LHC.
Fremtidens elementarpartikelfysik-laboratorium

John Renner Hansen, Niels Bohr Instituttet, Københavns Universitet

I de sidste tyve år har vores viden om elementarpartiklernes fysik udviklet sig fra hovedsageligt at være en samling eksperimentelt opstillede håndregler til at blive en solid og velefterprøvet teori. To gennembrud har været specielt vigtige for denne proces. Først erkendte man at de hadroniske partikler, det vil sige protonen, neutronen og de fleste andre af de cirka 300 "elementarpartikler", som siden halvtredserne var blevet opdaget, måtte være opbygget af mindre bestanddele, kaldet kvarker. Dernæst at to af de fire fundamentale naturkræfter, de elektromagnetiske kræfter og de svage kernekræfter, kunne beskrives under én fælles formalisme, Standard Modellen. Der er nu blandt fysikere, som beskæftiger sig med partikelfysik, bred enighed om, at der må bygges en ny accelerator, for at komme videre i forståelsen af de mindste bestanddele i naturen, hvor protoner kan bringes i kollision med protoner og i en senere fase i kollision med elektroner. Et sådan projekt, LHC for Large Hadron Collider, er for tiden under udarbejdelse ved det fælles europæiske forsøgslaboratorium for partikelfysik, CERN i Genève. CERN ønsker at etablere en ny ring af superledende magneter ovenpå den allerede eksisterende elektron-positron collider, LEP, for derved at skabe sammenstød mellem protoner ved ekstremt høje energier.

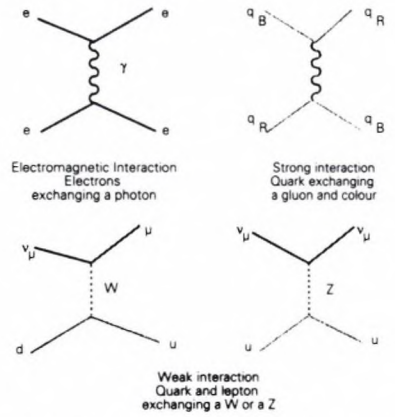
Standard Modellen.

Denne snart 25 år gamle modelbeskrivelse af elementarpartiklernes natur er blevet efterprøvet af mange eksperimenter, men ingen har endnu kunnet afvriste den den mindste svaghed, bortset fra at den indeholder en lang række parametre, som ikke er fastlagt af modellen selv.

	Kvarker		Leptoner	
Elektrisk ladning	- 1/3	+ 2/3	+ 1	0
1. familie	Ned	Op	Elektron	e-neutrino
2. familie	Sær	Charme	Myon (μ)	μ-neutrino
3. familie	Bund	Top	Tau (τ)	τ-neutrino

Figur 1. Naturens elementære byggestene opdelt i tre familier. Hver familie består af to kvarker og to leptoner.

I Standard Modellen skelnes mellem de fundamentale byggesten, fermionerne, og de kraftformidlende partikler, bosonerne. Fermionerne opdeles i to grupper, de som er i stand til at føle de stærke kernekræfter, kvarkerne, og de som ikke kan, leptonerne. I dag ved vi, at der i alt findes 12 forskellige fermioner, opdelt i tre familier. Den første familie består af **u**p-kvarken, **d**own-kvarken, elektronen og elektron-neutrinoen (ν_e). Med disse fire partikler er det muligt at opbygge alle de stoffer, som til dagligt omgiver os. For eksempel indeholder protonen to u-kvarker og en d-kvark, mens neutronen består af en u-kvark og to d-kvarker. π-mesonerne kan konstrueres ved hjælp af en kvark og en anti-kvark. Yderligere to familier, hver bestående af fire partikler, **c**harm-kvarken, **s**trange-kvarken, muonen (μ) og muon-neutrinoen (ν_μ) som den første, og **t**op-kvarken, **b**ottom-kvarken, tau (τ) og tau-neutrinoen (ν_τ) som den anden, er nødvendige for at kunne opbygge andre end de lette hadroner. Disse nye familier er blot kopier af den første familie, dog i tungere udgaver, hvoraf den sidste er tungest og derfor også sværest at skabe i laboratoriet. Med tolv elementære fermioner er det muligt at konstruere alle indtil nu opdagede partikler. Faktisk er endnu ikke en eneste partikel, der indeholder en top-kvark, observeret. Den er så tung, at ingen har været i stand til at skabe tilstrækkelig store energi-koncentrationer i laboratoriet til at producere den. Men selvom den endnu ikke er set, er den nødvendig for modellens selvkonsistens, og en fastlæggelse af top-kvarkens masse vil således være af stor betydning.



