Elementarpartikelfysikkens Standardmodel

J. D. Hansen, Docent ved Niels Bohr Institutet

Elementarpartikelfysikken befinder sig i dag i en besynderlig situation. Den såkaldte Standardmodel forklarer tilsyneladende alle observerede fænomener i et utroligt energiinterval, og alligevel er de fleste fysikere overbeviste om, at der må være en anden og mere fundamental teori.

Man har indtil nu observeret fire fundamentale kræfter i naturen: tyngdekraften, den elektromagnetiske kraft, den stærke kernekraft og den svage kernekraft. Tyngdekraften, der er den kraft, som har været studeret i længst tid, var udgangspunktet for den klassiske mekanik, som den blev opstillet af Newton. Alligevel er det stadig den, vi forstår dårligst. Dette skyldes, at den almene relativitetsteori, der var Einsteins generalisering af Newtons teori, har vist sig vanskeligt forenelig med kvantemekanikken, den teori, der blev påbegyndt af Niels Bohr, og som erstatter Newtons klassiske mekanik på det atomare plan. Ser man bort fra tyngdekraften, har vi i dag noget, der nærmer sig en forenet teori for de øvrige kræfter. Det teoretiske grundlag blev etableret i 60'erne og 70'erne. Den eksperimentelle verifikation skete i 70'erne og især i 80'erne ved SPS og nu ved LEP på CERN.

Den teoretiske baggrund.

Man forestiller sig i dag, at "stof" er fermioner. Fermioner er partikler, som har den egenskab, at to af dem ikke kan optage samme kvantetilstand. Man kan sige, at stof er karakteriseret ved, at det "fylder" noget. Anderledes forholder det sig, når vi taler om de kræfter, der binder "stoffet" sammen. De kan relateres til partikler med den egenskab, at flere af dem godt kan befinde sig i samme kvantetilstand. Disse kaldes bosoner. Dermed kan de danne makroskopiske kraftfelter, som vi kender det i den klassiske fysik indenfor elektromagnetismen. Forskellen mellem de to partikeltyper forklares gennem en egenskab svarende til et angulært moment, som kaldes spin. Bosonernes spin er heltallige (0, 1, 2, ...), mens fermionernes spin er halvtallige ($^1/_2$, $^3/_2$, ...).

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

	Kvarker		Leptoner	
Elektrisk ladning	$-^1/_3$	$+^2/_3$	-1	0
1. familie	Ned d	Op u	Elektron e	e-neutrino η_e
2. familie	Sær s	Charme c	Myon μ	μ-neutrino η_μ
3. familie	Bund b	Top t	Tau τ	τ-neutrino η_τ

I Standardmodellen, der beskriver elektromagnetisme, de svage og de stærke kernekræfter, består stoffet af spin $^1/_2$ fermioner fordelt i 3 "familier", som vist i tabel 1. Hver familie består af to slags kvarker og to slags leptoner. De to kvarker og den ene lepton har elektrisk ladning og masse,

Ækvivalensen mellem masse og energi

I partikelfysikken anvendes hele tiden at $E=mc^2$.

