

CERN og partikelfysikken

Af Peter Hansen

CERNs fødsel

I 2008 vil den største atomknuser, som verden endnu har set, begynde at kolliderer protoner mod hinanden med hver en energi på 7 TeV, dvs. energien der opnås af en proton ved acceleration gennem et spændingsfald på 7 tusind milliarder volt. Kollisionerne vil foregå på CERNs nye accelerator, Large Hadron Collider, eller bare LHC, og fysikerne håber herved at løfte nogle af tågerne, der hviler over den inderste natur af Universets materie.

CERN er en international organisation, grundlagt af de europæiske lande i 1954, med det formål *“at udføre videnskabelige opgaver, som på grund af deres størrelse og omkostninger, ligger uden for mulighederne i de individuelle lande”*. Der tænkes her på fysik på atomkernens skala og herunder. Blandt europæiske organisationer er CERN en af de mest fremgangsrigeste, hvilket bl.a. aflæses af, at LHC har tiltrukket sig meget betydelige ressourcer fra de to andre hovedaktører på scenen, nemlig USA og Japan.

Men sådan har det ikke altid været. Lige efter anden verdenskrig lå europæisk økonomi og videnskab lemlæstet hen, mens USA buldrede frem. I et indflydelsesrigt notat oprullede den amerikanske præsidentielle rådgiver Vannevar Bush en vision for en fremtid i USA, som byggede på videnskabelige landvindinger. Det var ikke gået hen over hovedet på de amerikanske beslutningstagere, hvilken formidabel rolle den videnskabelige verden havde spillet i at vinde krigen. Først med radaren, så med kodebrydning og til sidst med atombomben.

Næste udfordring var at vinde den kolde krig, samt at sikre borgernes beskæftigelse og velstand. Til den ende satsede USA massivt på forskning. Europa, derimod, måtte magtesløst iagttage alle sine bedste folk på den videnskabelige front sætte kurs vestover.



Figur 6.1
Beliggenheden af CERN's
27 km lange accelerator-
tunnel ved Geneve.

Derfor vakte det stor lydhørhed, da en række fremtrædende europæiske fysikere opfordrede til omgående handling for at få standset flugten af talenter til USA og for at få sat turbo på europæisk forskning på det 'subatomare' område. Det krævede en hel del overtalelse at få landene i Europa til at placere nationale ressourcer under en international organisations ansvar, men det lykkedes altså med CERN i 1954.

Partikelfysik anno 1954

Det videnskabelige landskab på den subatomare skala var på det tidspunkt i rivende udvikling. Før krigen havde landskabet ellers set rimeligt stabilt ud, så lad os dvæle lidt ved dette panorama.

Partikler og kvantetal

Man havde i 30'erne accepteret, at elementære partikler, såsom elektronen og fotonen, kunne opføre sig både som partikler og bølger, alt efter hvilket spørgsmål et eksperiment stillede. Men tag ikke fejl. Det betyder ikke, at alting flyder. Alle eksperimenter giver nemlig entydige svar på spørgsmål om partiklernes såkaldte kvantetal, fx elektronens elektriske ladning på $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Faktisk kan man sige, at en partikels identitet er disse kvantetal. Et andet vigtigt kvantetal er partiklens interne angulære moment, eller spin.

Nogle elementære partikler, såsom elektronen, har spin $\frac{1}{2}$ (i enheder af Plancks konstant divideret med 2π). Sådanne partikler hedder fermioner, efter italieneren Fermi, og om dem gælder, at der kun kan være een i hver mulig kvantetilstand. Dette forklarer fx det periodiske system af atomer, altså hvorfor elektronerne arrangerer sig i skaller i et atom og ikke alle kollapser til den lavest liggende tilstand.

Andre partikler, fx fotonen, har heltalligt spin og kaldes bosoner efter inderen Bose. Disse kan i ubegrænset antal presses ind i den samme kvantetilstand, hvilket i dag udnyttes i de utallige anvendelser af laseren, der netop er en, i princippet, ubegrænset mængde af fotoner i samme kvantetilstand.

Atomernes elementarpartikler

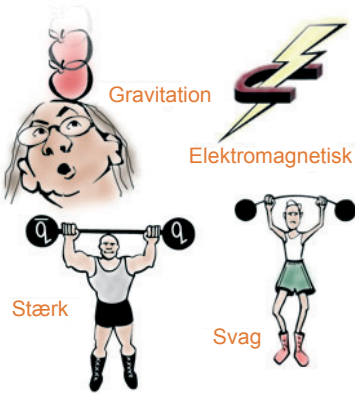
Af elementære fermioner havde man fundet protonen og neutronen som bestanddele af den lille atomkerne. Hertil kom elektronen, der arrangerer sig i en kæmpe sky omkring kernen. Størrelsesforholdet mellem kerne og elektronsky er som en halspastil til en fodboldbane, men kernen bærer alligevel næsten hele atomets masse. Denne model af materien syntes i princippet at kunne forklare alt, lige fra stjerneudvikling til livsprocesser.

Noget overraskende havde englænderen Dirac i 1928 endvidere forudsagt eksistensen af '*antistof*', en slags spejlparkler med modsat elektrisk ladning af de normale partikler. Hvis en partikel møder sin antipartikel, vil de udslette hinanden og blive til bosonstråling. Denne forudsigelse var blevet eksperimentelt bekræftet i 1932 gennem observationen af en '*antielectron*' eller positron i kosmisk stråling. Dette viste sig

imidlertid at være en meget velkommen nyskabelse, der faktisk redder kvantemekanikken fra nogle ellers absurde matematiske konsekvenser.

Kræfterne

Man havde også ved krigens afslutning nogenlunde styr på de kræfter, som påvirker partiklerne og skaber dynamikken her i verden. Fire slags kræfter kunne identificeres:



Figur 6.2
De fire naturkræfter.

Tyngdekraften, som vi vil gå let henover, da den er meget svagere end de øvrige.

Den elektromagnetiske kraft, som er proportional med partiklens elektriske ladning og fx sørger for at holde elektroner bundet til atomkernerne.

Den stærke kraft, som binder protonerne og neutronerne sammen i atomkernen.

Den svage kraft, som er ansvarlig for visse radioaktive processer, fx dem, der får solen til at skinne.

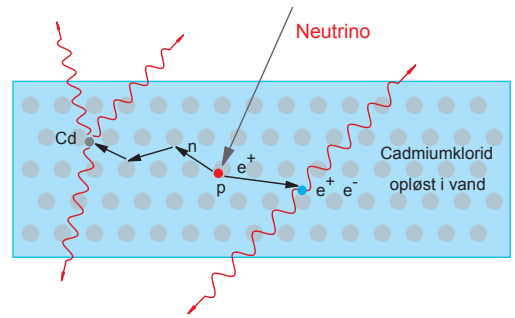
Nye partikler kommer til

Dette landskab hang faktisk nogenlunde logisk sammen. Imidlertid ændrede billedet sig i en betydeligt mere mærkværdig retning efter krigen. Der var fundet en mystisk tungere fætter til elektronen, den såkaldte *myon*, efter det græske bogstav μ . Den amerikanske fysiker Rabi spurgte med god ret: "*Hvem har bestilt myonen?*".

