

Foreningen af naturens kræfter længe efter Ørsted

Kristján Gulbrandsen, Troels C. Petersen og Børge Svane Nielsen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Ligesom Ørsteds opdagelse af elektriske strømme indflydelse på magnetnåle og de efterfølgende mange års eksperimenter førte til en indsigtsgivende matematisk forståelse af elektromagnetismen, har vi i årtier arbejdet inden for partikel- og kernefysik på at beskrive og forstå, hvordan de fire kendte naturkræfter kan sættes på de samme formler. Eksperimenterne ved LHC-acceleratoren ved CERN har givet os et væld af nye data, som både har cementeret den gængse Standardmodel for partikler og kræfter, og samtidig lagt grundlaget for at se videre ind i det hidtil ukendte. Vi skriver i denne artikel om landvindinger i forståelsen af en ny stoftilstand, kvark-gluon-plasma, og om status og implikationer af udforskningen af Higgs-bosonen.

Fra Ørsted til de fire naturkræfter

Da H. C. Ørsted i 1820 endelig, efter flere måneders tøven, satte sig for at undersøge den effekt, han havde noteret sig tidligere, nemlig at elektriske strømme havde en indflydelse på en magnetnål, tog han det første skridt imod at forstå alle naturens kræfter ved hjælp af en samlet formalisme [1]. Der var lang vej herfra til nutidens store spørgsmål inden for partikelfysikken, men første skridt var taget. I dag har vi en anderledes matematisk og kompliceret forståelse, som i mellemtiden er beriget med helt nye begreber som elektromagnetiske bølger, relativitetsteori og kvantemekanik, men vi slås stadig med at beskrive den kendte verden med så få begreber som muligt. Vi vil i denne artikel beskrive nogle af tidens vigtigste eksperimentelle bidrag til en sådan samlet beskrivelse i nyere partikel- og kernefysik.

På Ørsteds tid havde man i over et århundrede kendt Newtons utroligt indsigtfulde beskrivelse af tyngdekraften som en tiltrækning imellem to tunge legemer, som var rettet langs en linje imellem legemerne og med en styrke, som aftog med kvadratet på afstanden. Dette var en simpel læresætning, som jo virker helt til i dag, når man lige husker at medtage effekter fra den generelle relativitetsteori. Det kom derfor som lidt af et chok, da først Ørsted og siden mange andre indså, dels at elektriske strømme udstråler et magnetfelt, og dels at dette ikke opfører sig som dannet af en punktkilde eller en samling af sådanne. Kraften var rettet vinkelret på den strømførende ledning og altså ikke rettet mod punkter på ledningen. Det blev efterhånden klart, at man stod sig bedst ved at indføre et feltbegreb, som betød, at hele verdensrummet skulle gennemsyres af de lidt svært forklarlige felter, som kunne vekselvirke med materielle stoffer, såsom elektroner i en ledning eller et vakuumrør. Felterne kunne oven i købet vekselvirke med sig selv, således at elektriske felter havde en indflydelse på magnetiske felter og vice versa.

Siden de elektromagnetiske felters århundrede i 1800-tallet og indførelsen af relativitetsteorien og kvantemekanikken i 1900-tallet, har vi bygget en teori op, som kan forklare ikke bare de elektromagnetiske kræfter i en moderne kvantefeltteori, men også de nye kræfter, vi har lært at kende fra den atomare verden, nemlig de stærke og svage kernekræfter. Den stærke kernekræfter er nødvendig for at forklare, hvordan pro-

toner og neutroner kan holdes sammen i atomkerner uden at disse bliver revet itu af de frastødende elektriske kræfter imellem protonerne. Den svage kernekræfter er indført for at beskrive, hvordan radioaktive henfald sker med omdannelse af en type partikler til andre (fx neutroner til protoner). Som antydning i ordvalget, er den stærke kernekræfter meget stærkere end den elektromagnetiske på de afstande, der findes i atomkerner, mens den svage kernekræfter er flere millioner gange svagere og kun virker ved utroligt korte afstande.