Energienhed

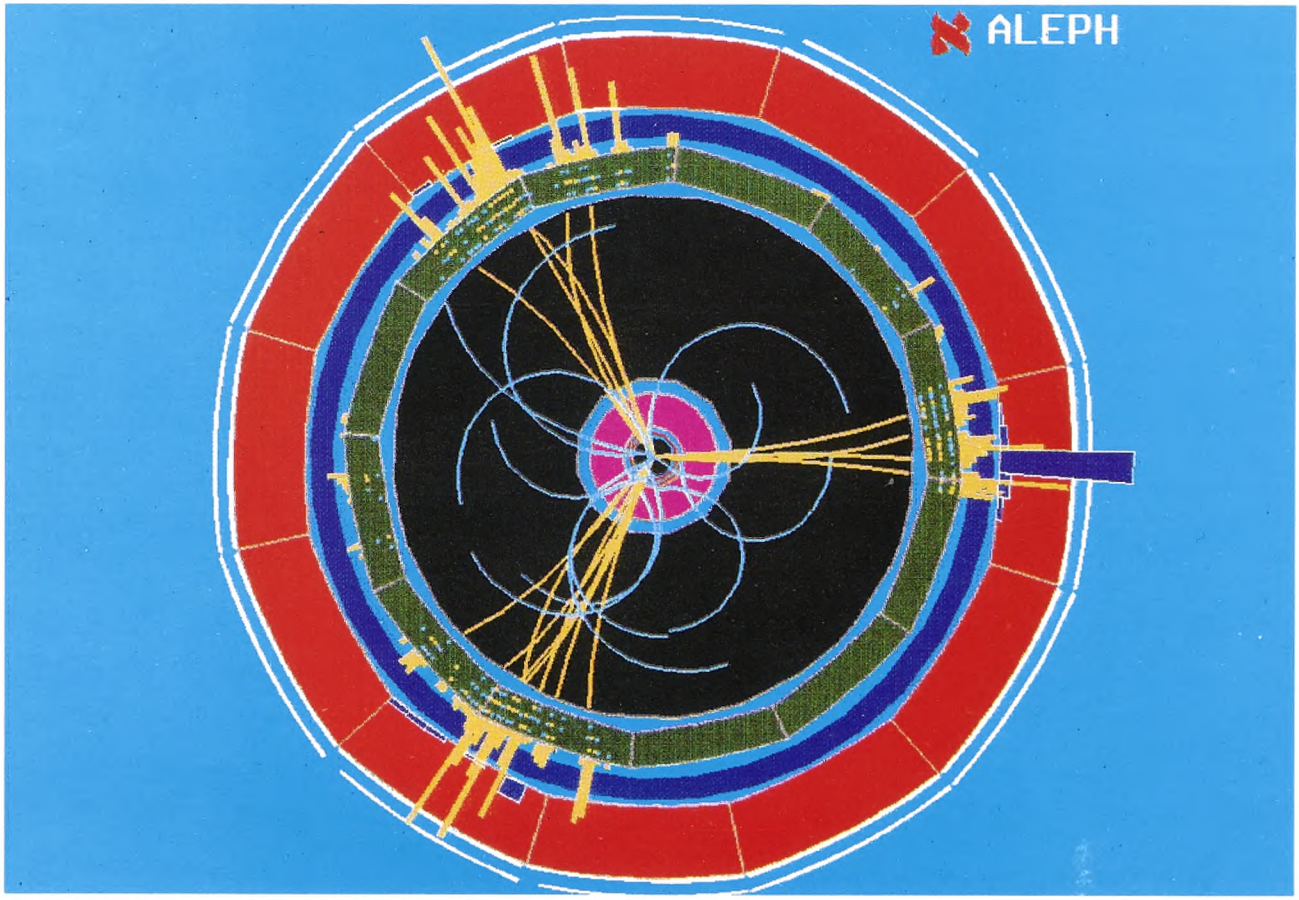
Når en elektrisk ladet partikel med ladningen e passerer et spændingsfald på 1 Volt, får den en energi på 1 eV. Sædvanligvis angives energi i denne enhed indenfor partikelfysikken, typisk som GeV = 10^9 eV. Masser angives f.eks. i GeV/c^2.

Antipartikler

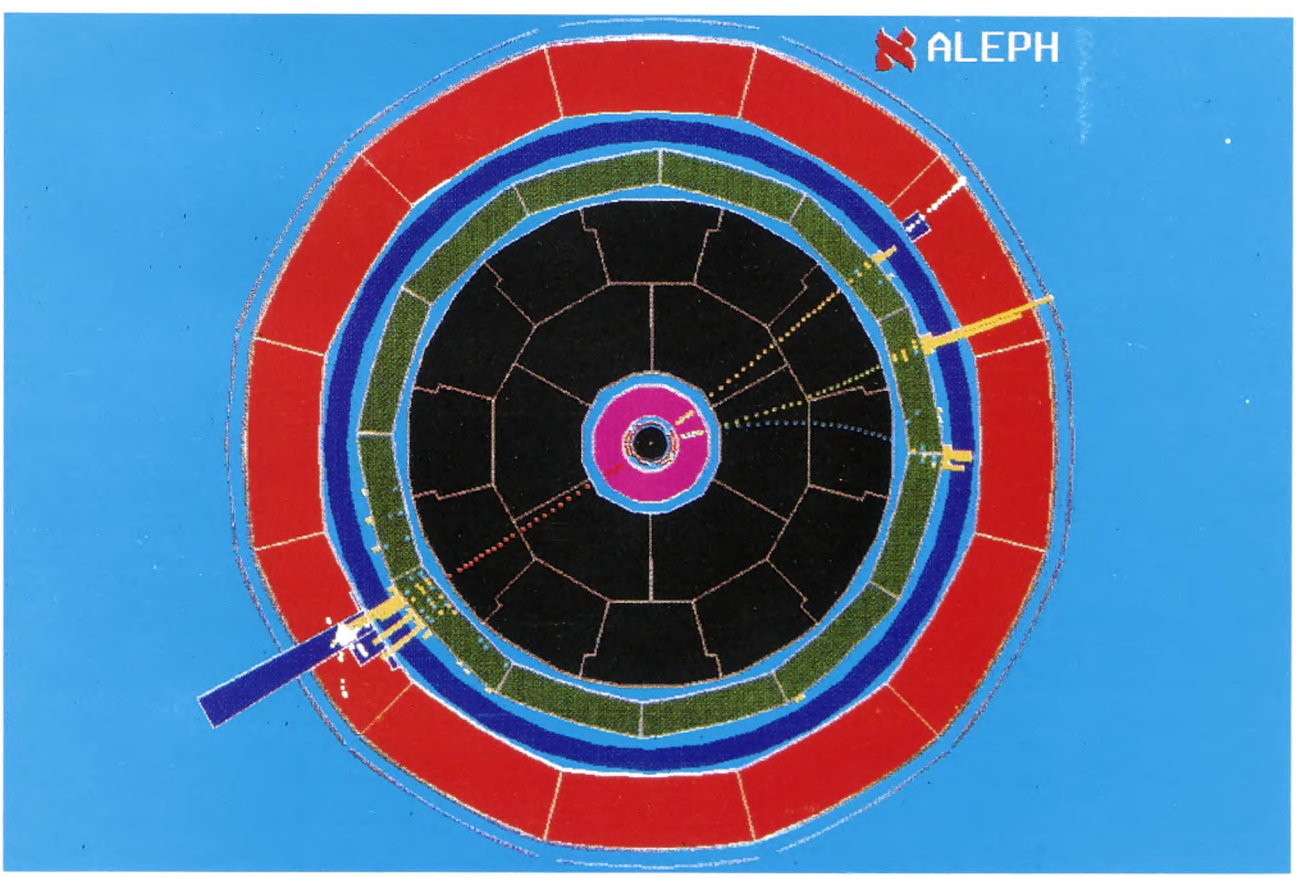
Når "ren" energi omdannes til partikler, vil der blive dannet partikel-antipartikel par, hvor antipartiklen har modsatte egenskaber: den har den modsatte elektriske ladning og tæller -1 i partikelregnskabet. Den sidste egenskab gør at partikeltallet er uændret ved den omtalte pardannelse. Antipartikler markeres ved at sætte en streg over partikel-betegnelsen: $\bar{p}$ er en antiproton. Dog betegnes elektronens antipartikel, positronen, med e^+, og ikke med $\bar{e}$.

