

# 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, d.v.s. energien der opnås af en proton ved acceleration gennem et spændingsfald på 7 tusind milliarder (Tera) 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 fremgangsrige, hvilket bl.a. fremgår 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 kode-brydning 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.

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.



**Figur 1.** Beliggenheden af CERNs 27 km lange accelerator tunnel ved Geneve (CERN).

## 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 30'ernes 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*, f.eks. 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  $2\pi$ ). Sådanne partikler hedder *fermioner*, efter italieneren Fermi, og om dem gælder, at der kun kan være een i hver mulig *kvantetilstand*. Dette forklarer f.eks. det periodiske system af atomer, altså hvorfor elektronerne arrangerer sig i skaller i et atom og ikke alle kolliderer til den lavest liggende tilstand.

Andre partikler, f.eks. 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 arrangerede sig i en kæmpe sky omkring kernen. Størrelsesforholdet mellem kerne og elektronsky er som en halvspad 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.

### Antistof

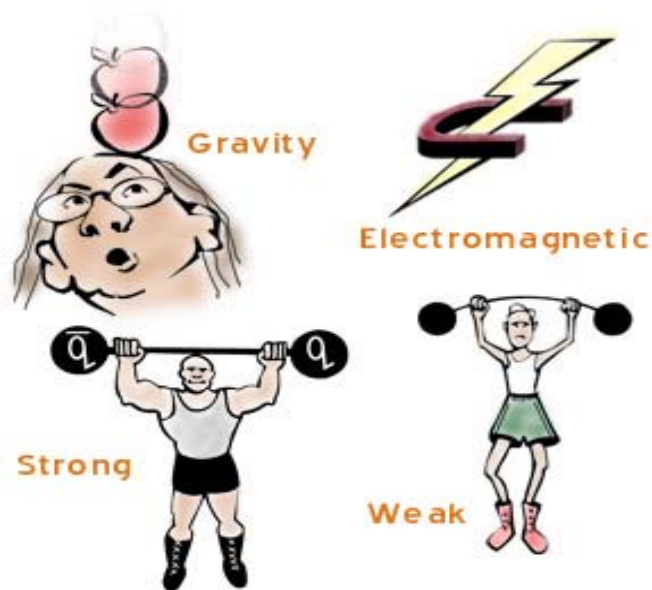
Noget overraskende havde englænderen Dirac i 1928 endvidere forudsagt eksistensen af "antistof", en slags spejl-partikler med modsat elektrisk ladning af de normale partikler. Hvis en partikel møder sin antipartikel, vil de udslette hinanden og blive til boson-stråling. Denne forudsigelse var blevet eksperimentelt bekræftet i 1932 gennem observationen af en "anti-elektron" eller *positron* i kosmisk stråling. Hvor overraskende det end var, så viste det sig 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:

- *Tyngdekraften*, som vi vil gå let henover, da den er meget svagere end de øvrige.
- *Den elektro-magnetiske kraft*, som er proportional med partiklens elektriske ladning og f.eks. sørger for at holde elektroner bundet til atomkernerne.
- *Den stærke kraft*, som binder protonerne og neutronerne sammen i atomkernen.
- *Den svage kraft*, som f.eks. de radioaktive processer, der får solen til at skinne.

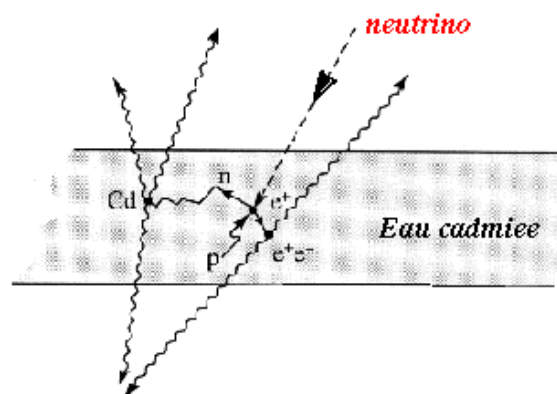
**Figur 2.** De fire naturkræfter. (Particle Data Group, LBL)



### 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  $\mu$ . Den prominente tyske fysiker Pauli spurgte med god ret: “ Hvem har bestilt myonen? “.

Pauli havde tidligere 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 han 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 neutrino-detektor ved den amerikanske atomreaktor, Savannah River.



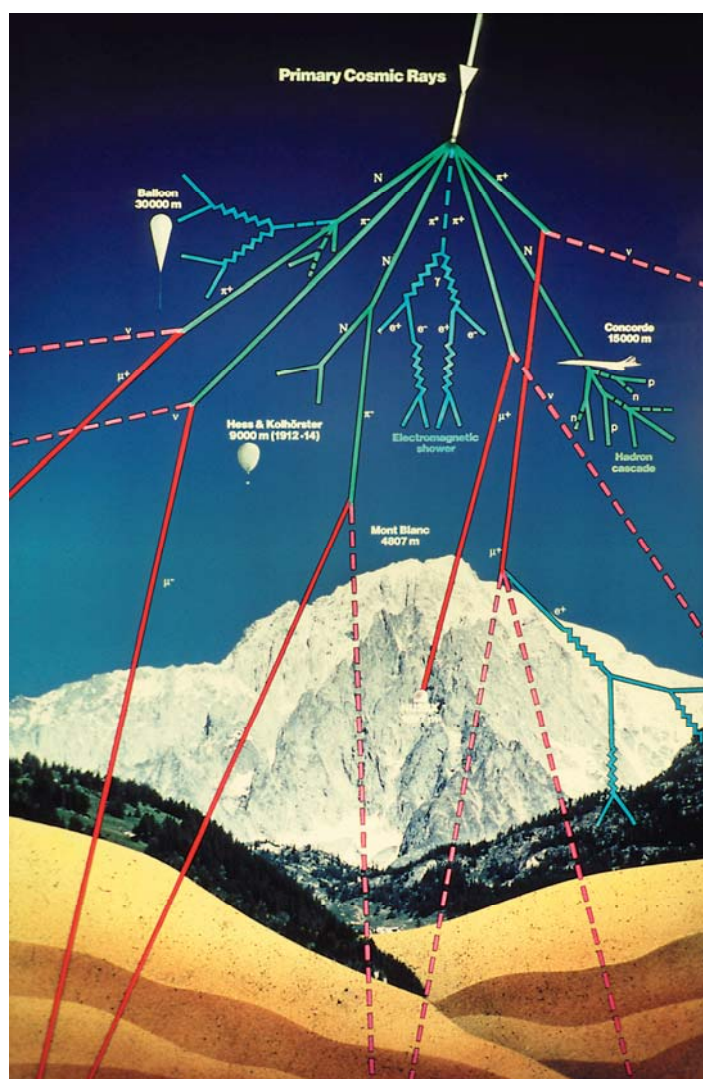
**Figur 3.** Princippet i Savannah River experimentet. En neutrino absorberes af en proton i en stor beholder med cadmium-klorid opløst i vand. Protonen omdannes herved om til en neutron og en positron. Positronen udslettes omgående sammen med