Lidt tidligere havde den tyske fysiker Pauli fået en endnu hårdere nød at tygge på, da det viste sig at processer, der involverede den svage kraft, tilsyneladende ikke adlød bevarelse af energi og impuls. Dette fik ham til at foreslå eksistensen af en ny spøgelsesagtigt usynlig, elektrisk neutral partikel, som Fermi døbte *neutrinoen*. Helt usynlig var den dog ikke, selvom den kun føler den svage kraft, og i 1956 blev den faktisk observeret direkte i en kæmpemæssig neutrinodetektor ved den amerikanske atomreaktor, Savannah River.

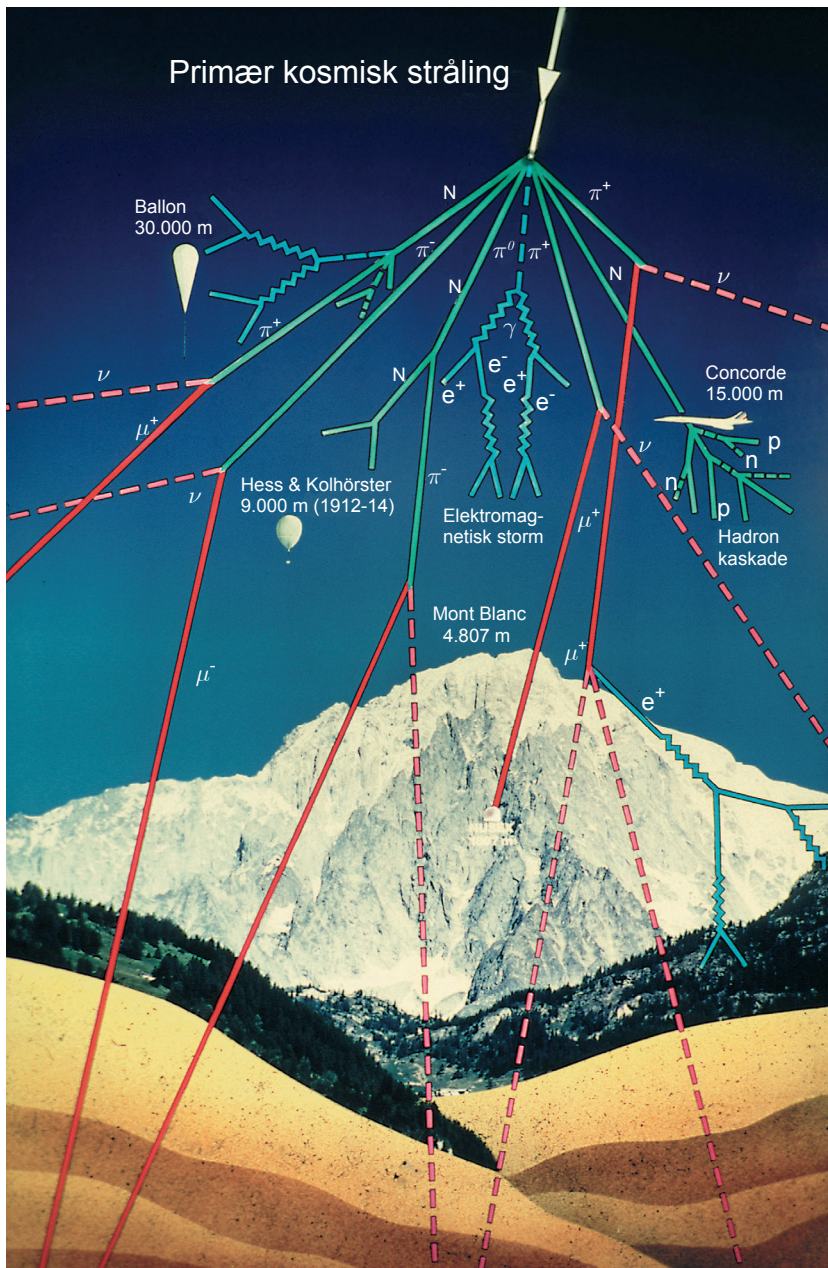
Mere forventet var opdagelsen af *pionen* i 1947, en let partikel med spin 0, der allerede i 1935 var blevet foreslået som 'formidler' af den stærke kraft, i analogi med fotonen, der formidler elektromagnetiske kræfter. Men allerede samme år blev en uventet tungere fætter til pionen opdaget, der besad et helt nyt kvantetal, som man i mangel af bedre ideer døbte *strangeness*. Disse opdagelser fandt sted i Bristol, England.

De fleste af de 'nye partikler' var blevet opdaget i kollisioner mellem *den kosmiske stråling* og atmosfærens atomer. Den kosmiske stråling består mest af protoner fra voldsomme begivenheder i Mælkevejen eller andre galakser, som ankommer til vores atmosfære med meget høje energier. Man kan imidlertid ikke lave kontrollerede eksperimenter med disse partikler, så for at komme videre måtte man på en eller anden måde *selv skabe partikelstråler* med høj energi.



Figur 6.3

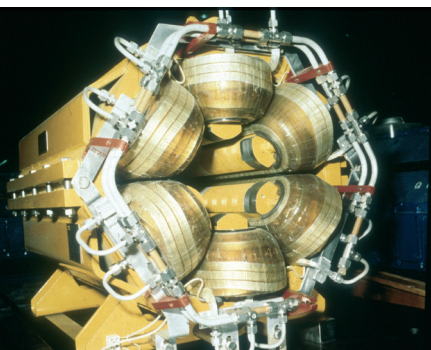
Princippet i Savannah River eksperimentet. En neutrino absorberes af en proton i en stor beholder med cadmium-klorid opløst i vand. Protonen omdannes herved til en neutron og en positron. Positronen udslettes omgående sammen med en atomar elektron, hvorved to gamma-kvanter (højenergetiske fotoner) udsendes. Efter et typisk kort tidsinterval fanges neutronen ind af en cadmium-kerne under udsendelse af mere gammastråling. Gammastrålingen registreres i et lag af flydende scintillator-materiale, der omgiver beholderen, og giver således neutrinoens 'fingeraftryk'.



Figur 6.4

Kosmiske stråler, der rammer atmosfærens øverste lag, giver anledning til en byge af partikler, mest myoner, ved jordoverfladen.

Acceleratorer



Figur 6.5
Sextupol magnet fra CERNs
LEP accelerator.

Der skal imidlertid meget høje kinetiske energier til, idet partiklernes bølgelængde er Plancks konstant divideret med deres impuls. Dette var foreslået af franskmændene de Broglie og eksperimentelt bekræftet på utallige måder. For at betragte meget små systemer, skal man bruge stråler med tilsvarende meget lille bølgelængde. Ydermere, hvis man er ude på at skabe helt nye partikler, skal man, ifølge Einstein, mindst have en kinetisk energi på $2m \cdot c^2$ til partikelproduktion, hvor m er partiklens masse. To-tallet skyldes, at for at bevare de samlede kvantetal skal den nye partikel oftest produceres sammen med sin antipartikel.