Ordliste

baryoner:	partikler, sammensat af tre kvarker f.eks. proton og neutron.
mesoner:	partikler, bestående af kvark-antikvark, f.eks. pion eller K-meson.
hadroner:	partikler, der består af kvarker (baryoner og mesoner).
leptoner:	partikler, der ikke består af kvarker (elektroner og neutrinoer).
W^+, W^-, Z^0:	Bærere af den elektrosvage kraft (sammen med fotonen, der bærer den elektromagnetiske del).
Higgs-partikel:	hypotetisk partikel, der kan forklare partiklernes masse, hvis den eksisterer.
QED	Den kvanteelektrodynamiske teori, der bl.a. forklarer elektronens opførsel i mindste detalje.
QCD	Den kvantekromodynamiske teori, der beskriver kvarkers opførsel.



Figur 1. En Z^0 henfalder til et τ par. Hver τ henfalder til π-mesoner og en τ-neutrino. Z^0 dannes i sammenstødet mellem en elektron og en positron.



Figur 2. En Z^0 henfalder til et kvark par og en gluon. Disse omdannes hver især til en jet af π-mesoner.

hvorimod det sidste familiemedlem er ladnings og masseløs. Første familie består af op-kvarken, ned-kvarken, elektronen og den masseløse elektron-neutrino. Den engelske navngivning for kvarkerne er "up" og "down" Ladningen af de fire fermioner er $^2/_3e$ og $-^1/_3e$, $-e$ og 0, hvor e er protonens ladning. Normalt stof er opbygget af medlemmerne af første familie.

Hver af de to næste familier har en tungere elektronlignende partikel, som kaldes henholdsvis myonen og tau-leptonen. De øvrige leptoner er masseløse og har ingen elektrisk ladning. De kaldes for myon- og tau-neutrinoen. En observation af et par af tau-leptoner fra tredie familie kan ses i figur 1. På lignende måde gentages kvarkernes egenskaber i de næste familier. Blot bliver familiemedlemmerne tungere. I den anden familie kaldes kvarkerne "charme" og "sær" eller "charm" og "strange" og i den sidste "top" og "bund" eller "bottom". Som det vil blive omtalt senere har LEP-eksperimenterne vist, at Standardmodellen med masseløse neutrinoer kun kan have 3 familier.

Til enhver af disse partikler hører der en tilsvarende antipartikel med samme masse og spin men med modsat fortegn for ladningen. F.eks. er positronen elektronens antipartikel.

Både kvarker og de ladede leptoner har elektromagnetiske vekselvirkninger, der formidles af fotonen, som er en spin 1 partikel. Styrken af denne velselvirkning er normalt målt i enheder af finstrukturkonstanten α (som er proportional med kvadratet på den elektriske elementarladning, og har en værdi på $^1/_{137}$). Teorien for disse vekselvirkninger hedder Quantum Electro Dynamics eller QED. Fotonen er masseløs og bærer ingen elektrisk ladning.

De stærke kræfter, som kun virker mellem kvarkerne, binder disse sammen til hadroner, hvoraf der findes to typer: baryoner, der er opbygget af tre kvarker, som derfor er fermioner, og mesoner, der er opbygget af en kvark og en antikvark. Mesoner er derfor bosoner. To af baryonerne, nemlig protonen og neutronen, danner de kerner, som normalt stof er opbygget af.

Kvarker er ikke observeret som frie partikler. De observeres indirekte som punktformige spredningscentre inde i f.eks. protonen á la Rutherfords opdagelse af atomkernen eller i form af en smal stråle, kaldet en jet, bestående af hadroner.