en atomar elektron hvorved to gamma-kanter (højenergetiske fotoner) udsendes. Efter et typisk kort tidsinterval fanges neutronen ind af en cadmium-kerne under udsendelse af mere gamma stråling. Gamma strålingen registreres i et lag af flydende scintillator-materiale, der omgiver beholderen, og giver således neutrinoens “fingeraftryk”. (LAPP Annecy)

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.

### Kosmisk stråling

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

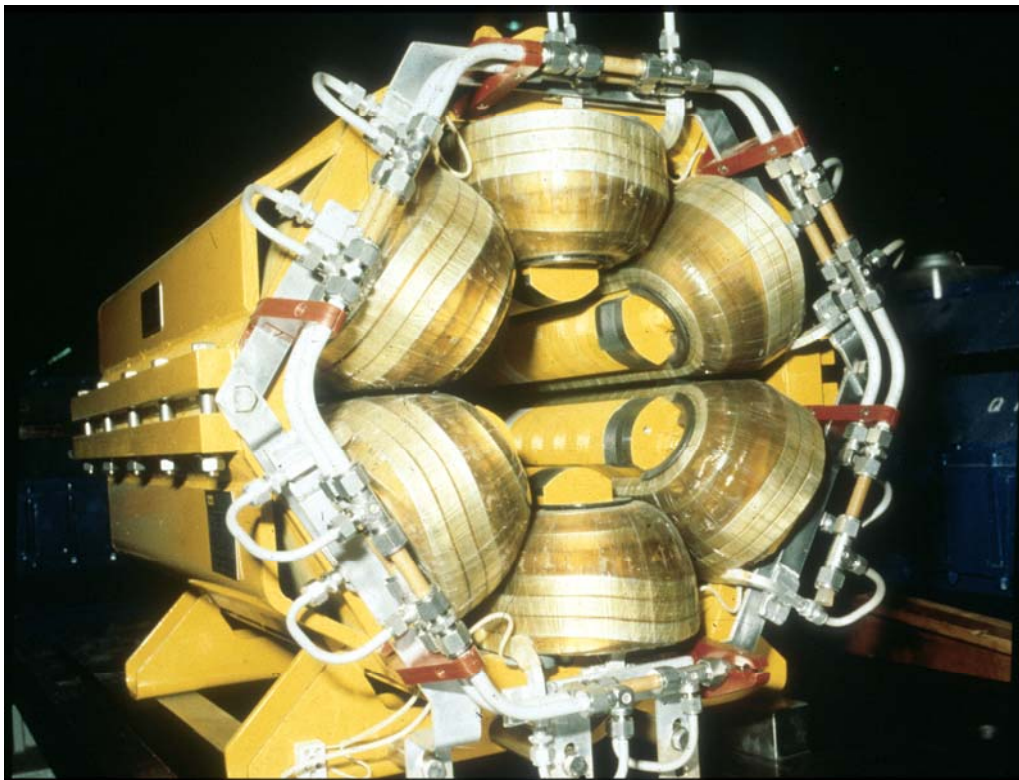
## Acceleratorer

Der skal imidlertid meget høje kinetiske energier til, idet partiklernes bølgelængde er Plancks konstant divideret med deres impuls (dette var foreslået af franskmændene Broglie og eksperimentelt bekræftet på utallige måder), og 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  $2mc^2$  til partikelproduktionen, hvor  $m$  er partiklens masse og  $c$  lysets hastighed (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, f.eks 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 aller-højeste energier.

Denne accelerator hedder en *synchrotron*. Det går ud på at bruge *kvadrupol-* og *sextupol-*magneter, 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 *dipol-magneter*, der skal til for at fastholde strålens partikler i cirkelbevægelsen ved meget høj energi. Den cirkelformede bevægelse gør, at man kan give partiklerne en beskedent acceleration gennem et moderat spændingsfald igen og igen, så energien hele tiden vokser, indtil den når den maximale energi, som dipol-magneterne kan holde fast i vacuumrøret.