Ligesom for elektromagnetismen er meget forskning gået ind i at beskrive hver af de fundamentale kræfter eksperimentelt og at udvikle teorier for dem. Da teorierne alle er bygget op som kvantefeltteorier, har man også brugt mange kræfter på at lave beskrivelser, som udnytter lighederne i de individuelle teorier til at knytte dem sammen i fælles beskrivelser. Dette er i høj grad inspireret af Maxwells flotte matematiske opstilling i fire ligninger, som beskriver sammenhængen imellem elektriske og magnetiske felter og elektriske ladninger, og dermed ikke kun sammenskriver Ørsteds og andres observationer, men også beriger vores viden med nye begreber, såsom elektromagnetiske bølger. Den samlede beskrivelse af de elektromagnetiske og svage vekselvirkninger kaldes den "elektrosvage teori". Den såkaldte Standardmodel forudså eksistensen af to nye tunge partikler for at forklare den meget korte rækkevidde af de svage kernekræfter. Fundet af W- og Z-partiklerne bekræftede på smuk vis denne teori, ligesom opdagelsen af Higgs-bosonen i dette årtusinde understregede, at vi er på rette spor. Det gav os også mod til at forsøge at inkludere de sidste to kræfter, den stærke kernekræfter og tyngdekraften, i familien af 'forenede' kræfter, på trods af klare forskelle i deres måde at udtrykke sig på. Den stærke kernekræfter er allerede beskrevet ved en kvantefeltteori kaldet QCD (Quantum Chromo Dynamics), mens tyngdekraften er beskrevet ved den almene relativitetsteori, men ikke har en beskrivelse i kvanteverdenen.

I Maxwells ligninger indgår elektriske og magnetiske felter samt elektriske ladninger, men som bekendt ikke magnetiske ladninger. Partikler med masse indgår heller ikke, da massebegrebet tilhører en anden begrebsverden, der følger Newtons love. I kvantefeltteorier indgår der dog et energibegreb, og der kommer så yderligere det til, at bølger i visse situationer må

beskrives som partikler, og at kræfterne imellem partikler må opfattes som energi-kvanter, der udveksles. Vi siger, at kræfterne bæres af partikler. I tilfældet elektromagnetisme er det den masseløse foton, der er den kraftbærende partikel. For svage kernekræfter er det de tunge W- og Z-bosoner, mens de stærke kernekræfter er resultatet af udveksling af gluoner. Der er ligheder, men også væsentlige forskelle på disse kræfter på trods af den fælles underliggende kvantefeltteori.

Vi skal i det følgende beskrive egenskaberne ved først de stærke kernekræfter og siden de elektrosvage vekselvirkninger og vise, hvorledes begge områder stadig udfordrer os eksperimentelt. Hvor langt er vi i vores viden, og hvad mangler vi at forstå? Vi vil også se på hvilke eksperimentelle landvindinger, vi kan forvente i de næste årtier.

Aktuel forskning i den stærke kernekraft.

Den stærke kernekraft ytrer sig ved, at den binder bestanddelene af visse partikler (kaldet kvarker) sammen i fx protoner og neutroner. Den er desuden (og det var oprindeligt årsagen til at indføre den) ansvarlig for at holde protoner og neutroner sammen inde i en atomkerne på trods af en meget betydelig elektrisk frastødning imellem protonerne. Af den grund kalder vi den for "den stærke kernekraft", da den er ca. 100 gange stærkere end den elektromagnetiske kraft, når afstanden er på størrelse med en atomkerne.

