bredde 33, 53, 74
Brookhaven 56
Bunch 15
Bølge 20, 26
Bølgelængde 25, 26, 28,
30, 31, 68
CERN 12, 14, 15, 65,
71, 79
Chadwick, J. 41
Charm- eller c-kvark 46,
56
Compton, A. 38
Curie, P. & M. 28
DELPHI-detektor 65
DESY 67, 79
Dalton, J. 8
De Broglie, L. 9
Delta (Δ) -resonans 53,
54
Demokritos 8
Deuteron 54
Dirac, P. 30, 46
Down- eller d-kvark 43,
46, 68
Ehrenfest, P. 9
Einstein, A. 8, 13, 17, 19
Elektricitet 19
Elektromagnetisk felt 26,
28
Elektromagnetiske
vekselvirkninger 10, 45,
63, 68
Elektron 9, 15, 19, 28, 30,
43, 56, 63
Elektronfelt 30
Elektronteori 30, 42
Elektronvolt (eV) 16, 36
Energi 17, 18, 22, 27, 28,
30, 78
Energiproduktion 54
Familie, se Generation
Faraday, M. 20
Farve 64, 66, 67, 68, 73
Farve-ladning 67
Farve-styrke 68
Felt 20, 24, 25, 30
Feltkvanter 12
Fermi (E.) 29, 40, 47, 49
Fermi-Laboratoriet 79
Fermion 29, 39, 40, 41, 47
Feynman, R. 60

Feynman-diagram 60, 63,
 70, 73
 Finstrukturkonstant 38,
 63
 Foton 12, 15, 27, 28, 38,
 46, 63, 70
 Fotonfelt 26, 64
 Frekvens 25, 26, 27, 28,
 30
 Frihedsgrader 30
 GSW 68, 71
 Gamma 18, 22, 53
 Gammastråler 28
 Gauge-teori 66, 69, 76, 78
 GeV 16, 36
 Gell-Mann, M. 43, 56, 64,
 66
 Generation 11, 43, 45, 56,
 73, 76
 Glashow, S. 69, 71
 Glashow-Salam-Weinberg,
 se GSW
 Gluon 11, 29, 66, 68, 76
 Grundtilstand 37, 41, 49
 Hadron 47
 Hastighed 16
 Heisenberg, W. 9, 31
 Heisenbergs ubestemt-
 hedsrelationer 31
 Hertz 25
 Higgs, P. 69
 Higgs-felt 70
 Higgs-mekanisme eller
 -fænomen 71, 79
 't Hooft, G. 71
 Hvilemasse 18
 Hz 25, 26
 Impuls 18, 28, 30
 Isospin 49
 J/psi-partikel 57, 58
 Jet 64, 65, 68
 KEK 79
 Kamiokande 55
 Kelvin 20
 Kerne 9, 10, 37, 40, 44
 Kernekrafter, se stærke
 eller svage k.
 Kernestof 41
 keV (kiloelektronvolt), se
 elektronvolt
 Klassisk 24
 Kosmisk stråling 22
 Kosmologi 23, 75
 Kosmologiske standard-
 model 75
 Kraftfelter 31
 Kvant 27
 Kvanteelektrodynamik, se
 QED
 Kvantefelt 24, 26, 30
 Kvantefeltteori 28
 Kvantehypotese 8, 26, 27,
 37
 Kvantestige 34, 35, 72
 Kvanteteori 9, 24, 27, 30,
 32, 63
 Kvantetilstand 39
 Kvark 11, 37, 41, 43, 45,
 46, 49, 61, 65, 68, 76
 Kvarkdiagram 53, 54
 Kvark-farve 66
 Kvarkfelt 64, 76
 Kvark-hypotese 47
 Kvarkmodel 51, 61
 Kvarkteori 47, 65
 LEP 12, 13, 19, 60, 64,
 65, 68, 72, 74
 Lepton 43, 45, 46
 Leukippos 8
 Levetid 19, 22, 32, 33, 46,
 54
 Lyshastighed 16, 20, 21,
 26, 35, 36, 78
 Magnetisk moment 42, 43
 Magnetisme 19
 Masse 18, 28