Synchrotronen

Her er det acceleratoren kommer ind. Den amerikanske fysiker D. H. Lawrence var faderen til den disciplin, som i dag hedder acceleratorfysik, dvs. kunsten at fremstille partikelstråler med meget høj energi. Hans egen opfindelse, *cyclotronen*, vil vi ikke forklare her – selv om den bruges den dag i dag, fx til at fremstille radioaktive isotoper på Risø til medicinsk diagnose og terapi på Rigshospitalet. Men hans elever, specielt Livingston, fandt på en ny type accelerator, som nu bruges til at skabe stråler med de allerhøjeste energier.

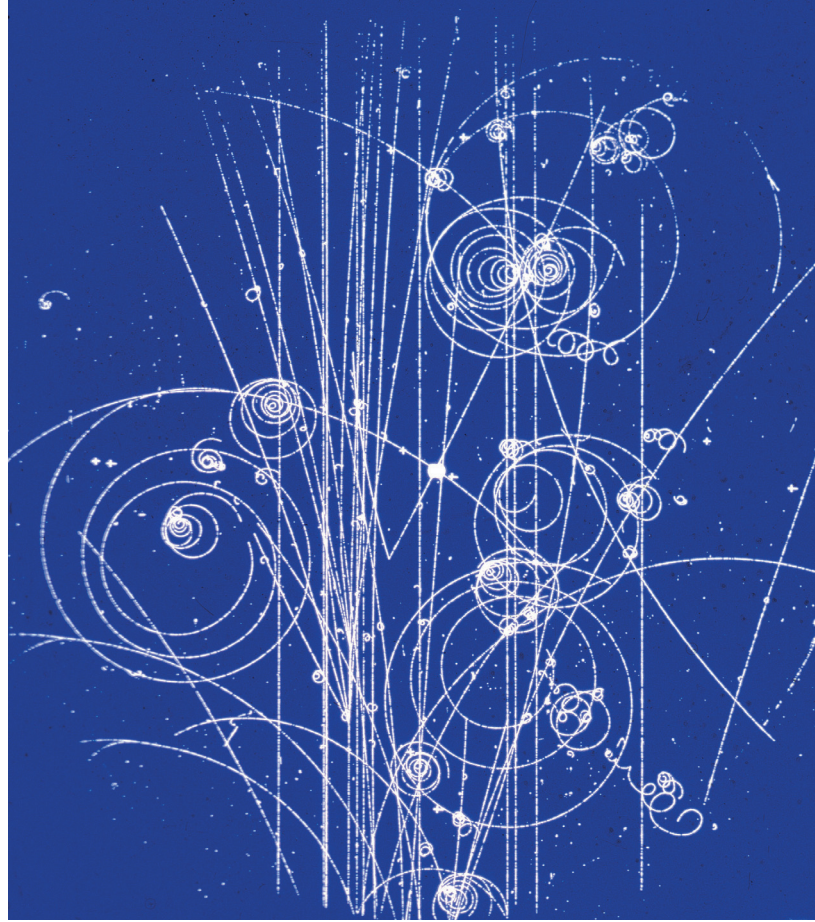
Denne accelerator hedder en *synchrotron*. Det går ud på at bruge kvadrupol- og sextupolmagneter, der virker på ladede partikler ligesom linser på optisk lys, til at holde strålen samlet i et cirkelformet vacuumrør med en tykkelse på nogle få cm. Herved var det økonomisk muligt at frembringe de *dipolmagneter*, der skal til for at fastholde strålens partikler i cirkelbevægelsen ved meget høj energi. Den cirkelformede bevægelse gør, at man kan give partiklerne en beskeden acceleration gennem et moderat spændingsfald igen og igen, så energien hele tiden vokser, indtil den når den maximale energi, som dipolmagneterne kan holde fast i vacuumrøret.

Disse principper blev brugt i CERNs første store *Proton-Synchrotron*, der blev indviet i 1960 i laboratoriet ved Geneve, lige på grænsen mellem Frankrig og Schweiz. Samme princip blev anvendt af CERNs ærkerival, Brookhaven laboratoriet på Long Island ved New York, som året efter indviede sin accelerator, der ligesom CERNs kunne accelerere protoner op til ca. 30 GeV.

Detektorer

Boblekammeret

For at lære noget om de nye partikler, som skabes ved at hamre strålen ind i et materiale, skal man ud over en accelerator også bruge et redskab til at detektere partikler og måle deres egenskaber. Det ultimative redskab kom i 60'erne i form af det såkaldte *boblekammer*. Det var et stort kammer fyldt med flydende brint, eller lignende, der blev holdt lige på kogepunktet, dog uden at koge. Når en ladet partikel passerende kammeret ville den ionisere væsken langs sin bane, og omkring ionerne dannedes små bobler. Et hurtigt fotografi kunne nu forevige alle de partikler, som var blevet skabt. Det siges, at amerikaneren Glaser fik ideen ved en aften at sidde på et studenterværtshus i Ann Arbor, Michigan, og stirre distraet ind i et glas boblende fadøl. Figuren viser et boblekammerfotografi og giver et indtryk af den grafiske skønhed af disse billeder.



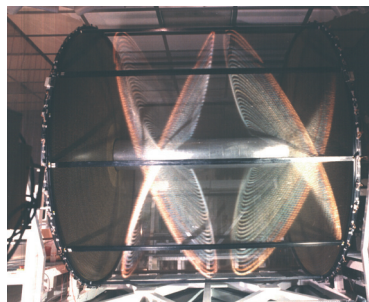
Figur 6.6

Billede af et bundt protoner, der passerer CERNs 2 m boblekammer i 1970. To af strålens protoner er kollideret med to af væskens protoner, og flere nye partikler er herved opstået. Et magnetfelt sørger for partiklernes krumning.

Multiwire kamre

Hen mod slutningen af 60'erne blev boblekamre for langsomme, idet man nu ledte efter sjældne begivenheder og kun var interesseret i at registrere sådanne. Her kom en genial opfindelse af franskmanden Charpak til undsætning. Ved at placere tusinder af ultratynde metaltråde med positiv højspænding i en gas kunne man lokalisere en ladet partikel, som passerer en tråd, og registrere den efter ønske. Opfindelsen hed *MultiWire Proportional Chambers* og fik enorm udbredelse, ikke bare i partikelfysik, men også fx i medicinsk diagnose.

Senere er opfindelsen blevet forfinet ved at erstatte metaltrådene med mikroskopiske metalstriber på en silicium chip. Herved kan partiklerne stedbestemmes endnu mere nøjagtigt, og det er muligt at integrere udlæsningselektronikken direkte på chippen, hvilket drastisk forøger antallet af striber, der kan læses ud.



Figur 6.7

Et multiwire kammer fra Frascati laboratoriet ved Rom. De lysende ringe kommer fra mere end 50.000 meget tynde tråde som er strakt gennem kammeret. Ladede partikler, som passerer kammeret, vil ionisere gas-atomerne langs deres bane, hvilket forårsager et elektrisk signal i den nærmeste tråd.