Den stærke kernekraft er beskrevet ved en teori, vi kalder kvantekromodynamik, QCD. Ligesom fotonen i kvanteteorien for de elektromagnetiske kræfter udgør den partikel, der overfører kraften mellem positivt og negativt ladede partikler, findes der en kraftbærer for den stærke kernekraft, som kaldes en gluon. Analogt til den elektriske ladning for elektromagnetismen, har den stærke kraft en "farve"-ladning. Det kaldes "farve", fordi der findes tre typer ladning (rød, grøn og blå) snarere end én som for elektromagnetismen. Valget af ordet "farve" er inspireret af de tre primærfarver. En yderligere og dybtgående forskel mellem elektromagnetisme og den stærke kernekraft er, at gluonerne selv har "farve", mens fotoner er elektrisk neutrale. Det betyder, at mens fotoner ikke direkte kan interagere med hinanden, påvirker gluoner hinanden i høj grad. Dette giver anledning til mange yderligere interaktioner, der igen gør den stærke kraft til det, den er, nemlig meget stærk. Figur 1 viser kraftlinjerne mellem to tiltrækkende elektriske ladninger og to tilsvarende farveladninger. Kraftlinjernes tæthed er meget højere mellem to farveladninger, og de laver et "farve-rør" mellem ladningerne. Tætheden falder aldrig langs røret mellem ladningerne, og det betyder, at der er en konstant kraft uafhængigt af afstanden imellem ladningerne. Energien, der skal til for at adskille de to ladninger, vokser lineært med afstanden og overskrider til sidst hvilemassen af to kvarker. Når det sker, produceres et nyt kvark-antikvark-par, der forbinder sig til to farveløse systemer bestående af kvarker. Det oprindelige farve-rør opløses, og der dannes to nye. På grund af dette fænomen kan enlige kvarker (uden andre kvarker omkring sig inden for afstande på størrelse af

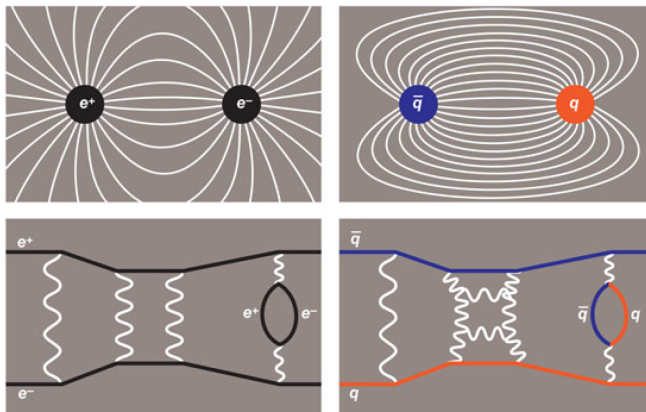
en proton) ikke findes i naturen. Dette træk ved den stærke kraft kaldes "indespærring" (confinement). Til gengæld vil kvarker, der er meget tæt på hinanden, vekselvirke relativt svagt, fordi der ikke er "plads" til så mange gluoner. Vi kalder det "asymptotisk frihed". Opdagelsen heraf vandt en Nobelpris i 2004.

Teorien om kvantekromodynamik har været meget succesfuld til at beskrive den stærke kraft. Det er en matematisk kompliceret teori at håndtere, og nøjagtige løsninger er ikke mulige. For at studere de grundlæggende vekselvirkninger imellem kvarker, kan man imidlertid anvende perturbationsteori, som også kendes andre steder, når man skal beregne ting i kvantemekanikken, som ikke kan løses analytisk. I perturbationsteori tilnærmer man systemet til et, hvor man kender en nøjagtig løsning, hvorefter man kan tilpasse sine løsninger iterativt med stadig mindre rettelser. Igennem det sidste halve århundrede er mange parametre, der involverer de grundlæggende vekselvirkninger mellem partikler, blevet målt i eksperimenter til ekstrem høj præcision, og sammenligning med de tilsvarende beregninger ud fra teorien har hidtil bekræftet dens nøjagtighed. Kvantekromodynamik er derfor en veletableret beskrivelse af den stærke kernekraft.