De stærke kræfter formidles af 8 forskellige masseløse spin 1 partikler, som kaldes gluoner. Heller ikke gluoner er observeret som fri partikler. Et eksempel på, hvordan man alligevel indirekte kan observere dem, er vist i figur 2. Her vises henfaldet af en Z^0-boson til et kvark-antikvark par og en gluon. Begivenheden er vist i en plan som indeholder stødretningen. Alle tre partikler har inden for en afstand af ca. 10^{-15} m fra sammenstødspunktet skabt en jet af partikler, hvis samlede energi og impuls er et mål for den oprindelige partikels energi og bevægelsesretning. Den samme begivenhed, men set vinkelret på stødretningen vises på forsiden. Kvarkerne har i modsætning til leptonerne en "stærk" ladning, hvoraf der er tre slags. Ladningerne kaldes farver. Navnet er valgt så kvarkerne i baryonerne har farverne rød, grøn og blå, der tilsammen giver en farveløs partikel. Mesonerne har en farve og en antifarve, og er ligeledes farveløse. For at en blå kvark kan vekselvirke med en rød må gluonerne have farve. Dette er i modsætning til QED hvor den tilsvarende kraftformidler, fotonen, er ladningsløs. Styrken af den stærke kernekraft er målt i enheder af α_s (proportional med kvadratet på farveladningen), som er finstrukturkonstanten for QCD. Teorien for de stærke vekselvirkninger kaldes Quantum Chromo Dynamics eller QCD.

De svage vekselvirkninger er aktive mellem alle fermionerne og formidles af W-bosonerne og Z-bosonen. Betahenfald af kerner er resultatet af de svage kernekræfter. Under denne proces udsendes en virtuel W-boson, som efter meget kort tid henfalder til et elektron-antielektronneutrino par. Styrken af dette henfald beskrives ved hjælp af Fermikonstanten, G_F. Sammenhængen mellem G_F og W-bosonens masse, m_W, er:

$$G_F = \frac{\alpha \cdot \pi}{\sqrt{2} \cdot \sin^2(\Theta_W) \cdot m_W^2}$$

I dette udtryk er forholdet mellem den elektriske ladning, e, og den svage ladning, g, skrevet som:

$$\frac{e}{g} = \sin(\Theta_W),$$

som definerer Weinberg-vinklen Θ_W. Værdien af $\sin^2(\Theta_W)$ er ca. 0,23. De elektromagnetiske og de svage vekselvirkninger er forenet ved, at Θ_W giver en sammenhæng mellem W- og Z-bosonernes masse, nemlig:

$$m_W = m_Z \cdot \cos(\Theta_W)$$

En mere detaljeret beskrivelse af Standardmodellen giver korrektioner til ovenstående udtryk, som afhænger af energien og af kvarkernes masse og antallet af Higgsbosoner og deres masser, se senere.

De eksperimentelle observationer.

Op til dette punkt er alt godt. Man har observeret alle de nævnte partikler, undtagen den tungeste kvark, top-kvarken. Den store triumf for partikelfysikken i 80'erne var netop observationen af W- og Z-bosonerne. Massen af W-bosonerne er 80,230 ± 0,350 GeV/c^2 og af Z-bosonen 91,182 ± 0,021 GeV/c^2, hvor protonens masse er 0,938 GeV/c^2. Det kræver noget ekstra arbejde at forstå, hvorfor nogle partikler har en masse og andre ikke. I den grundlæggende teori er nemlig alle bosonerne masseløse. En mulig løsning findes ved at gå til så lavenergetisk et område som superledning. Det viser sig, at fotonen får en masse, hvis den under passende omstændigheder lukkes inde i en superleder. Dette skyldes dens vekselvirkning med et kondensat af elektronpar. Indføres et tilsvarende kondensat i Standardmodellen ved hjælp af Higgs-partiklen, som er en boson med spin 0, får W- og Z-bosonerne masse og kommer derved i overensstemmelse med eksperimenterne. Higgs-bosonen giver

også anledning til masser for kvarker og elektroner, myoner og tau-leptoner, men holder meget passende fotonen og neutrinoerne masseløse. Omkostningen for at klare masseproblemet er dog endnu en partikel: Higgs-partiklen.

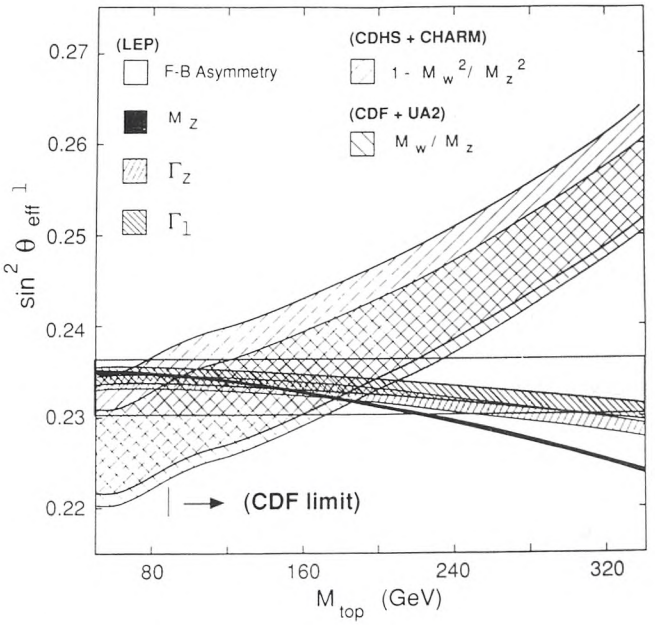
Den første måling, der blev foretaget ved LEP, var Z-bosonens tværsnit som funktion af energien, se figuren i artiklen af C. Fløe Kristjansen i dette nummer af KVANT. Tværsnittet er et mål af sandsynligheden for at producere en Z-boson ved en given sammenstødsenergi af de kolliderende elektroner og positroner. Den energi, ved hvilken sandsynligheden er størst, er Z-bosonens masse, m_Z. Z-bosonens levetid kan findes udfra bredden af kurven. En kortere levetid giver en bredere kurve.