Historien om kvarkerne

Kvarkteorien

Resultaterne, der i 60'erne kom ud af boblekammerbillederne, var forbløffende. Der var tilsyneladende hundrede af nye partikler med forskellige kombinationer og forskellige hele multipla af de kendte kvantetal. Det var partikler, som er følsomme over for *den stærke kraft*, de såkaldte *hadroner* (*hadro* betyder stærk på græsk). Situationen forlangte en forklaring, idet det simpelt hen ikke var æstetisk acceptabelt at have hundrede *'elementære partikler'*. Forklaringen kom samtidigt fra østri-geren Zweig og amerikaneren Gell-Mann i 1964. Den gik ud på at alle disse hadroner faktisk var sammensatte partikler af bare tre slags *kvarker* – eller *quarks* på engelsk. Navnet skyldtes den altid altvidende Gell-Mann, som selvfølgelig kendte en passende linie i James Joyces epos *Finnegans Wake*: *“Three Quarks for Muster Mark..”*.

Kvarkerne skulle være spin $\frac{1}{2}$ *fermioner* med hver deres *elektriske ladning* og *strangeness*. Den elektriske ladning kunne være $\frac{2}{3}$ eller $-\frac{1}{3}$ af protonens ladning. Kombinationer af *tre kvarker* skulle give de såkaldte *baryoner*, såsom protonen og neutronen, alle med spin $\frac{1}{2}$, mens kombinationer af *en kvark* og *en antikvark* skulle give såkaldte *mesoner* med heltalligt spin, såsom pionen. Faktisk syntes hadronerne at gruppere sig efter nogle matematiske symmetrier, der var studeret i 1800-tallet af ren og pur matematisk interesse. Det er egentligt underligt. Men det sker ikke sjældent, at strukturer, der er blevet opfundet for matematikkens egen skyld, senere viser sig at være udvalgt af naturen.

Op igennem 60'erne kunne man imidlertid ikke rigtigt vide, om disse mønstre bare var en nyttig regneregul, eller om de foreslåede kvarker, virkelig var fysisk håndgribelige partikler. Svaret på dette spørgsmål kom i 1969.

Kvarker ses med elektronstråler

På CERN var man gået i gang med at fremstille stråler af neutrinoer. Det skete, omend uhyre sjældent, at neutrinoerne reagerede med atomkerner i fx et boblekammer. Antallet af reaktioner stemte faktisk med, at protonerne og neutronerne i kernen skulle have punktformige bestanddele. Der var dog for få reaktioner til, at det var rigtigt overbevisende.

Det overbevisende argument kom fra en 5 km lang elektron-accelerator, SLAC, bygget nær San Francisco. Her var man begyndt at skyde med 20 GeV elektroner på protoner, og i 1969 var man blevet overbevist: Elektroner blev spredt fra protonerne som fra flere uendeligt små, punktformige spred-



ningscentre. Endda centre, som bar 'tredjedelsladninger'. Det var helt tilsvarende argumenter, som tilbage i 1911 havde overbevist New Zeelænderen Rutherford om, at atomet havde næsten hele sin masse koncentreret i en lillebitte, hård kerne. Nu havde man bare projektiler med endnu mindre bølgelængde og kunne så konstatere et nyt lag i 'Pandoras æske', nemlig kvarkerne. Disse synes til dato at være den 'inderste æske'.

Supersynchrotroner og kolliderende stråler

På acceleratorfronten måtte man nu til at tage det næste trin på energistigen. Det blev gjort på to måder. Den første var simpelthen at bygge en større version af de eksisterende accelerators. På CERN kom den til at hedde *Super Proton Synchrotronen*, eller bare SPS, og den kunne accelerere protoner op til 400 GeV. På det nye laboratorium, *Fermilab*, som blev bygget syd for Chicago, blev der bygget en tilsvarende accelerator. I begge tilfælde ville man skyde strålen ind i et stillestående materiale, et såkaldt *fixed target*.

Den anden måde var mere original. Her gik det ud på at have *to stråler, der kolliderede mod hinanden*. Ulemperne herved var nemme at få øje på. Man skulle i almindelighed bruge to vacuumrør. Hertil kom, at man kun kan koncentrere om-

Figur 6.8

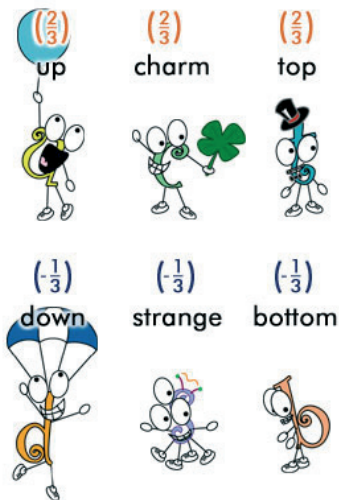
Den 5 km lange SLAC accelerator ved Stanford, Californien. Øverst ses en kvadropol-magnet. Ved at skyde elektroner fra denne accelerator ind i protoner, så man for første gang en 'grynet struktur' i protonen.

kring 10^{12} partikler i en stråle, mens et gram *fixed target* som bekendt indeholder i omegnen af 10^{23} atomkerner. Godt nok kan man genbruge de kolliderende stråler i cirkelbevægelsen mange gange, men alligevel. På den anden side var den energimæssige gevinst enorm. Med et *fixed target* bruges det meste af strålens energi til at bevare impulsen, og der er tilsvarende mindre til rådighed for skabelse af nye partikler. Energien til rådighed for partikelskabelse hedder *centre-of-momentum* energien, energien i et koordinatsystem hvori den samlede impuls er nul. Man kan let vise, at i et *fixed target* eksperiment vokser denne energi kun med kvadratroden af stråleenergien. I et eksperiment med *kolliderende stråler* er det derimod *hele* stråleenergien, der er til rådighed.

Figur 6.9
Princippet i et eksperiment med kolliderende stråler. Energien i centre-of-momentum systemet bliver umådeligt meget højere, end hvis en enkelt stråle skydes ind i et stillestående materiale.



Denne ide blev ført ud i livet ved SLAC, hvor man kolliderede elektroner og positroner med op til 4 GeV, og ved CERN, hvor man kolliderede protoner med hver 30 GeV i de såkaldte *Intersecting Storage Rings (ISR)*. Desværre for CERN, kom ISR lige en postgang for sent til den næste store opdagelse i kvarkernes verden.



Figur 6.10
De seks kvarker og deres elektriske ladning i enheder af protonens ladning.

Charm, bottom og top kvarkerne

Denne opdagelse kom i november 1974 samtidigt fra SLAC og Brookhaven og er lidt romantisk omtalt som *'november-revolutionen'*. Det drejede sig om en tung meson med helt usædvanlige egenskaber, der kun kunne forklares som en bunden tilstand af en helt ny slags kvark og dens antikvark. Den nye kvark bar et nyt kvantetal, der døbt *charm*, og havde iøvrigt en forbavsende stor masse på $1,6 \text{ GeV}/c^2$. Dette gjorde det let at beregne egenskaberne af de bundne tilstande. De stemte med observationerne, og betegnelsen *'revolution'* skyldtes, at nu var kvarkernes fysiske realitet helt uden for diskussion.