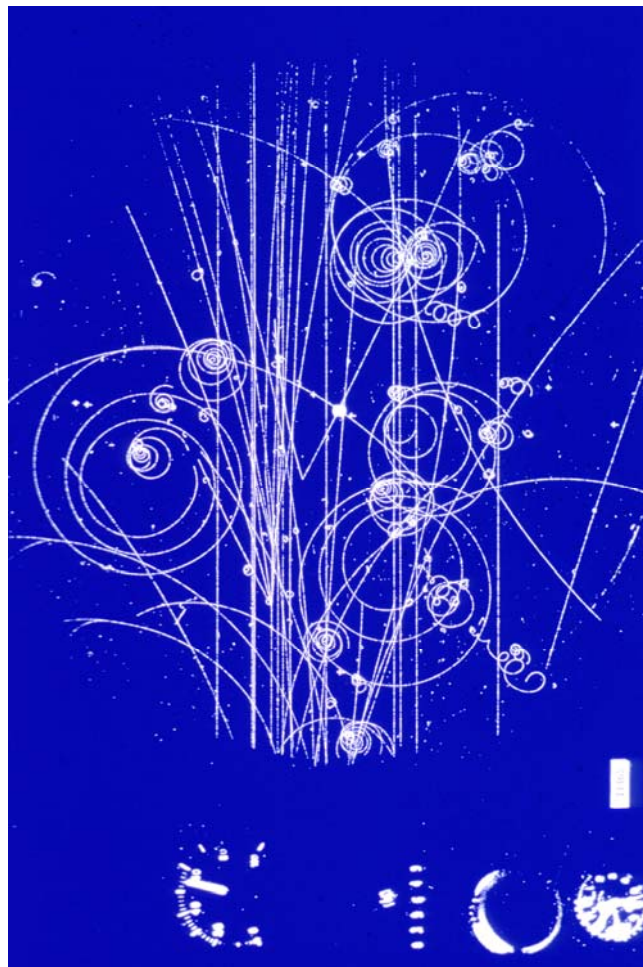
**Figur 5.** Sextupol magnet fra CERN LEP accelerator . (CERN ).

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 (30 Giga elektron-Volt, hvor en elektron-Volt er den energi, som en elektron eller proton tilføres af et spændingsfald på 1V).

## Detektorer

### Boblekammeret

For at lære noget om de nye partikler, som skabes ved at hamre en stråle ind i et materiale, skal man 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 passerede 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 studenter-værtshus i Ann Arbor, Michigan, og stirre distræt ind i et glas boblende fadøl. Figur 6 viser et boblekammer fotografi og giver et indtryk af den grafiske skønhed af disse billeder.

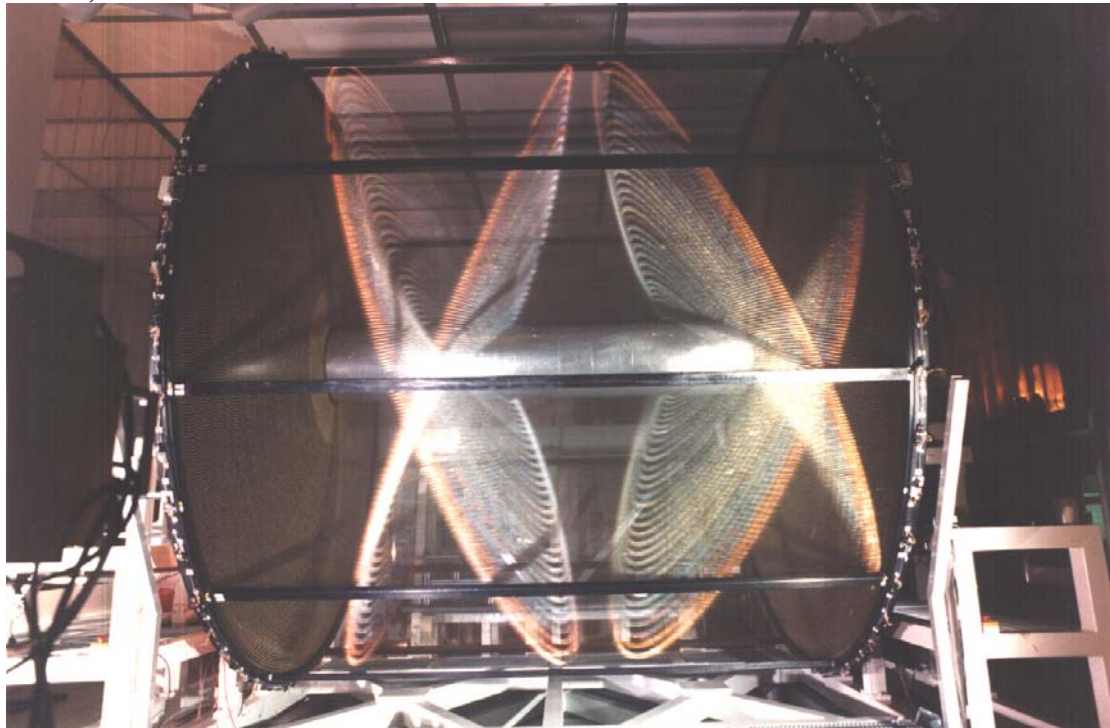


**Figur 6.** Billede af et bundt protoner, der passerer CERNs 2m boblekammer i 1970. To af strålens protoner har kollideret med to af væskens protoner og flere nye partikler er herved opstået. Et magnetfelt sørger for partiklernes krumning. (CERN).

### Multiwire kamre

Hen mod slutningen af 60'erne blev boblekamre for langsomme, idet man nu var interesseret i sjældne begivenheder og ikke kunne gennemse tusinder af fotografier for at finde eet interessant. Her kom en genial opfindelse af franskmændene 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 målingerne efter ønske. Opfindelsen hed *MultiWire Proportional Chambers* og fik enorm udbredelse, ikke bare i partikelfysik, men også f.eks i medicinsk diagnose.

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



**Figur 7.** Et multiwire kammer fra Frascati laboratoriet ved Rom. De lysende ringe kommer fra mere end 50000 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. (INFN Frascati).

### Historien om kvarkerne

#### Kvark-teorien

Resultaterne, der i 60'erne kom ud af boble-kammer billeder, 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". En god forklaring kom samtidigt fra østrigeren 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 altidende Gell-Mann, som selvfølgelig kendte en passende linie i James Joyce's 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 anti-kvark* skulle give såkaldte *mesoner* med hel-talligt spin, såsom pionen.