- Maxwell, J. 12, 19, 26, 29,
 30, 37, 42, 60
 Maxwell-ligninger 20, 63
 MeV 16, 36
 Meissner-effekt 69
 Mendeleev, D. 8
 Meson 47, 49, 66
 Michelson, A. 20
 Mikrobølge-baggrunds-
 stråling 75
 My-henfald 68, 70
 Myon (my-partikel) 11,
 22, 46, 56, 63
 Ne'eman, Y. 56
 Neutrino 10, 43, 46, 54,
 55, 72, 74
 Neutron 9, 40, 41, 43, 51,
 54, 76
 Neutron-henfald 68, 70
 Newton, I. 78
 Omega-minus 51, 56
 Partikel 24, 28
 Pauli, W. 9, 39
 Pauli-princippet 9, 39, 64
 Periodiske system 8
 Pi-meson (pion) 11, 22,
 40, 43, 54, 56
 Planck, M. 8, 26, 27, 78
 Planck-skalaen 78
 Plancks konstant 27, 29,
 30, 35, 36, 78
 Positron 15, 19, 30, 63
 Proton 9, 40, 41, 43, 51,
 54, 76
 QCD 61, 66
 QED 60, 63
 Quantum Chromo
 Dynamics, se QCD
 Quantum Electro
 Dynamics, se QED
 Radioaktivitet 28, 37, 41
 Relativistisk masse 18
 Relativitetsprincip 21
 Relativitetsteori 13, 16,
 17, 19
 Relativitetsteori, almen
 23, 75, 78
 Relativitetsteori, speciel
 13, 19
 Resonans 11, 33, 42, 51,
 58, 59, 74
 Rubbia, C. 71
 Rutherford, E. 8, 36, 42,
 61
 Rækkevidde 40, 67, 70
 SLAC 42, 61, 79
 SPS 14, 71
 Salam, A. 71
 Schrödinger, E. 9
 Serpukov 79
 Skabelsen 76
 Skal 9, 39, 41
 Spin 29, 39, 46, 49
 Spor 59
 Standardmodel 7, 46, 60,
 68, 72, 74, 76
 Stanford 56
 Stoffelter 31
 Stofpartikler 39, 45, 46
 Strange- eller s-kvark 46,
 56
 Strangeness 56
 Strengteori 78
 Stærke vekselvirkninger
 10, 45, 61
 Superleder 69
 Supernova 55, 76
 Svage vekselvirkninger 10,
 45, 54, 60, 68
 Særhed 56
 Tau-lepton 46, 56
 Tau-neutrino 56
 Temperatur 26
 Thiokol 55
 Thomson, J. 9
 Tidens relativitet 21

Tidsforlængelse 22
 Top- eller t-kvark 59
 Truce se top
 Tryk 18
 Tung brint 54
 Tyngdefelt 23
 Tyngdekræfter 23, 78
 Up- eller u-kvark 43, 46
 Ustabil partikel 32
 Van der Meer, S. 71
 Vekselvirkninger 10
 Verteks 63

W-partikel 12, 29, 69
 Weinberg, S. 71
 Weinberg-vinkel 71
 Weisskopf, V. 35
 Ypsilon-partikel 59
 Yukawa, H. 11, 40, 56, 69
 Z-partikel 12, 15, 16, 18,
 29, 33, 69, 72, 73, 76
 Zweig, G. 43
 Ækivalens 17
 Æteren 20
 Ørsted, H.C. 19, 68

DET GRÆSKE ALFABET

α A	alfa	ν N	ny
β B	beta	ξ Ξ	xi
γ Γ	gamma	o O	omikron
δ Δ	delta	π Π	pi
ϵ E	epsilon	ρ P	rho
ζ Z	zeta	σ Σ	sigma
η H	eta	τ T	tau
θ Θ	theta	v Υ	ypsilon
ι I	iota	ϕ Φ	phi
κ K	kappa	χ X	chi
λ Λ	lambda	ψ Ψ	psi
μ M	my	ω Ω	omega