Senere i århundredet kom opdagelsen af de foreløbigt sidste kvarker, *bottom* i 1977 med en masse på $5 \text{ GeV}/c^2$ og *top* i 1994 med en svimlende masse på $176 \text{ GeV}/c^2$, dvs 180 gange protonens masse. Begge to blev opdaget ved Fermilab – den sidste efter at acceleratoren var omdannet til en maskine, der kolliderer protoner med antiprotoner ved en samlet energi på næsten 2 TeV.

De tre familier

Vi har nu seks kvarker: De oprindelige to som opbygger protonen og neutronen, kaldet *up* (ladning +2/3) og *down* (ladning -1/3), dernæst *charm* (ladning +2/3) og *strange* (ladning -1/3) og til sidst *top* (ladning +2/3) og *bottom* (ladning -1/3). De falder således i *tre familier med en dublet i hver*. Slægtskabet mellem de to kvarker i hver dublet med forskellig elektrisk ladning cementeres af, at *den svage kraft* kan lave den ene kvark om til den anden, men kun *inden for en dublet* – med små undtagelser, som vi skal se.

Den eneste kvarkkombination, som er absolut stabil, er protonen. Det har man blandt andet konstateret ved forgæves at lede efter protonhenfald i tusinder af tons meget rent vand placeret i dybe mineskakter. Konklusionen er, at protonens levetid må være større end en milliard milliard gange Universets foreløbige levetid. Alle andre elementære partikler (elektronen og neutrinoen undtaget) vil før eller senere henfalde til lettere partikler under indflydelse af den svage kraft.

Historien om leptonerne

Med til historien hører også de såkaldte *leptoner*, partikler som *ikke føler den stærke kraft*. Det viste sig, at også disse falder i *tre familier med hver en negativt ladet og en elektrisk neutral partikel*. Leptonerne grupperer sig altså parallelt med kvarkfamilierne, og ligesom kvarkerne har de alle spin 1/2.

Den første kendte lepton var *elektronen*. Så kom *elektronneutrinoen* til, der er elektrisk neutral og derfor kun føler den svage kraft. Dernæst *myonen*, den 200 gange tungere fætter til elektronen. Det viste sig i 1960'erne, at der også er en særlig *myonneutrino* knyttet til myonerne.

I 1977 blev den tredje og foreløbigt sidste elektrisk ladede lepton opdaget, *tau-leptonen* som er 3.400 gange tungere end elektronen. Også den har en særlig *tauneutrino* tilknyttet, se figur 6.11. Samtlige leptoner (elektronen undtaget) blev eksperimentelt opdaget for første gang ved amerikanske laboratorier.

Figur 6.11

Til hver lepton-art (elektron, myon og tau) er der knyttet et bevaret kvantetal, illustreret her ved myonens henfald til en elektron og to neutrinoer. Hver lepton-art har sin egen neutrino. Et tau-henfald kan forløbe helt tilsvarende, blot starter vi så i stedet med et 'tau-tal' på 1 og får en tau-neutrino ud.

	myon	myon-neutrino	elektron	elektron-antineutrino
Reaktion	μ	$\rightarrow \nu_{\mu}$	$+ e^{-}$	$+ \bar{\nu}_e$
Kvantetal				
elektron	0	= 0	+ 1	+ -1
myon	1	= 1	+ 0	+ 0
tau	0	= 0	+ 0	+ 0

Historien om bosonerne

Historien om de tre familier af spin $\frac{1}{2}$ *fermioner*, dvs kvarkerne og leptonerne, synes at tegne et billede af total amerikansk sejr i den faglige rivalisering mellem CERN og de amerikanske laboratorier i det 20. århundrede. Men det er et forkert billede. For vi har glemt *bosonerne*. Mens fermionerne udgør bestanddelene af alt *materie*, så er det bosonerne, der sørger for alle *kræfter* mellem materiens bestanddele. På dette område var der dømt europæisk triumf.



Figur 6.12
Der var ikke et øje tørt på CERN, da Nobelprisen tildeltes Carlo Rubbia og Simon van der Meer for opdagelsen af W og Z bosonerne.

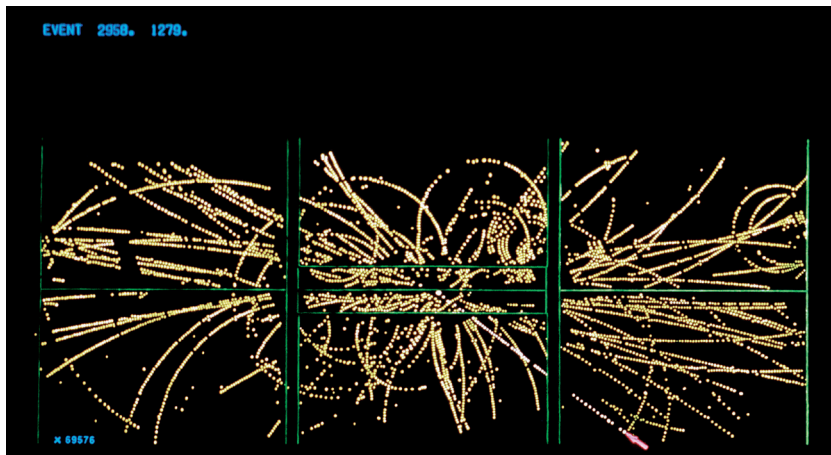
Neutrale strømme

Omkring 1970 havde en række teoretikere foreslået en model, der forenede den svage og den elektromagnetiske kraft til én *elektrosvag kraft*. Som en konsekvens heraf skulle den svage kraft ikke alene kunne transformere en kvark eller en lepton til sin partner inden for samme dublet, men *også* sprede partiklerne elastisk uden at ændre deres identitet, ligesom spredning af to billiardkugler. Man beskrev alle kræfter som *udveksling af bosoner*. Den kendte svage kraft skyldtes udveksling af en ladet boson, W^+ eller W^- . En sådan udveksling ville fx ændre en kvark med ladning $+2/3$ til partneren med ladning $-1/3$, eller ændre en neutrino med ladning 0 til en lepton med ladning -1 . Det nye i forudsigelsen var imidlertid, at der *også* skulle være en elektrisk neutral boson, Z^0 , der kunne udveksles mellem elementarpartiklerne, således at fx en indkommende neutrino kunne nøjes med at ændre retning og energi, men fortsat være en neutrino. Efter mange års møjsommeligt arbejde med enorme mængder af boblekammerbilleder, kunne CERN endelig i 1973 annocere at man havde fundet disse såkaldte '*neutrale strømme*'.

Opdagelse af W og Z bosonerne

Spredning af partikler er imidlertid et noget indirekte bevis. Hvem ved med sikkerhed om en elastisk spredning virkeligt skyldes udveksling af den og den boson? Man var nødt til at se bosonerne direkte som håndgribelige partikler. Der var bare det lille problem, at W^{+-} og Z^0 bosonen er meget tunge og krævede mere energi end nogen accelerator kunne præstere for at producere dem som frie partikler.