Faktisk syntes hadronerne at gruppere sig efter nogle matematiske symmetrier,  $SU(N)$ , 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 i gennem 60'erne kunne man imidlertid ikke rigtigt vide om disse mønstre bare var en nyttig regneregul, eller om de foreslåede kvarker, virkeligt 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 f.eks et boblekammer. Antallet af reaktioner stemte faktisk med at protonerne og neutronerne i kernen skulle have punktførmige bestanddele. Der var dog for få reaktioner til at det var rigtig 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, punktførmige spredningscentre. Endda centre, som bar "tredjedels-ladninger".

Det var helt tilsvarende argumenter, som tilbage i 1911 havde overbevist New-Zeelanderen 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". Selv med de stadigt mere potente accelerators som fulgte, sås der ingen tegn på nogen underliggende rumlig struktur i kvarkerne.





**Figur 8.** Den 5 km lange SLAC accelerator ved Stanford, Californien. Øverst ses en kvadrupol-magnet. Ved at skyde elektroner fra denne accelerator ind i protoner, så man for første gang en “grynet struktur” i protonen. (SLAC).

### Super-synchrotroner og kolliderende stråler

Omkring 1973 måtte acceleratorfronten tage det næste trin på energistigen. Det blev gjort på to måder. Den første var simpelt hen 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 omkring  $10^{12}$  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 partikel-skabelse hedder *centre-of-mass* 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 stråle-energien. I et eksperiment med *kolliderende stråler* er det derimod *hele stråle-energien*, der er til rådighed.

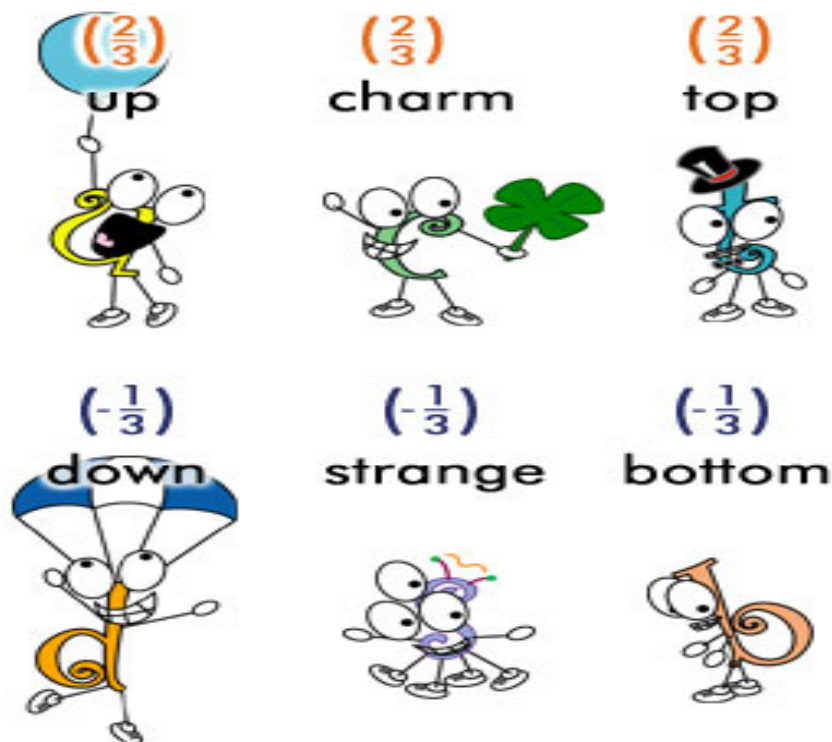


**Figur 9.** Princippet i et eksperiment med kolliderende stråler. Energien i *centre-of-mass systemet* bliver her umådeligt meget højere end hvis en enkelt stråle skydes ind i et stillestående materiale. ( Particle Data Group, LBL).

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 såaldte *Intersecting Storage Rings (ISR)*. Desværre for CERN, kom ISR lige en postgang for sent til den næste store opdagelse i kvarkernes verden.

### Charm, bottom og top kvarkerne

Opdagelsen skete i november 1974 samtidigt i SLAC og Brookhaven og er, lidt romantisk, kaldt "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 anti-kvark. 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.



**Figur 10.** De seks kvarker og deres elektriske ladning i enheder af protonens ladning. (Particle Data Group, LBL).

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 den svimlende masse  $176 \text{ GeV}/c^2$ ,

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 anti-protoner ved en samlet energi på næsten 2 TeV (to tusind milliarder, dvs Tera, elektron-Volt).

### 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 samme dublet* (med små undtagelser, som vi skal se).

Den eneste kvark-kombination, som er absolut stabil, er protonen. Det har man blandt andet konstateret ved forgæves at lede efter proton-henfald 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.

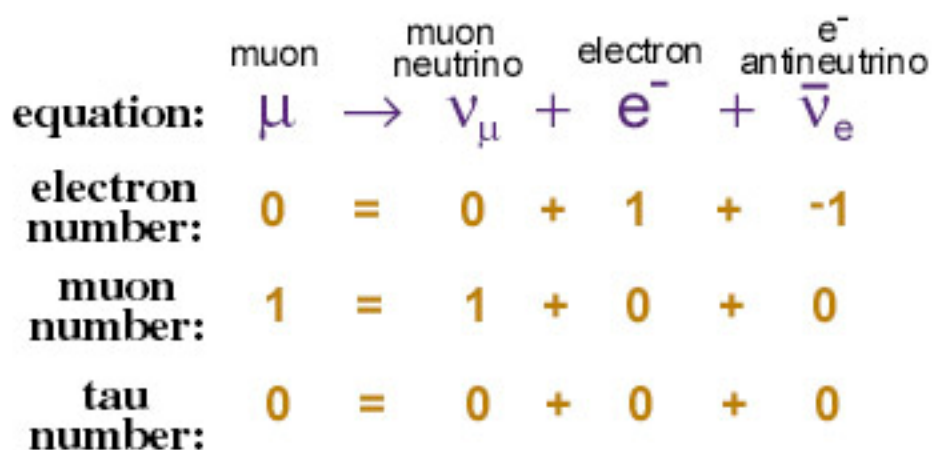
### Historien om leptonerne

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

Den første kendte lepton var *elektronen*. Så kom *elektron-neutrinoen* 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 60'erne, at der også er en særlig *myon-neutrino* knyttet til myonerne.