Ved at måle tværsnittet for hvert enkelt af de synlige Z^0 henfalds kanaler kan man bestemme tværsnittet for henfald til neutrinoer, som ikke lader sig observere direkte. På denne måde har man bestemt antallet af forskellige neutrinoer til at være 3. Under antagelse af, at massen af alle neutrinoer er mindre end m_Z / 2, giver dette således, at der ikke eksisterer flere familier, idet enhver familie indeholder en neutrino.

Mange målinger kan udtrykkes ved hjælp af Weinberg-vinklen Θ_W. Eksempler herpå er forholdet mellem W- og Z-bosonernes masse målt indirekte ved spredning af neutrinoer på kerner eller ved sammenstød af protoner og antiprotoner. Andre eksempler er massen af W- eller Z-bosonen, målinger af asymmetrier i vinkelfordelingerne af forskellige Z^0 henfald, samt forskellige partialbredder af Z-bosonen. I en mere detaljeret beskrivelse af Standardmodellen er Weinberg-vinklen ikke konstant, men en funktion af den overførte energi samt top-kvarkens og Higgs-bosonens masser. Således giver en måling af $\sin^2(\Theta_W)$ ikke kun ét tal når f.eks. $\sin^2(\Theta_W(m_Z{}^2))$ bestemmes v.h.a. vinkelasymmetrimålingerne i Z^0 henfald. Man får en hel kurve som en funktion af top-kvarkens masse, når værdien af Higgs-massen lægges fast. Sådanne kurver er vist i figur 3[1], hvor Higgs-massen er sat til 200 GeV/c^2. Afhængigheden af denne er iøvrigt lille. Da disse kurver alle måler den samme vinkel skal de krydse hinanden for den rigtige top-kvark masse. Den nedre grænse kommer fra et eksperiment ved FNAL's (Fermilab) proton-antiproton kollider i USA. Målinger offentliggjort ved EPS konferencen i Geneve i 1991, gav grænserne for top-kvarkens masse m_{top} = 130 ± 30 GeV/c^2.

Det, at LEP eksperimenterne endnu ikke har observeret Higgs-bosonen, har sat en nedre grænse på 57 GeV/c^2 for dens masse. En øvre grænse på ca. 1000 GeV/c^2 (1 TeV/c^2), kommer fra unitaritetsantagelsen, som siger at sandsynligheder må addere op til 1. Indsætter man i Standardmodellen en Higgs-partikelmasse, som er større end ca. 1 TeV/c^2, bliver den beregnede sandsynlighed for overgangen af et par af Z-bosoner til et par af W-bosoner større end 1. Ved at variere Higgs-bosonens masse kan man opnå grænser for denne ved at kræve at kurverne i figur 3 skal krydse hinanden. Den før omtalte konference gav en øvre grænse på 1 TeV/c^2.

Andre observationer bekræfter i stor udstrækning Standardmodellen. F.eks. forudsiger den, at sandsynligheden for Z^0 henfald til e^+e^-, $\mu^+\mu^-$ eller $\tau^+\tau^-$ er ens. Indenfor de



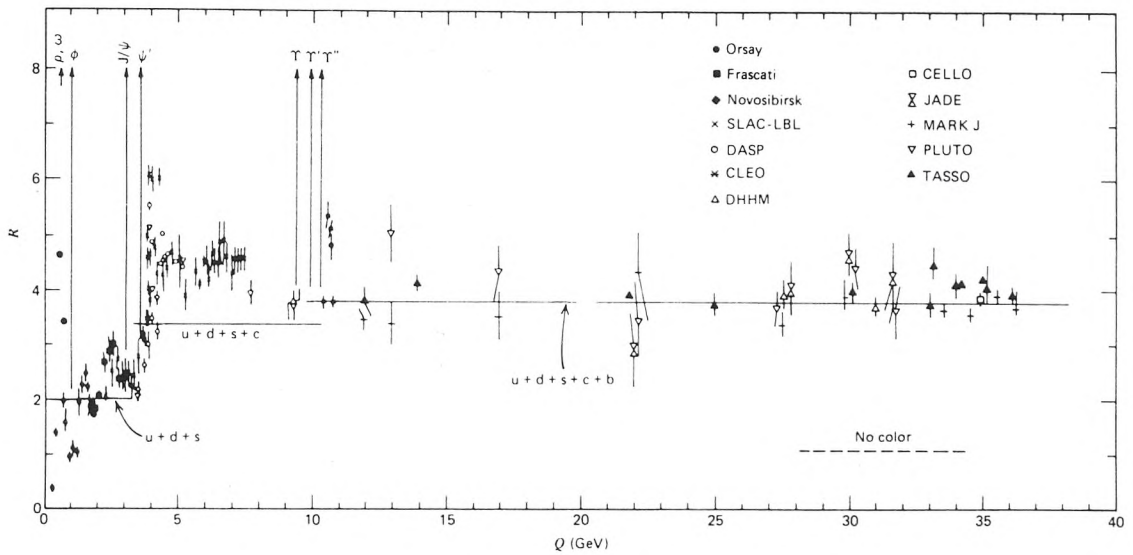
Figur 3. $\sin^2(\Theta)$ versus m_{top} for forskellige målinger med m_{Higgs} sat lig 200 GeV/c^2.