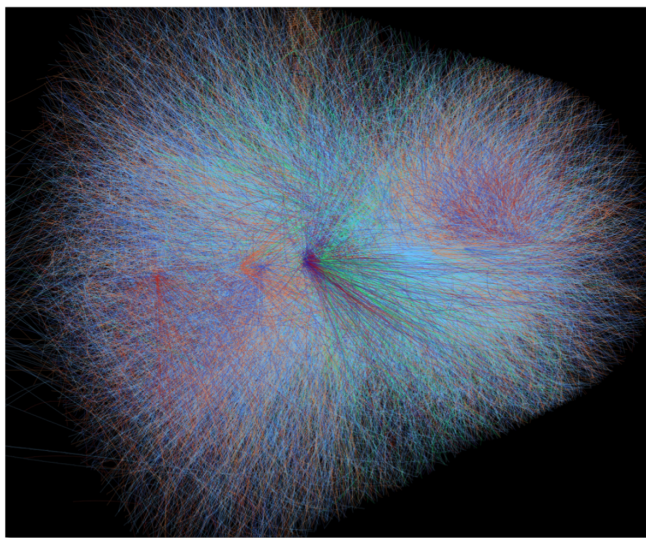
Der findes dog en komplikation med teorien, når man ønsker at studere kollektiv opførsel af mange partikler, der vekselvirker via den stærke kernekraft. Den kollektive adfærd har stor interesse, da det var den måde, universet tog sig ud kort tid efter Big Bang, og en forståelse af den kan kaste lys over den videre udvikling af universet. Fænomenerne involverer imidlertid generelt et stort antal vekselvirkninger med små impulsoverførsler. I dette tilfælde mislykkes perturbationsteorien, idet de mange små perturbationer tilsammen bliver så store, at forudsætningerne for beregningerne bryder sammen. Der findes dog en anden metode at udføre disse beregninger på, men det indebærer enorme mængder computerkraft. Derfor forenkler man ofte teorien, når man vil beskrive de kollektive effekter. Forenklingerne giver anledning til unøjagtigheder, men de giver trods alt forudsigelser, som kan sammenlignes med eksperimenter.

For at studere fænomenerne i det tidlige univers her på Jorden, skal stof komprimeres, så afstandene mellem kvarkerne er kortere end den længde, der skal til for at bryde "farve-røret". Vi skal ind i regimet for asymptotisk frihed, hvor man kan opfatte stoffet som en kvark-gluon-suppe snarere end en samling af protoner og neutroner. Det opnås ved at kolliderer tunge ioner af fx bly sammen med næsten lysets hastighed. Den resulterende kollision producerer et medium med en ekstrem høj energitæthed bestående af kvarker, der interagerer via et meget stort antal gluoner. Når det er skabt, udvider mediet sig meget hurtigt og bliver hurtigt mindre tæt. Når tætheden når under et vist niveau, produceres der igen "farveløse" partikler, som vi kan se i vores detektor – såsom protoner og neutroner, men også mange andre partikler. Idet mediet ekspanderer fra den supertætte kvark-gluon-suppe til at blive normalt stof, gennemgår det en række trin, som vi ikke kan følge i detaljer, men nogle observerbare størrelser indehol-

der trods alt information om det supertætte mediums kollektive opførsel. Således kan vi bruge forekomsten af forskellige partikler og deres impuls og rumlige fordeling til at udtrække information. Det er derefter op til eksperimenterne at måle disse størrelser.



Figur 1. Kraftlinjer dannes mellem (venstre) tiltrækkende elektriske ladninger og (højre) farveladninger. Kraftlinjerne ligger meget tættere mellem farveladningerne, hvilket resulterer i et farverør imellem farveladningerne. Den høje tæthed af linjer skyldes de ekstra vekselvirkninger mellem gluonerne, fordi disse har farveladning – i modsætning til fotoner, der er elektrisk neutrale (vist nederst) [2].