Figur 2. Grafisk illustration af de tre fundamentale kræfter som er beskrevet i Standard Modellen. Fermionerne påvirker hinanden ved at udveksle forskellige partikler; fotoner (γ) for den elektromagnetiske kraft, gluoner for den stærke kernekraft, W og Z for den svage kernekraft.

Den anden del af modellen omhandler de partikler, som formidler kræfterne mellem fermionerne. Det har længe været kendt, at de elektromagnetiske kræfter kunne beskrives som en udveksling af fotoner, lys-partikler, mellem

partikler med elektrisk ladning. Også den stærke kernekraft er formidlet af partikler. I dette tilfælde kaldes kraftformidlerne gluoner, limpartikler. Disse kan kun ses af partikler, som bærer en eller flere enheder af den stærke ladning, kaldet farver. Der findes tre forskellige farveladninger, som i passende kombinationer udadtil kan neutralisere hinanden på samme måde, som brintatomet udadtil er elektrisk neutralt, men rent faktisk består af lige meget positiv og negativ ladning. Kvarkerne bærer farveladning, leptonerne gør det ikke, hvorved vi får den før omtalte opdeling, hvor kvarker kan mærke den stærke kernekraft, og leptonerne ikke kan. En særlig egenskab ved den stærke kernekraft er, at farveladning ikke kan eksistere frit i naturen, kun farveneutrale frie partikler er tilladte. I god overensstemmelse med denne forudsigelse er kvarker og gluoner aldrig observeret som frie partikler.

Den sidste subnukleare kraft kaldes ''den svage kernekraft''. Denne blev først kendt fra β^--radioaktivitet, hvor for eksempel en neutron omdannes til en proton under udsendelse af en elektron og en elektron anti-neutrino. Standard Modellen forudsiger udover eksistensen af fotonen og gluonerne tre kraftoverførende partikler, W^+, W^- og Z^0, hvor W-partiklerne allerede tidligt blev tillagt ansvaret for β^--radioaktiviteten. Z^0-partiklen derimod er først blevet indført med Standard Modellen. Første gang, den indirekte blev observeret, var på CERN i 1973. Et eksperiment konstaterede, at neutrinoer kunne spredes elastisk mod stof, noget som er umuligt uden en ekstra partikel med netop Z^0-partiklens egenskaber. Modellen forudsiger, at Z^0-partiklen skal være meget tung. Henved 100 gange tungere end protonen. I 1983 lykkedes det på CERN ved at kollidere protoner med anti-protoner ved meget høj energi, 630 GeV. at skabe disse partikler og direkte observere deres sønderdeling. I perioden fra 1983 til 1989 blev der på CERN observeret cirka 500 Z^0-partikler og over 2000 W-partikler, nok til at konstatere at der ikke var nogle umiddelbare fejl ved Standard Modellen.

Højpræcisionstesten kom med ibrugtagningen af LEP, den nye elektron-positron (anti-elektron) collider på CERN. Siden starten i august 1989 har fire eksperimenter tilsammen observeret over 600 000 Z^0 henfald. Det indtil nu vigtigste resultat er, at der ikke er flere forskellige lette neutrinoer end de tre, som allerede er omtalt. Af dette kan konkluderes, at der nok ikke findes flere familier end tre, et tal som ikke er forudsagt af Standard Modellen. Alle andre målinger ved LEP er i perfekt overensstemmelse med forudsigelserne.

På trods af Standard Modellens succes er der ting, som endnu ikke er afklaret, og som LEP sandsynligvis ikke kommer til at give svaret på. Helt konkret ved vi, at LEP ikke på noget tidspunkt vil kunne give elektroner og positroner energi nok til at producere top-kvarken. Et andet helt uafklaret problem er Higgs-partiklen. I Standard Modellen er det ikke muligt direkte at give partiklerne masse, uden at ødelægge de symmetrier som er en essentiel del af modellen, de såkaldte gauge symmetrier. For at komme uden om dette problem har man indført en ekstra neutral partikel, Higgs partiklen, som gennem sin vekselvirkning med elementarpartiklerne giver dem masse. Standard Modellen forudsiger meget lidt om Higgs-partiklens egen masse, og heller ikke hvad forholdet mellem de ladede fermioners masse er. Modellen giver kun, at alle kvarkmasserne må være forskellige. Den forudsiger heller ikke, om der er en eller flere Higgs-partikler. Modellen med kun en Higgs partikel kaldes for den ''Minimale Standard Model'', MSM. Der er en endelig, men ikke ret stor sandsynlighed for, at MSM Higgs-partikler bliver fundet ved LEP. I dag ved vi fra målinger ved LEP, at dens masse er større end 45 GeV, og at LEP eksperimenterne kun vil kunne finde den, hvis dens masse er mindre end 90 GeV. Fra modellen vides blot, at massen skal være mindre end cirka 700 GeV. Hvis Higgs-partiklen ikke er fundet med en masse under denne grænse, er det tegn på, at modellen ikke holder i længden, og at ny fysik begynder at vise sig ved højere energier. Standard Modellen forudsiger en sammenhæng mellem top-kvarkens masse, Higgs-partiklens masse og andre allerede målte størrelser. En direkte måling af disse masser er derfor af stor betydning for den endelige forståelse af elementarpartiklernes dynamik.