eksperimentelle måleusikkerheder er dette udsagn stadig korrekt. Desværre er dette et eksempel på et udsagn som kun eksperimentelt kan modbevises, aldrig bevises.

Standardmodellen forudsiger også, at en ladet lepton under udsendelse af en W-boson kan omdanne sig til en neutrino men kun til en neutrino fra samme familie. Anderledes forholder det sig med kvarkerne. Her kan en kvark med ladningen $+^2/_3$ omdanne sig til en bestemt linearkombination af kvarker med ladningen $-^1/_3$ under udsendelse af en W^+-meson. Disse linearkombinationer fremkommer formelt ved at multiplicere vektoren bestående af kvarker med ladningen $-^1/_3$ med en matrix kaldet Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-matricen. De 16 elementer i matricen er bestemt af tre drejningsvinkler og en fasevinkel.

Det har længe været kendt, at $\bar{K}^0$ mesonen, som er opbygget af en s-kvark og en anti-d-kvark, spontant kan omdanne sig til en K^0 meson, som er dannet af en anti-s-kvark og en d-kvark. Tilsvarende omdannelse er observeret for mesoner, hvor s-kvarken eller d-kvarken er udskiftet med en b-kvark. Sådanne mesoner kaldes henholdsvis B^0- og $B^0{}_s$-mesoner.

Man har yderligere observeret et lille såkaldt CP-brud mellem en K^0-meson og en $\bar{K}^0$-meson. CP er den kombinerede ladningskonjugation (partikel → antipartikel) og paritets (spejlings) operator. Med andre ord; i modsætning til hvad der almindeligvis er antaget, er der forskel på stof og antistofs måde at vekselvirke på . Dette er indtil videre det eneste sted, en sådan forskel er observeret. Standardmodellen forklarer CP-bruddet ved hjælp af fasevinklen i CKM-matricen og forudsiger derfor også et CP-brud for B^0-mesoner. Da effekten er lille, vil det kræve en kraftig forøgelse af LEP's luminositet at observere dette ved LEP.



Figur 4. Forholdet mellem tværsnittet for produktion af hadroner i elektron-positron sammenstød og tværsnittet for myon produktion.

Luminositeten er et mål for antallet af mulige sammenstød. Andre muligheder er bygning af nye acceleratorer f.eks. en såkaldt *b*-fabrik eller LHC, se senere.

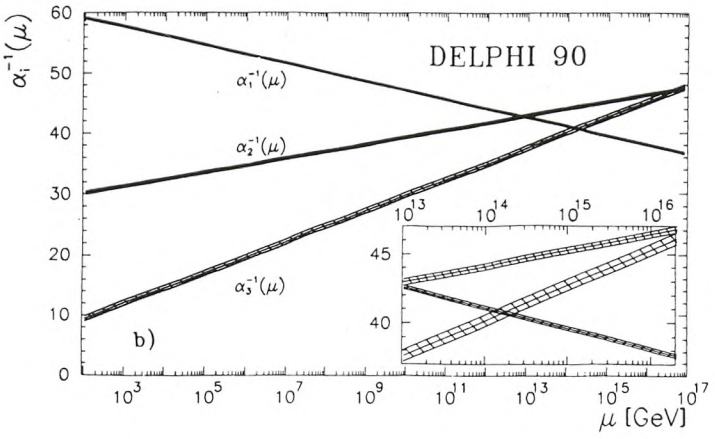
Higgs-bosonens vekselvirkning med sig selv skaber problemer for Standardmodellen. En måde at løse dette på er, at indføre en ny partikel svarende til hver af de allerede kendte partikler, de såkaldte super-symmetriske partikler. Ingen af disse er observeret, så der er endnu intet eksperimentelt bevis på, at dette er den rigtige vej frem. De nye grænser for top-kvarkens masse giver grænserne $m_H > 41\ \mathrm{GeV}/c^2$ for den CP-lige neutrale Higgs og $m_A > 20\ \mathrm{GeV}/c^2$ for den CP-ulige tilstand. Ellers finder man, at de øvrige supersymmetriske partikler alle har en masse større end ca. $45\ \mathrm{GeV}/c^2$. Større energi og flere eksperimentelle begivenheder vil kunne bringe disse grænser op.