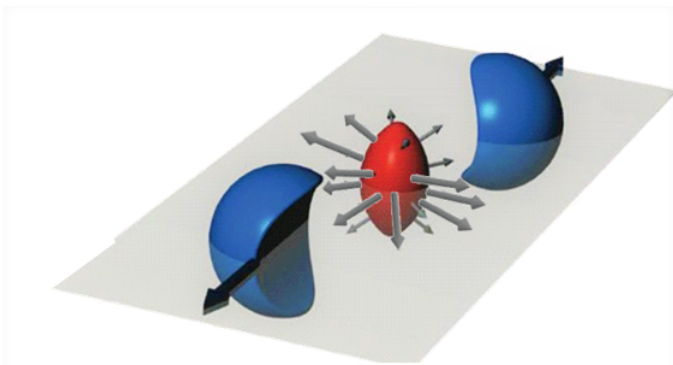
Figur 2. Simulerede partikelspor, der dannes i fire samtidige tungionskollisioner. Stort set alle disse partikler skal måles, så man kan beregne deres impulser og hastigheder.

For at gøre det skal man i sine eksperimenter med tungionskollisioner identificere så mange som muligt af de partikler, der skabes i sammenstødet som efterfølgere af det ekspanderende medium. Det kræver meget komplekse detektorer med ekstremt høj rumlig opløsning og en måde, hvorpå man kan måle partiklernes impuls og hastighed. Et eksempel på en sådan detektor er ALICE-detektoren ved LHC-acceleratoren ved CERN. Her er vi i stand til individuelt at identificere banerne på ca. 20.000 partikler i en enkelt kollision som vist i figur 2. Derudover skal der registreres en masse sammenstød, så man kan analysere målingerne statistisk. Da kollisionerne forekommer med høj rate,

skal detektoren også være i stand til at adskille hvilke partikler, der kom fra forskellige kollisioner, men efterlod et spor i detektoren på samme tid.

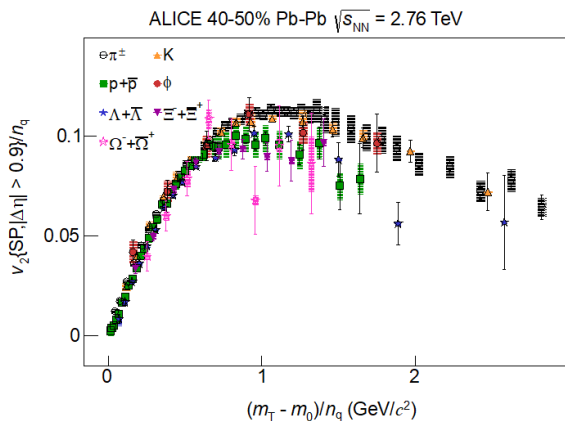
Ved at studere partiklerne, der strømmer ud fra kollisioner af tunge ioner, kan en række observable konstrueres, der relaterer til den oprindelige kollision. Simple målinger såsom blot at tælle antallet af partikler, der blev skabt, tillader én at vurdere den energitæthed, der blev nået i det lille kollisionsvolumen. Man finder, at det er ekstremt varmt – 100.000 gange varmere end i Solens indre. Fra QCD-beregninger ved vi, at dette bør være varmt nok til at smelte normalt kernestof til et plasma af sine bestanddele – kvarker og gluoner. Denne nye tilstandsform af kernestof kalder vi et kvark-gluonplasma (QGP) [3].

Når kvark-gluon-plasmaet er skabt, får det indflydelse på dannelsen af det endelige partikelstof, der detekteres som bundne tilstande af kvarker og gluoner (i form af eksotiske versioner af protoner og neutroner). Visse partikler, der består af svagt bundne kvarker, er vanskeligere at danne. Derfor giver den relative mængde af hver observeret partikel os mulighed for at bestemme plasmaets kvark-sammensætning.



Figur 3. Skematisk fremstilling af to kolliderende, tunge ioner. Stoffet i det røde, mandelformede overlap udøver et større tryk i det vandrette plan, hvor det er mest sammenpresset, og skubber derved partiklerne ud i den retning med højere hastighed.