En lang række andre teoretiske tiltag må afprøves ved LHC. Blandt de vigtigste bør nævnes ''Super-Symmetri'', SS, som blev skabt for at forhindre Higgs partiklens selvkobling i at blive uendelig stor. For hver af de allerede nævnte partikler indføres i den Super-Symmetriske model en partner, således at alle fermioner har en SS boson partner, og alle bosoner har en SS fermion partner. Ingen af de Super Symmetriske partikler er endnu blevet observeret, men det kan, som det er tilfældet med top-kvarken, være fordi, vi ikke endnu har haft tilstrækkelig energi til rådighed.

The Large Hadron Collider, LHC

For at opnå de sammenstødsenergier som er nødvendige for at producere top-kvarker, Higgs-partikler og eventuelle Super-Symmetriske partikler, må man bygge endnu en stor accelerator. Denne kunne installeres i den allerede eksisterende LEP tunnel, hvor der er tilstrækkelig plads til at placere en ny ring af superledende magneter. Bundter af protoner skal cirkulere i to rør, hvor protonerne i det ene rør bevæger sig i modsat retning af protonerne i det andet. Tre af de otte steder hvor rørene krydser hinanden, vil det være muligt at udføre eksperimenter. Energien per proton er 8000 GeV, eller cirka 10 gange mere, end der har været til rådighed noget sted før. Den maksimale energi i sammenstødet er givet ved magnetfeltstyrken i dipolmagneterne. Med en fremskrivning fra den eksisterende magnetteknologi til midten af dette årti skulle det være muligt at masseproducere superledende magneter med en feltstyrke på 10 Tesla. Dette er nok til at holde 8000 GeV protoner fast i den 27 km lange bane. 8 Tesla prototype magneter er allerede konstrueret, og 6 Tesla magneter installeres for tiden i tusindvis ved den nye proton-elektron collider, HERA, i Hamborg.

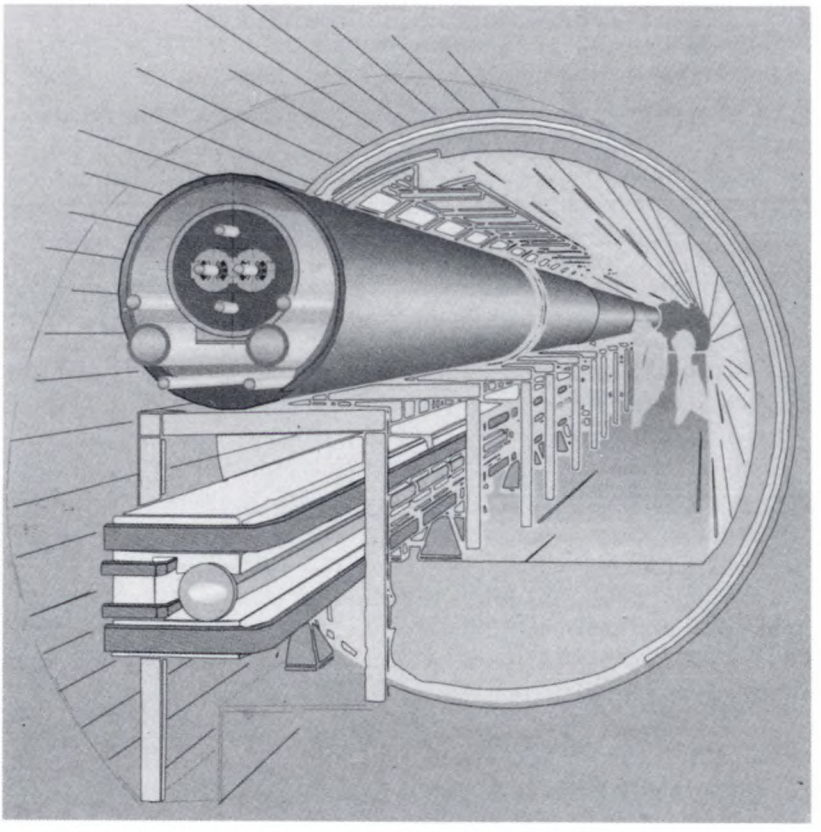
Selvom energien i de enkelte sammenstød bliver stor nok til at skabe de nye partikler, sker det med så ringe sandsynlighed i hvert sammenstød, at man udover den ultrahøje energi også må arbejde med meget intensive proton stråler. Kun et ud af 10^{13} proton-proton sammenstød resulterer i en