En vigtig egenskab af QCD er eksistensen af de tre forskellige ladninger eller farver. Oprindelig var man nødt til at indføre farver p.g.a. en baryon kaldet Δ^{++}. Den er opbygget af tre *u*-kvarker, med parallelt spin og uden angulært moment mellem dem. En sådan tilstand er umulig, da kvarkerne er i samme kvantetilstand, medmindre de hver har yderligere en egenskab, f.eks. forskellig "farve". En eksperimentel observation af de tre farver kommer fra en måling af *R*, som er vist i figur 4. *R* er forholdet mellem tværsnittet for produktion af hadroner i elektron-positron sammenstød og tværsnittet for myon produktion. Dette forhold er lig summen af kvadratet på ladningerne af alle de forskellige kvarker, som kan produceres. Den eneste mulige forklaring af resultaterne er, at ladningerne er som i tabel 1 altså trediedels, og at der findes tre slags af hver type. Mere deltaljerede beregninger giver korrektioner til dette forhold, som er proportionale med α_s. En anden mulighed for at måle α_s kommer fra forholdet mellem antallet af begivenheder med tre og to jetter, som er proportionalt med α_s.

En elektrisk ladning vil polarisere vakuummet omkring sig ved at danne virtuelle ladningspar, som er orienterede, så ladninger med modsat fortegn vender mod den oprindelige ladning og derved afskærmer den. Den effektive ladning måles ved påvirkningen af en testladning. Styrken af denne påvirkning vil afhænge af afstanden på en måde, der er forskellig fra en situationen uden polarisering. For QED finder man, at den effektive ladning eller α øges, når afstanden formindskes eller når energien øges, idet mindre afstande svarer til større energier.

For de stærke vekselvirkninger, QCD, er det omvendt. Her mindskes α_s med stigende energi. Dette forklares ved, at gluonerne tiltrækker hinanden og derfor ikke spredes, som det er tilfældet med fotoner. Der dannes en streng. At α_s øges, når afstanden øges, er derfor også forklaringen på, at kvarker ikke er observeret som frie partikler. Ved at sammenligne målinger af α_s ved små og ved store energier har man fundet den forventede variation, som i Standardmodellen er en logaritmisk afhængighed. Der spekuleres ofte på om de forskellige α'er bliver ens ved en højere energi, som det forudsiges af GUT-teorien, Grand Unified Theory. Figur 5 viser en logaritmisk ekstrapolation til højere energier[4]. De viste α-er er $\alpha_1 = 5 \cdot \alpha / (3 \cdot \cos^2(\Theta_W))$, $\alpha_2 = \alpha / \sin^2(\Theta_W)$, og $\alpha_3 = \alpha_s$. Det er muligt, at få kurverne til at krydse ved samme energi ved at indføre supersymmetriske partikler med en masse omkring 1 TeV. Teorien forudsiger størrelsen af et knæk i alle kurverne, kun stedet kan vælges "frit". Teorien forudsiger således at $\sin^2(\Theta_W)$ vil vokse fra knapt $^2/_8$ til $^3/_8$. GUT forudsiger også at protonen er ustabil. Dens levetid afhænger af ved hvilken energi kurverne krydser hinanden. Men krydspunktet sker ved så stor en energi, at den nuværende nedre grænse på 10^{32} år af protonens levetid respekteres.

Vinkelfordelingen af jetterne tillader en bestemmelse af gluonens spin. Specielt gør vinkelfordelingen af gluonerne i begivenheder, hvor der produceres to kvarker og to gluoner, det muligt at bevise, at en gluon kan dele sig i to gluoner. Noget tilsvarende er ikke muligt for en foton.



Figur 5. Ekstrapolation af α'er til højere energier, hvor $\alpha_1 = 5 \cdot \alpha\ (3 \cdot \cos^2(\Theta_W))$, $\alpha_2 = \alpha \sin^2(\Theta_W)$, og $\alpha_3 = \alpha_s$.

Næste generation af eksperimenter.

Med LEP-II øges energien så meget, at par af *W*-bosoner kan produceres. Ved at måle produktionstværsnittet som funktion af energien findes *W*-bosonens masse og levetid. Disse er givet i Standardmodellen, når de andre parametre er fastlagt. Sådanne målinger er derfor en test af denne. Samtidigt er vinkelfordelingen af de udsendte *W*-bosoner en kritisk test af Standardmodellen.

Der er netop i efteråret 1991 observeret en polarisation af LEP's stråler. Dette vil snart gøre det muligt at bestemme *Z*-bosonens masse med en præcision på 9 MeV/c^2. Mere udstyr er dog krævet for at kunne lave egentlige eksperimenter med polarisation. Sådanne eksperimenter er meget følsomme tests af Standardmodellen, og giver derfor de bedste målinger af teoriens parametre, herunder masser.

To meget væsentlige partikler, top-kvarken og Higgs-bosonen, mangler som nævnt at blive ''opdaget'', inden Standardmodellen kan betragtes som endeligt eftervist. Findes top-kvarken derfor ikke inden for det tidligere angivne masseinterval, er det et stærkt indicium for, at Standardmodellen allerede ved relativ lave energier ikke er korrekt. Er top-kvarkens masse mindre end 160 GeV/c^2, er det sandsynligt, at den vil blive set inden udgangen af 1999 af et af de to eksperimenter ved FNAL. Dog med relativ ringe statistik.