I 1977 blev den tredje og foreløbigt sidste elektrisk ladede lepton opdaget, *tau-leptonen* som er 3400 gange tungere end elektronen. Også den har en særlig *tau-neutrino* tilknyttet, se Figur 11. Samtlige leptoner (elektronen undtaget) blev eksperimentelt opdaget for første gang ved amerikanske laboratorier.



**Figur 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. (Particle Data Group, LBL).

## Historien om bosonerne

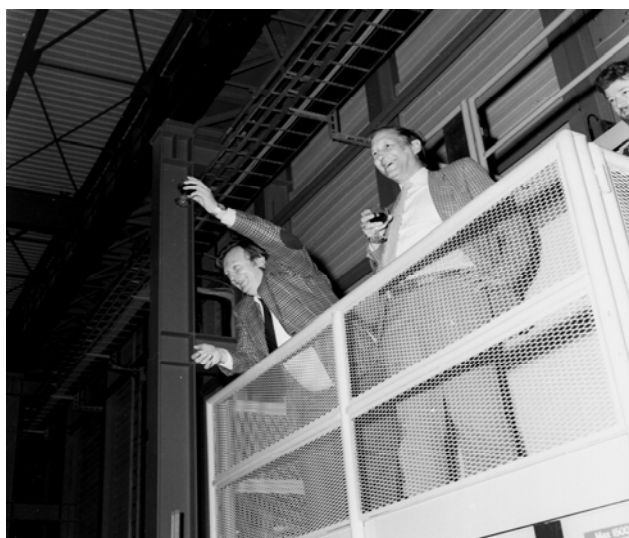
Historien om de tre familier af spin  $\frac{1}{2}$  *fermioner*, dvs kvarkerne og leptonerne, synes at tegne et billede af total amerikansk sejr i den faglige rivalisering mellem CERN og de amerikanske laboratorier i det 20'ende århundrede. Men det er et forkert billede. For vi har glemt *bosonerne*. 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.

## Neutrale strømme

Omkring 1970 havde en række teoretikere foreslået en troværdig model, der forenede den svage og den elektromagnetiske kraft til een *elektro-svag kraft*. Som en konsekvens heraf skulle den svage kraft ikke alene kunne transformere en kvark eller en lepton til sin partner indenfor 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 f.eks 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 f.eks 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 have fundet disse såkaldte “neutrale strømme”.



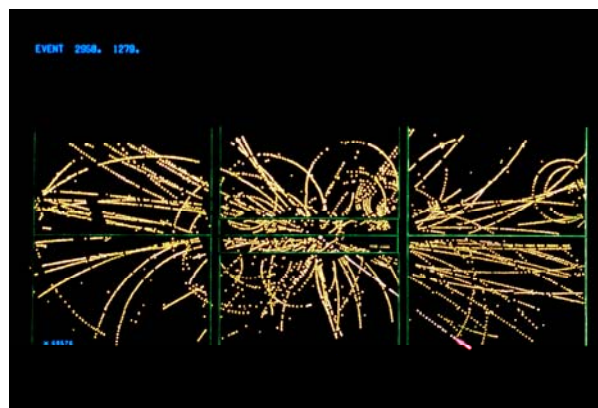
**Figur 12.** Der var ikke et øje tørt på CERN, da Nobelprisen tildeltes Carlo Rubbia og Simon van der Meer for opdagelsen af *W* og *Z bosonerne*. (CERN).

## Opdagelse af *W* og *Z bosonerne*

Spredning af partikler er imidlertid et noget indirekte bevis. Hvem ved med sikkerhed om en elastisk spredning virkelig skyldes udveksling af den og den boson?

Man var nødt til at se bosonerne direkte som håndgribelige partikler. Der var der 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 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-mass* systemet steg med mere end en faktor ti.



**Figur 13.** En af de første observerede W bosoner ved CERNs SPS. Vi har at gøre med en  $W^-$ , der henfalder til en meget energirig elektron (det lyse spor) og en rekylende neutrino, som apparaturet ikke registrerer.

Dette var rigelig energi til at W- og Z-bosonerne endeligt kunne produceres og identificeres i fri tilstand (se Figur 13), og til at CERN triumferende kunne annoncere deres opdagelse i 1983 (se Figur 12).

### **Farvernes dynamik**

Samtidigt med at *den elektro-svage 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, fandtes hver kvark i *tre farver*. Disse “farver” spiller samme rolle i QCD som den elektriske ladning spiller i elektro-magnetismen. De elektro-magnetiske 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 elektro-magnetismen, 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.