observerbar Higgs-partikel. Lidt lettere er det med top-kvarken, hvor man i gennemsnit "kun" skal vente 10^9 sammenstød. For ikke at vente på resultaterne resten af næste årtusind, bliver maskinen bygget til at skabe $5 \cdot 10^9$ sammenstød hvert sekund. Prisen for det er, at eksperimenterne må være i stand til at udvælge de interessante begivenheder hvert femtende nanosekund og til at sortere cirka $5 \cdot 10^8$ begivenheder fra hvert sekund uden at skabe en for fysikresultatet farlig bias. Eksperimenterne kommer til at være særdeles komplicerede opstillinger af mange typer instrumenter. I alt skal informationen fra op imod 2 000 000 enkeltkanaler udlæses, analyseres og sammensættes for hver accepteret begivenhed. Projektet kan kun lade sig gøre ved brug af meget avanceret mikroelektronik, af hvilket en stor del endnu ikke er udviklet. Detektorerne og den tilhørende elektronik må placeres tæt på sammenstødspunktet, hvor udstyret vil blive udsat for så høje strålingsdoser, at eksisterende komponenter ødelægges i løbet af få timer. På dette område venter et meget stort udviklingsarbejde, som dog kan profitere af den store erfaring, som for tiden frigives fra militær forskning.

I USA er et lignende projekt under udarbejdelse kaldet SSC for Superconducting Super Collider. Energien ved denne maskine vil blive cirka dobbelt så høj som ved LHC. SSC er ikke bundet af de begrænsninger som LEP-ringen sætter. En række egenskaber ved LHC gør den dog særdeles konkurrencedygtig trods den mindre energi. For det første bliver proton intensiteten i LHC cirka 50 gange større end ved SSC, hvilket for produktion af partikler med masser mindre end 1000 GeV kompenserer for den lavere energi. For det andet bliver prisen kun cirka 20% af prisen for SSC. Dernæst vil LHC kunne køre sammen med LEP og derved skabe sammenstød mellem elektroner og protoner. Sluttelig vil man kunne lave kollisioner mellem tunge ioner som for eksempel uran mod uran. Dette sidste kan eventuelt skabe stoftilstande, som kun fandtes i de allerførste μ-sekunder efter universets skabelse.

Besluttes det at gennemføre det enorme projekt, vil det skabe drivkraften til nyudvikling på en lang række områder. Allerede nu, inden projektet er godkendt, har mange private virksomheder begyndt udviklingsarbejder indenfor superledning, ultrahurtig konverterings elektronik, nye mikro-processor systemer og meget andet, inspireret af de avancerede krav LHC kommer til at stille til eksperimenterne.

Med LHC vil vi komme et stort skridt nærmere forståelsen af elementarpartiklernes dynamik gennem en bedre forståelse af Standard Modellen. Forhåbentligt kommer vi til at se en forklaring på partiklernes masse og på en række af de mange andre frie parametre i modellen. Eventuelt kan vi også få afklaret, om det er Super-Symmetri, der er vejen ud ad Higgs uføret. At håbe på at LHC leder os til en teori, som kun bygger på "First Principles", det vil sige en teori helt uden eller med kun en fri parameter, er vel for optimistisk, men et stort skridt på vejen kommer vi uden tvivl.



Figur 3. LEP tunnelen med de to magnetringe. Nederst den eksisterende LEP-ring med konventionelle magneter og øverst de superledende LHC-magneter. De to små rør midt i LHC-magneterne angiver, hvor protonerne kommer til at bevæge sig.

Referencer

1) Large Hadron Collider in the LEP tunnel. Proceedings of the ECFA-CERN workshop held in Lausanne and Geneva, CERN 84-10, (1984)
2) Proceedings of the workshop on physics at future accelerators. La Thuile and Geneva 1987. CERN 87-07
3) ECFA study week on Instrumentation Technology for High-Luminosity Hadron Colliders. Barcelona September 1989, CERN 89-10 (1989)
4) Large Hadron Collider Workshop. Proceedings of the ECFA-CERN workshop held in Aachen, CERN 90-10, ECFA 90-133 (1990)



John Renner Hansen CERN-følgeforskningsstipendiat ved Niels Bohr Institutet. Var fra 1980 til 1986 ansat som research physicist på CERN i Genève. Lic. Scient. i 1987 på en afhandling om den eksperimentelle udforskning af de stærke kernekræfter. Arbejder nu ved LEP eksperimentet ALEPH.