Her kom en ide fra CERN-fysikerne Van der Meer og Rubbia til hjælp, hvorved *antiprotoner* kunne opsamles og lagres i en stråle med tilstrækkelig intensitet til at den kunne bruges til kollisioner med andre stråler. Det geniale ved ideen var, at man kunne bruge Super Proton Synchrotronens (SPS) strålerør til at accelerere antiprotonstrålen og protonstrålen *samtidigt*, blot de løb hver deres vej i ringen. De to stråler kunne så bringes til kollision på steder, hvor der var placeret



Figur 6.13
En af de første observerede W bosoner ved CERN's SPS. Vi har at gøre med en W^- , der henfalder til en meget energirig elektron (det lyse spor) og en rekyclerende neutrino, som apparatet ikke registrerer.

eksperimentelle apparater til at måle de partikler, som blev produceret i kollisionerne. Man havde med andre ord omskabt en *fixed-target* maskine til en *kolliderende-stråle* maskine, hvorved energien i *centre-of-momentum* systemet steg med mere end en faktor ti.

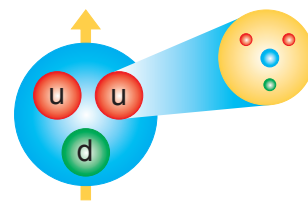
Dette var rigelig energi til, at W^{+-} og Z^0 bosonerne endeligt kunne produceres og identificeres i fri tilstand, se figur 6.13, og til at CERN triumferende kunne annoncere deres opdagelse i 1983, se figur 6.12.

Farvernes dynamik

Samtidigt med at den *elektrosvage teori* blev bakket op af de eksperimentelle observationer, skete det tilsvarende med en ny teori for *den stærke kraft*.

I denne teori, kaldet *Quantum Chromodynamics* eller bare QCD, findes hver kvark i *tre farver*. Disse 'farver' spiller samme rolle i QCD som den elektriske ladning spiller i elektromagnetismen. De elektromagnetiske kræfter fremkommer gennem udveksling af masseløse, spin 1 *fotoner* imellem partikler med elektrisk ladning. Tilsvarende fremkommer de stærke kræfter i QCD gennem udveksling af masseløse, spin 1 *gluoner* imellem partikler med 'farve'. Der er dog den store forskel fra elektromagnetismen, at gluonerne *selv bærer farve*, i modsætning til de elektrisk neutrale fotoner. En konsekvens af dette er, at kvarker og gluoner aldrig kan komme ud som frie partikler fra deres hadroniske fængsler, hvori de er bestanddele.

Men man kan alligevel 'se' disse kvarker og gluoner. For hvis de får et kraftigt spark i en eller anden retning vil de optræde som en *jet*, et sprøjt af hadroner, der alle flyver i sparkets retning, se figur 6.15. Dette blev nogenlunde samtidigt observeret i 80'erne ved CERN og ved DESY, et højenergilaborato-



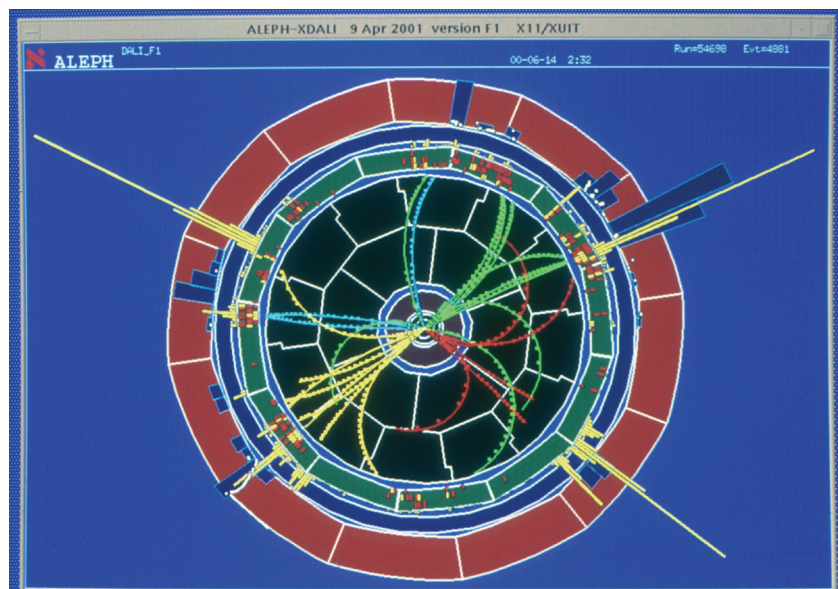
Figur 6.14
Den stærke kraft, der holder kvarkerne fast i hadronerne, skyldes en slags ladning, der kommer i tre varianter og kaldes farve. Gluonerne, som formidler den stærke kraft har også farve. Det bevirker, at man aldrig kan slå en kvark ud af fx en proton (som i billedet) til fri tilstand. Jo mere man slår til en kvark eller gluon, jo flere kvarker og gluoner vil der bare blive skabt.

rium ved Hamburg. Ved DESY havde man den fordel at man kunne identificere *jetter fra gluoner*, og hermed var gluonen opdaget.

Kombinationen af den elektrosvage teori og QCD var nu så veletableret at den gik under navnet *Standardmodellen*.

LEP's æra

Ved indgangen til 90'erne havde man således en rimeligt eksperimentelt velunderbygget teori for alle kendte partikler og kræfter (undtagen gravitation). Men erfaringsmæssigt ligger djævelen gemt i detaljen, så der var et behov for en virkeligt nærgående kvantitativ afprøvning af teoriens detaljer. Til dette formål havde CERN i løbet af 80'erne bygget en gigantisk underjordisk acceleratorring med en omkreds på 27 km med navnet *Large Elektron-Positron collider*, eller bare LEP. Som navnet angiver, producerede acceleratoren kolliderende stråler af elektroner og positroner. Den samlede energi svarede til at begynde med netop til Z^0 -massen, hvorved Z^0 'er kunne produceres i millionvis og deres efterfølgende henfald til andre partikler studeres nøje.



Figur 6.15

En kollision mellem en elektron og en positron ved CERN's LEP accelerator (ALEPH-eksperimentet). Det ses, at partiklerne kommer ud i 'sprøjt' – jets på engelsk. I dette tilfælde skyldes det fire kvarker, der er blevet skabt og starter med at storme væk fra hverandre. De kommer aldrig rigtigt fri, men kan dog 'ses' som fire jets.

Igennem 90'erne præsterede LEP en omhyggelig opmåling af Standardmodellens parametre og udsatte modellen for et veritabelt tredjegradsforhør. Teorien bestod med glans, og måleresultaterne fra LEP vil stå som teoriens pejlemærker i lang tid fremover.

For eksempel blev Z^0 bosonens masse målt med en præcision på 0,002 %. For at nå dette flotte resultat måtte selv de mindste effekter, som kunne tænkes at påvirke målingen, tages

i betragtning. Det inkluderede detaljer som fx Månens tidevandskræfter på undergrunden omkring Geneve og en lille lækstrøm fra TGV-toget til Paris, som lige kunne finde på at tage en tur rundt i det underjordiske vacuumrør.