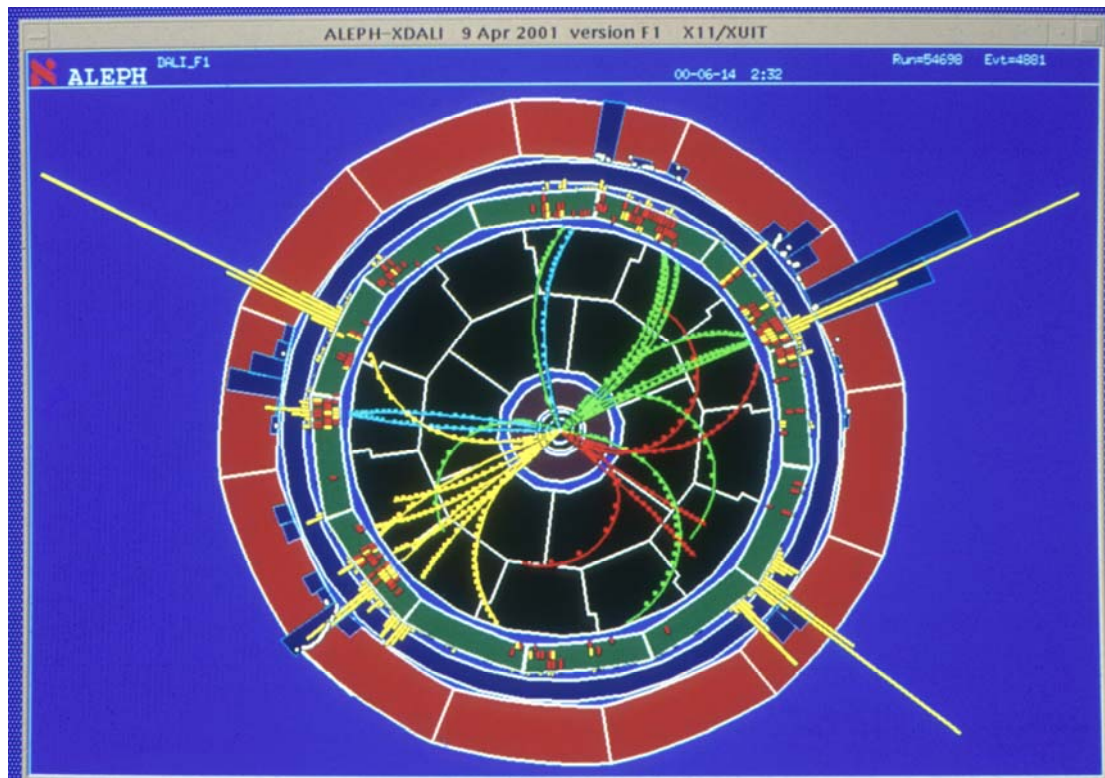
**Figur 14.** Den stærke kraft, der holder kvarkerne fast i hadronerne, skyldes en slags ladning, der kommer i tre varianter og kaldes *farve*. *Gluonerne*, som formidler den stærke kraft har også farve. Det bevirker at man aldrig kan slå en kvark ud af f.eks. en proton (som i billedet) til fri tilstand. Jo mere man slår til en kvark eller gluon, jo flere kvarker og gluoner vil der bare blive skabt. (NIKHEF)

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 15). Dette blev nogenlunde samtidigt observeret i 80'erne ved CERN og ved DESY, et højenergi-laboratorium ved Hamburg. Ved DESY havde man den fordel at man kunne identificere *jetter fra gluoner*, og hermed var gluonen opdaget.

Kombinationen af den elektro-svage 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 velunderbygget teori for alle kendte partikler og kræfter (undtagen gravitation). Erfaringsmæssigt ligger dog 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 accelerator-ring 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 15.** En kollision mellem en elektron og en positron ved CERNs 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. (CERN)

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 f.eks. 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 *indenfor samme dublet*. Det betyder, at de tilstande, som  $W^{+-}$  udsendelse eller absorption skifter imellem, har en lille iblanding af kvarker fra de andre familier.

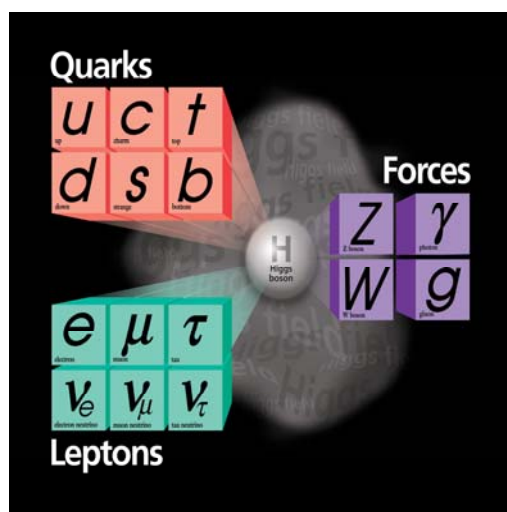
Den mest overraskende blandt mange observationer fra slutningen af 90'erne var, at neutrinoerne har det på samme måde. En elektron-neutrino kan rejse millioner af kilometer gennem rummet og pludseligt finde på at manifestere sig som en myon-neutrino. Det var meget overraskende, fordi neutrinoer indtil da var betragtet som masseløse, og det er kun partikler med masse som 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 klor-opløsning dybt nede i en mine, hvor kun neutrinoer kunne trænge ned. Opløsningen blev analyseret så fintfølede, at det kunne konstateres hvis blot en enkelt (!) klor-kerne reagerede med en neutrino. Resultatet efter årtiers målinger var, at der var alt for få (elektron-)neutrinoer fra solen. Spørgsmålet var nu, om der var noget i vejen med vores sol-model eller noget i vejen med neutrinoer.

Efter mange målinger ved nye “neutrino-teleskoper” i Japan, Canada og Italien (plus danske undersøgelser af solens fysik) lød svaret omkring år 2000: Solen er OK, men de tre neutrino-typer har hver deres ganske lille masse og “blandes” af de svage kræfter.

## Løse ender



**Figur 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 var en utrolig bedrift fra det 20ende 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”:

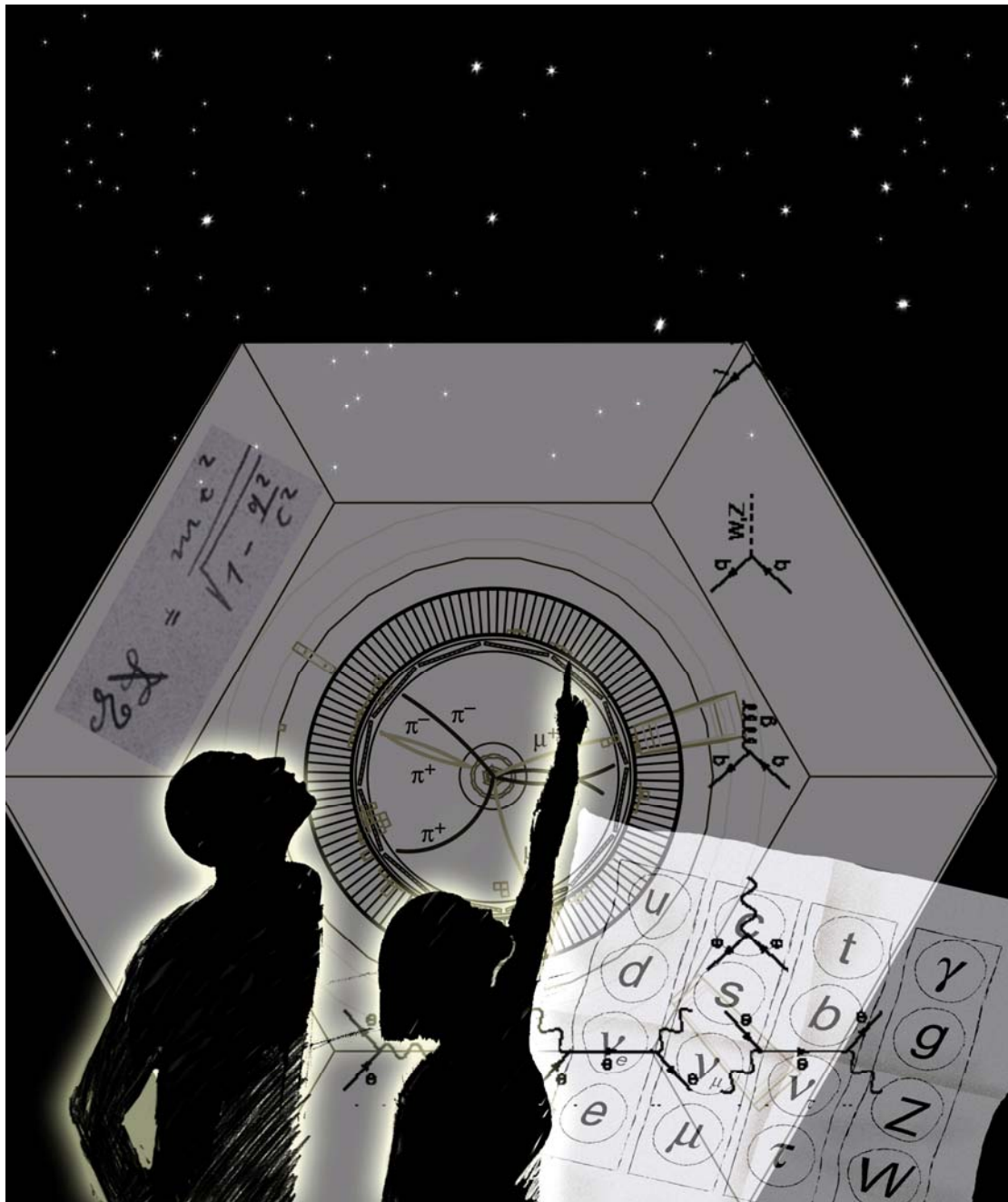
- Standardmodellen bygger på en symmetri, som umiddelbart forlanger at alle teoriens bosoner skal være masseløse. Denne regel brydes markant af W og Z bosonernes store masser på hhv 80 og 90 GeV/c<sup>2</sup>. I teorien forklares dette ved at appellere til vacuumet, det tomme rum, som nu ikke er helt tomt, men besidder en egenskab som “spontan” bryder symmetrien. Lignende fænomener kendes fra spontan krystallisering og magnetisering i faste stoffer. Egenskaben 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 i følge Standardmodellen og LEPs præcisionsmålinger skulle massen ligge et sted imellem 114 og 250 GeV/c<sup>2</sup>. 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, tal, som simpelthen 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 fire forskellige kræfter?
- Analyse af astrofysiske data peger entydigt på, at over 90% af universets energi er koncentreret i *partikler og kræfter, som ligger uden for Standardmodellen*.



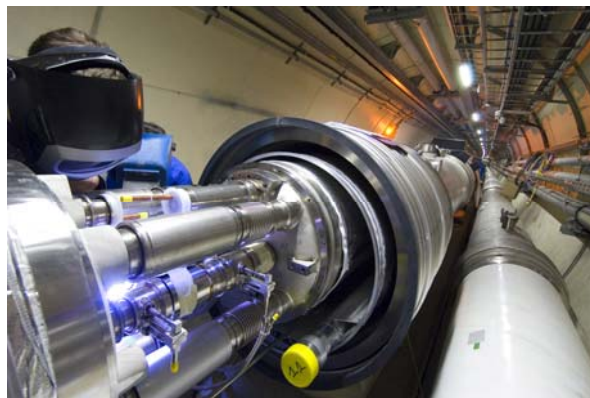
**Figur 17.** Standardmodellen, som illustreres af plancherne i baggrunden forklarer utroligt mange ting om vores materie. Men den forklarer faktisk kun 10% af den energi og masse, som må være tilstede i universet.

For at bringe disse problemer nærmere til deres løsning er der ingen anden vej, end at rykke energi-fronten i accelerator teknologien 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 proton-stråler cirkulerende i ringen med en energi på hver 7 TeV.