Udover de to ''opdagelser'' må man se efter effekter, som ikke forudsiges af Standardmodellen. For selvom modellen beskriver alle hidtidige observationer perfekt, er det muligt, at den bryder sammen, når et højere energiregime bliver undersøgt. Det er også muligt, at der findes mere end én Higgs-boson, og at kvarker og leptonerne, som vi i dag betragter som fundamentale, er sammensatte partikler. Men bindingsenergien mellem disse nye hypotetiske fundamentale partikler overstiger langt de kollisions energier, som vi med de nuværende acceleratorer har til rådighed.

De fleste af disse fænomener kan kun observeres, hvis man bygger en ny accelerator med langt højere kollisionsenergi. Ved CERN har man siden 1983 arbejdet på et projekt, hvor energikoncentrationen under partikelsammenstødene er tilstrækkelig stor til at producere nye partikler med masser helt op i 1 TeV/c^2 området. Projektet går under navnet Large Hadron Collider forkortet til LHC[2,3]. I den allerede eksisterende 27 km lange LEP tunnel er der tilstrækkelig plads til at placere en ny ring af superledende magneter ovenpå den allerede eksisterende elektron-positron kollider, LEP. Det er tanken at lade bundter af protoner cirkulere i to rør, således at protonerne i det ene rør bevæger sig i modsat retning af protonerne i det andet. Hver proton vil have en energi på 8 TeV, eller ca. 9 gange mere end der før har været til rådighed ved proton-antiproton kollideren på FNAL.

Få regner med, at Standardmodellen er den endelige teori, da den indeholder så mange parametre. I den minimale Standardmodel antages det, at neutrinoerne, gluonerne og fotonen alle er masseløse, og at der kun findes en Higgs-boson. Alligevel er der 18 frie parametre, som er:

- De seks kvarkmasser m_d, m_u, m_s, m_c, m_b og m_t.
- De tre leptonmasser m_e, m_μ og m_τ.
- Styrken eller ladningen af de tre vekselvirkninger udtrykt f.eks. ved α , α_s og G_F
- Massen af Z^0-bosonen.
- Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-matricens tre drejningsvinkler og ene fasevinkel.
- Massen af Higgs-bosonen m_H.

Vi har ingen forståelse af de store masseforskelle mellem de 3 familier af fermioner. Endvidere er der et alvorligt hierarki problem, hvis man prøver at integrere Standardmodellen i en mere omfattede teori, hvor enhedsladningerne for de elektromagnetiske-, de svage- og de stærke vekselvirkninger optræder mere naturligt. I sådanne teorier bliver masseskalaen, vi kender i Standardmodellen, pludselig unaturlig lille, hvis man opretholder den simple Higgs mekanisme. Endelig er det fra et rent teoretisk synspunkt svært at tro på, at partikler, der som Higgs-partiklen har spin 0, eksisterer som fundamentale partikler. Derimod er der intet, som udelukker, at de reflekterer eksistensen af to tæt bundne spin $^1/_2$ partikler og dermed ukendt fysik. Motivationen for LHC er derfor:

- Søgen efter top-kvarken.
- Søgen efter Higgs-partiklen og undersøgelse af de fysiske mekanismer associeret med det af Higgs-partiklen skabte symmetribrud.
- Søgen efter den forventede nye fysik nær den såkaldte Fermi energi, der approksimativt er 300 GeV, og hvor det forventes, at de svage vekselvirkninger bliver stærke og derfor vil give os information om afvigelserne fra den simple Standardmodel.
- Søgen efter *B*-mesonernes CP-brud.
- Andre muligheder, som er ikke er blevet omtalt her, er dels studiet af sammenstød mellem tunge ioner og dels mellem LEP's elektroner og LHC's protoner.
- Søgen efter det uventede!!!

Referencer.

1) D.Decamp et al. (The ALEPH collaboration) *Improved Measurement of Electroweak Parameters from Z-decays into Fermion pairs.* CERN-PPE 91-105.
2) John Renner Hansen *LHC. Fremtidens elementarpartikelfysik-laboratorium* KVANT **2** nr.1, 13 (1991).
3) *Design Study of the Large Hadron Collider (LHC)* CERN 91-03
4) U. Amaldi, W. de Boer og H. Fürstenau: *Comparison of Grand Unified Theories with electroweak and strong coupling Constants measured at LEP.* CERN-PPE 91-44.



Jørn Dines Hansen er docent ved Niels Bohr Institutet, var fra 1965 til 1973 ansat som research physicist ved CERN afbrudt af en periode som research assistent professor ved universitet i Urbana, Illinois fra 1970 til 1972, ansat som følgeforskningsstipendiat ved Niels Bohr Institutet fra 1973 til 1977, herefter lektor indtil udnævnelsen som docent i 1991. Leder nu gruppen, der arbejder på LEP eksperimentet ALEPH.