Familierne blandes

Som nævnt er der små undtagelser fra reglen om, at W^+ -udveksling mellem kvarker fører til, at kvarkerne altid skifter position *inden for samme dublet*. Det betyder, at de tilstande, som W^{+-} udsendelse eller absorption skifter imellem, har en lille iblanding af kvarker fra de andre familier. Den mest overraskende blandt de mange observationer fra slutningen af 90'erne var, at neutrinoerne har det på samme måde. En elektronneutrino kan rejse millioner af kilometer gennem rummet og så pludseligt finde på at manifestere sig som en myonneutrino. Det var meget overraskende, fordi neutrinoer indtil da var betragtet som masseløse, og det er kun partikler med masse som teoretisk kan skifte identitet på den måde.

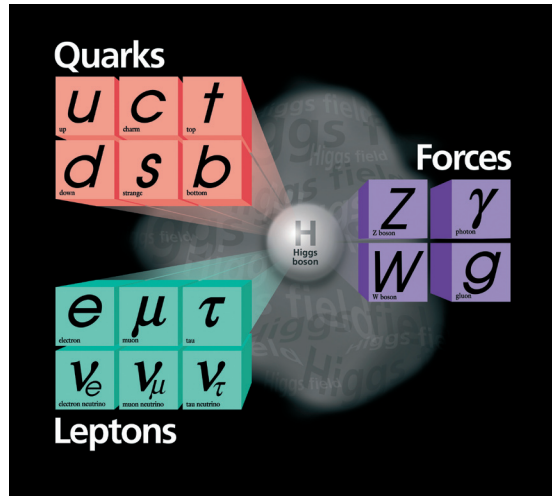
Denne fascinerende historie starter faktisk allerede sidst i 60'erne, hvor amerikaneren Davis begynder at lede efter neutrinoer fra Solen. Fusionsprocesserne fra Solen skulle sende milliarder af neutrinoer gennem hver kvadratcentimeter hvert sekund. De reagerer dog uhyre sjældent med jordisk stof. For at finde dem alligevel, fyldte Davis et kæmpe kar med en kloropløsning dybt nede i en mine, hvor kun neutrinoer kunne trænge ned. Opløsningen blev analyseret så fintfølede, at det kunne konstateres hvis blot en enkelt (!) klorkerne reagerede med en neutrino. Resultatet efter årtiers målinger var, at der var alt for få (elektron)neutrinoer fra Solen. Spørgsmålet var nu, om det var vores solmodels skyld eller neutrinoernes skyld.

Efter mange målinger ved nye '*neutrino teleskoper*' i Japan, Canada og Italien stod svaret klart omkring år 2000: Solen er OK, men de tre neutrinotyper har hver deres ganske lille masse og '*blandes*' af de svage kræfter.

Løse ender

Standardmodellen var en utrolig bedrift fra det 20. århundrede. Her var en enkel, sammenhængende teori, som i princippet kunne forklare alle fysiske fænomener i laboratoriet. Men fysikerne er alligevel ikke tilfredse. Dels er der stadigvæk en ingrediens, som ikke er eksperimentelt bekræftet, og dels mange '*løse ender*':

Figur 6.16
Standardmodellens elementære partikelindhold. Den forklarer i princippet alle fysiske observationer foretaget i jordiske laboratorier til dato. Men der er en ubekræftet ingrediens – *Higgs feltet H* – som Leon Lederman, Nobelpristager og laboratoriedirektør, i en bogtitel gav betegnelsen *'the God particle'*.



- Standardmodellen bygger på en symmetri, som umiddelbart forlanger, at alle teoriens bosoner skal være masseløse. Denne regel brydes markant af W og Z bosonerne store masser på hhv. 80 og 90 GeV/c^2 . I teorien forklares dette ved at appellere til *vacuumet*, det tomme rum, som her ikke er helt tomt, men besidder en egenskab som *'spontan'* bryder symmetrien. Lignende fænomener kendes fra spontan krystallisering og magnetisering i faste stoffer. Denne egenskab kaldes *Higgs-feltet*, efter en skotsk, teoretisk fysiker, og den gøres ansvarlig for alle partiklernes masser.

Higgs-feltet udøver *modstand mod acceleration* i det tomme rum, i større eller mindre grad, alt efter hvilken partikel man prøver at accelerere. Hvis denne hypotese er sand, så skulle den manifestere sig i eksistensen af en spin 0 *Higgs-partikel*, og ifølge Standardmodellen og LEPs og Fermilabs præcisionsmålinger skulle massen ligge et sted imellem 114 og 160 GeV/c^2 . Ingen accelerator har til dato kunnet afgøre, om dette er tilfældet eller ej. Dette er den ubekræftede ingrediens.

- Der er for mange tal i Standardmodellen, som simpelt hen er givet af Skaberen uden nogen forklaring. Eksempler er alle de forskellige partikelmasser og deres *'blandings-forhold'* i koblingerne til den svage kraft. Et andet eksempel er de tre familier. Hvorfor netop tre?
- Gravitationen er ikke beskrevet i teorien. Hvorfor er den så meget svagere end de andre kræfter? Hvorfor er der i det hele taget så mange forskellige kræfter med forskellig styrke?
- Analyse af astrofysiske data peger entydigt på, at over 90 % af Universets energi er koncentreret i partikler og kræfter, som ligger uden for Standardmodellen.

For bringe disse problemer nærmere til deres løsning er der ingen anden vej, end at rykke energifronten i acceleratorteknologien endnu et stort skridt opad.

LHC – det næste skridt

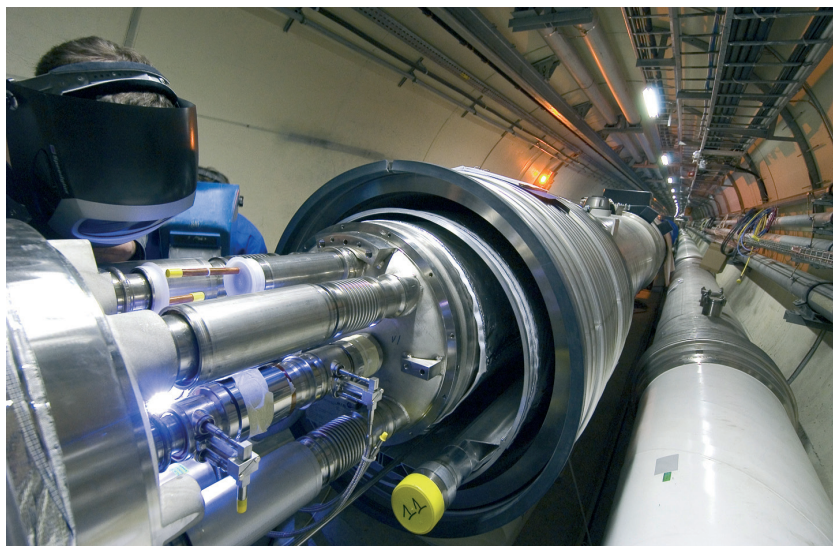
Alt imens LEP tog data i 90'erne, forberedte CERN sit næste skridt. Her skulle magneterne i den underjordiske LEP-tunnel udskiftes med nye superledende magneter, der kunne holde to protonstråler cirkulerende i ringen med en energi på hver 7 TeV.