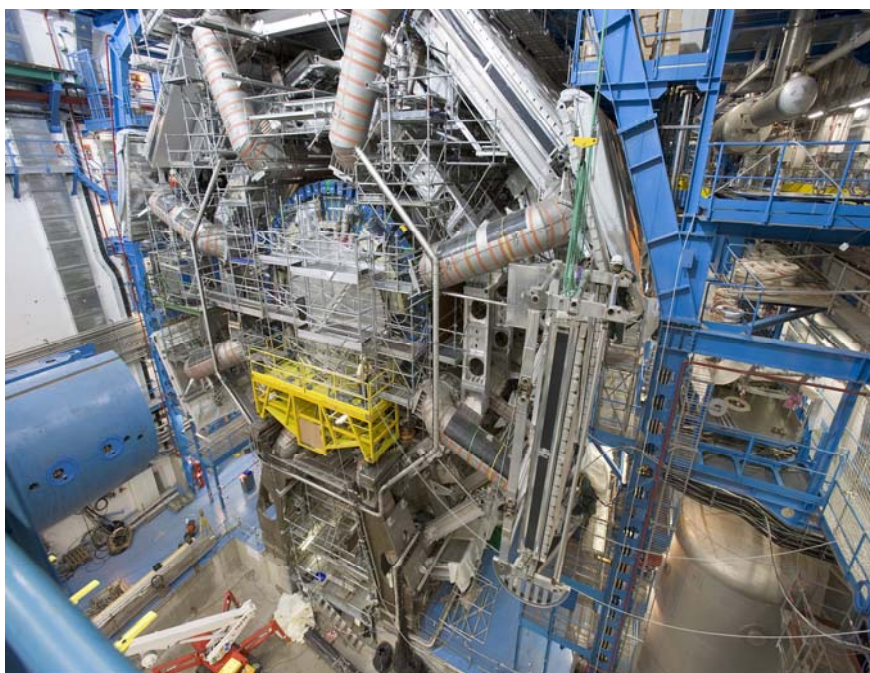
Der blev designet specielle “to-i-en” magneter, hvor magnetfeltet går op ved det ene strålerør og ned ved det andet. Vindingerne er lavet af en niobium-tin legering, og det hele er nedkølet til under heliums kogepunkt på 4.8 grader Kelvin, hvorved vindingerne bliver superledende. Det er faktisk verdens største køleskab. Herved opnås en tilstrækkelig magnetfeltstyrke til at holde de to proton-stråler cirkulerende ved sin vej med en energi på 7 TeV.



**Figur 18.** Arbejde på en af LHC acceleratorens 2000 superledende magneter. I det fjerne kan man svagt skimte den cirkulære accelerators krumning.

I fire punkter på den 27 km lange ring bringes de to proton-stråler 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 dimensionerne af Rundetårn på alle tre ledder. 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 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 proton-kollisioner ved LHC er skemalagt til sidst i år 2007, men først året efter vil energien nå op på de tiltænkte 7 TeV per stråle. Forhåbentligt vil nogle af mysterierne så finde svar - det er næsten garanteret, at dette vil ske – men det er samtidigt også sandsynligt, at det nye energi-regime vil rejse helt nye spørgsmål, hvis svar vil kræve endnu mere potente accelerators og eksperimenter i fremtiden.



**Figur 19.** Samling af det gigantiske ATLAS eksperiment i sommeren 2006. (CERN).

Vi står i dag i en situationen, der minder om situationen da hele eventyret startede med J.J. Thompsons opdagelse af elektronen i 1895 med en *Cathode-Ray-Tube*. Den blev senere blev til billedrør i TV og computere, men gav samtidigt 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 21ende århundrede er situationen sandsynligvis ganske lignende, på trods af den enorme indsigt, der er blevet opnået i det mellemliggende århundrede.

## **Læs mere**

### Generelt om partikelfysik

- Jens Lyng Petersen, “Elementarpartikler”, Gyldendal 1991 (Dejlig lille bog, som besvarer mange spørgsmål af teoretisk art).
- <http://particleadventure.org>  
(Det bedste netsted for grundlæggende begreber. Find, hvad du er ude efter, i fanebladet til venstre).
- <http://atlas.ch/>  
klik Physics
- <http://www.cpepweb.org>  
(Her kan man bl.a købe gode bøger for ikke-fagkyndige, på engelsk)
- <http://interactions.org>  
(Indgangsportalen til alt om partikler og acceleratore)

### CERN og LHC

- <http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>  
(for CERNs historie, formål osv klik “About CERN”. For LHC click “Next Step”)
- <http://www.symmetrymag.org/cms/>

(Et amerikansk magasin som har flere artikler om LHC, ikke mindst om amerikanernes involvering i LHC)

- <http://www.cerncourier.com/>  
(CERNs magasin. Her kan man finde artikler om næsten alt indenfor partikelfysik. Brug search og nogle snedige søgeord – på engelsk, selvfølgelig)

### Partikelfysikkens historie

- [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/articles/karlsson/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/karlsson/index.html)  
(En fin måde at gennemgå partikelfysikkens historie i det 20. århundrede er via Nobel priserne. Læs artiklen og klik på de relevante modtagere for at lære mere).
- [http://www-group.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/The\\_Quantum\\_age\\_begins.html](http://www-group.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/The_Quantum_age_begins.html)  
(kort om kvantemekanikkens historie)
- <http://hepwww.ph.qmw.ac.uk/epp/lectures/History.pdf>  
(Udmærket foredrag)

### Acceleratorer

- [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/articles/kullander/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/kullander/index.html)  
(Igen en historie om acceleratorernes udvikling, set gennem Nobelpriser)

### Specielt om neutrinoer

- <http://wwwlapp.in2p3.fr/neutrinos/>  
(Pragtfuld site om neutrinoernes historie og nuværende status)
- Anders Tranberg, Gamma 116, 1999. <http://www.gamma.nbi.dk/Galleri>  
(artikel på dansk om neutrino oscillationer)

### Specielt om teorier

- <http://hepwww.ph.qmw.ac.uk/epp/lectures/Basics.pdf>
- <http://hepwww.ph.qmw.ac.uk/epp/lectures/Electroweak.pdf>
- <http://www.gamma.nbi.dk/Galleri/gamma129>  
(Af Jens Lyng Petersen om QCD. På dansk!)
- <http://www.gamma.nbi.dk/Galleri/gamma125>  
(Af Peter Zeiler Skands om supersymmetri. På dansk!)

### Om kosmologi

- <http://www.universeadventure.org>

### Om kosmisk stråling

- <http://www.astro.phys.au.dk/~sth/DUKS/duks.htm>  
(Link til et dansk gymnasieprojekt, DUKS, der giver en god portal til alt om kosmisk stråling).