Der blev designet specielle 'to-i-en' magneter, hvor magnetfeltet går op ved det ene strålerør og ned ved det andet. Vindingerne er lavet af en niobium-tin legering, og det hele er nedkølet til under heliums kogepunkt på 4,8 grader Kelvin, hvorved vindingerne bliver superledende. Det er faktisk verdens største køleskab. Herved opnås en tilstrækkelig magnetfeltstyrke til at holde de to protonstråler cirkulerende hver sin vej med en energi på 7 TeV.

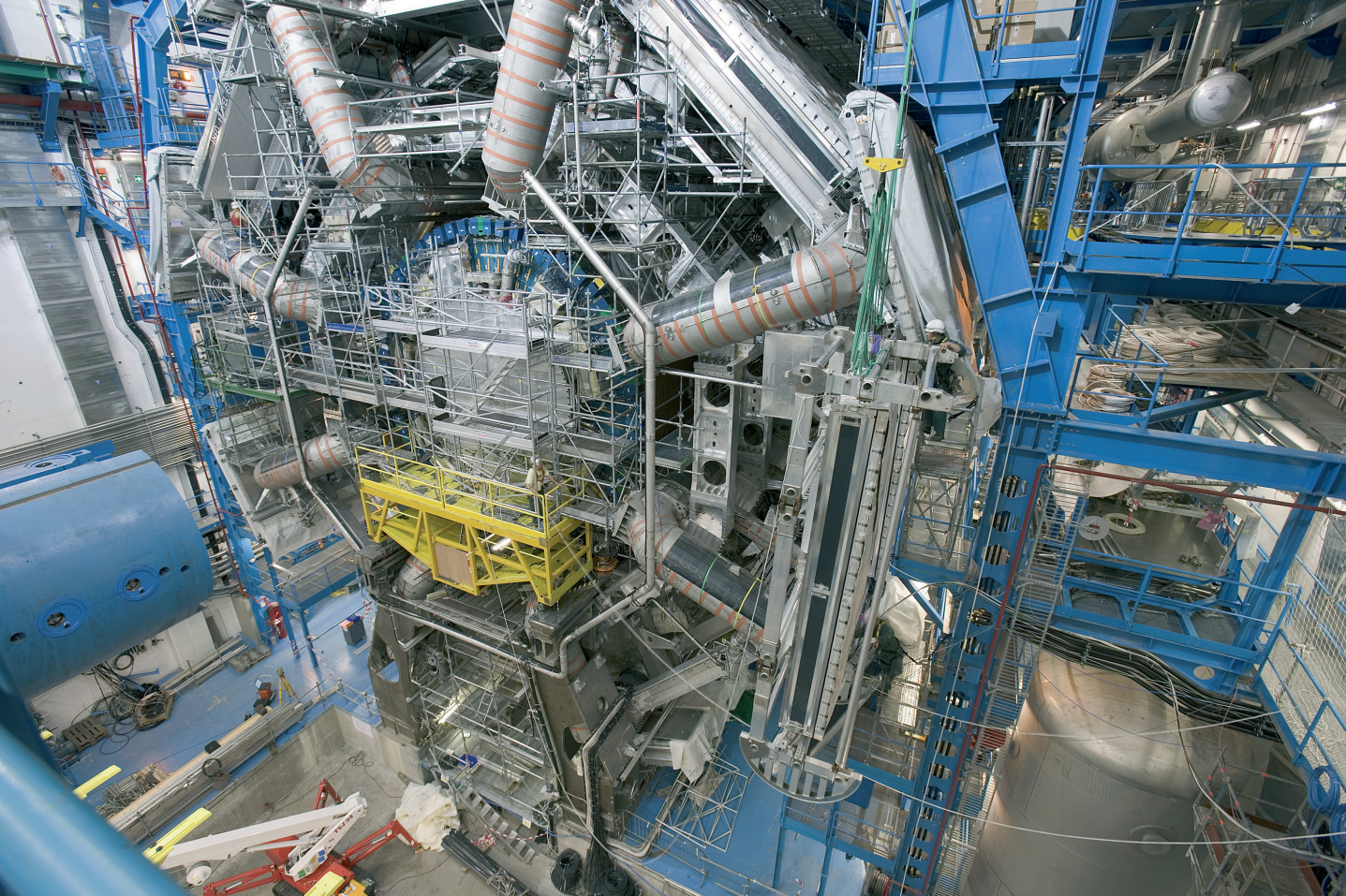
I fire punkter på den 27 km lange ring bringes de to protonstråler til kollision. Her er der placeret fire eksperimenter med udstyr til at måle de meget energirige partikler, som vil komme ud af kollisionerne. Den høje energi betyder, at apparaturet skal være meget stort. Det største eksperiment hedder ATLAS og har dimensioner af Rundetårn på alle tre led. Dette er nødvendigt for at kunne afbøje de ladede partikler tilstrækkeligt i eksperimentets magneter til at kunne måle denne afbøjning og dermed partiklernes impuls. Det kæmpe volumen er fyldt med millioner af sensorer til at måle alle



Figur 6.17 Standardmodellen, som illustreres af plancherne i baggrunden, forklarer utroligt mange ting om vores materie. Men den forklarer faktisk kun 10% af den energi og masse, som må være til stede i Universet.



Figur 6.18 Arbejde på en af LHC acceleratorens 2.000 superledende magneter. I det fjerne kan man svagt skimte den cirkulære accelerators krumning.



Figur 6.19
Samling af det gigantiske
ATLAS-eksperiment i som-
meren 2006.

partikler, specielt elektroner, myoner og 'jetter'. Ved brug af impulsbevarelsen kan man faktisk også 'se' højenergetiske partikler, som overhovedet ikke vekselvirker med apparatet. Deres impuls sættes simpelthen til at være den 'manglende impuls'.

De første protonkollisioner ved LHC med 7 TeV pr. stråle finder sted i sommeren 2008. Forhåbentligt vil nogle af mysterierne så finde svar – det er næsten garanteret, at det vil ske – men det er samtidig også sandsynligt, at det nye energiregime vil rejse nye spørgsmål, hvis svar vil kræve endnu mere potente acceleratorer og eksperimenter i fremtiden.

Vi står i dag i en situationen, der minder om, da partikelevenytret startede med J. J. Thomsons opdagelse af elektronen i 1895 med et *katodestrålerør*. Det blev senere til et billedrør i TV og computere, men gav samtidig anledning til en række helt nye spørgsmål, der medførte en total revolution i forståelsen af stoffets struktur og hermed af vores hverdag. Ved indgangen til det 21. århundrede er situationen meget lignende, på trods af den svimlende indsigt, der er blevet opnået i det mellemliggende århundrede.