Når man har skabt et plasma, bør der eksistere trykgradienter fra samspillet mellem partiklerne. Disse vil presse hårdere på partikler i retninger, hvor trykket er højt (se figur 3). Resultatet er en asymmetri i vinkelfordelingen af partiklerne på vej ud af kollisionen. Man kan måle denne asymmetri (karakteriseret ved en parameter kaldet v_2) som en funktion af den transverse kinetiske energi (kinetisk energi i retning vinkelret på retningen af de kolliderende ioner) af partiklerne på vej ud af kollisionen, og man finder en voksende tendens. Sådanne afhængigheder viser, at der findes en trykgradient, hvilket igen viser, at vi har at gøre med et interagerende stof (en væske snarere end en gas). Hvis man yderligere ser på de forskellige partikeltyper og plotter v_2 divideret med antallet af kvarker i disse, finder man en universel kurve for alle partikeltyper (se figur 4). Dette giver bevis for, at trykgradienten virker på kvarkerne og ikke kun på de resulterende protoner registreret i eksperimentet. Sådanne målinger tillader én at udtrække viskositeten af kvark-gluon-plasmaet.



Figur 4. Et mål for ellipticitet (v_2) per kvark versus den transverse kinetiske energi per kvark. Det ses, at alle de producerede partikler har den samme afhængighed ved lave, transverse kinetiske energier per kvark, hvilket peger på, at partiklerne blev dannet ved sammensmeltning af kvarker med nogenlunde samme hastigheder [4].

Den elektrosvage kraft og Standardmodellen.

Ørstedes opdagelse af sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme gav sammen med Faradays lov ophav til, hvad der skulle blive til Maxwells fire ligninger. Disse ligninger indeholder en smuk symmetri, som binder elektricitet og magnetisme sammen på fornemteste vis. Det skulle vise sig efter kvantemekanikkens opdagelse, at Maxwells ligninger "kun" er en approksimation til det, man kalder kvanteelektrodynamik, helt ligesom Newtons love er en approksimation til deres relativistiske modstykke.

Kvanteelektrodynamikken (QED) er en næsten fabelagtig teori, som giver ophav til helt utroligt præcise forudsigelser. For eksempel kan man nu ved hjælp af QED beregne elektronens magnetiske moment (udtrykt som dimensionsløs g-faktor) med 13 decimalers nøjagtighed: 2,002 319 304 363 3. Hvis en elektron blot eksisterede "alene", ville tallet have været præcis 2, som forudsagt af Dirac, men pga. kvantemekanik kan elektronen udsende en virtuel foton, som den så opfanger igen. Det ændrer dens magnetiske moment med omkring $\alpha/2\pi$, hvilket er ca. 1/1000, det såkaldte anomale magnetiske dipolmoment (AMD). Ved at tage højere og højere-ordens korrektioner er man kommet frem til en utrolig forudsigelse af AMD.

Men det virkelig fantastiske er, at forudsigelsen stemmer overens med den lige så præcise måling!

Forudsagt: 0.001 159 652 181 64(76) [5]

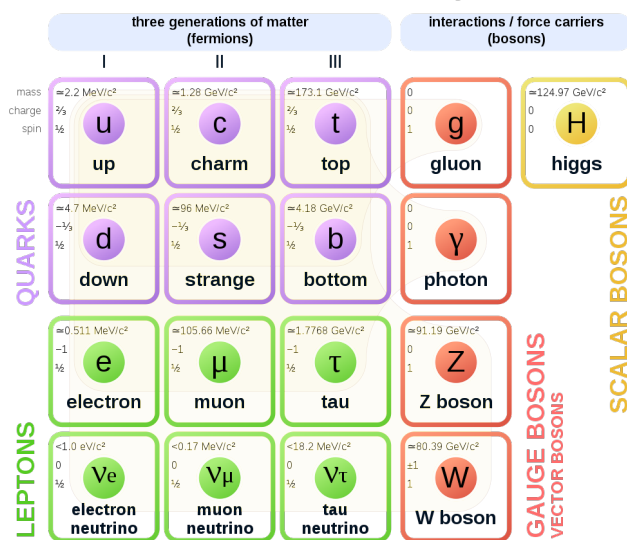
Måling: 0.001 159 652 180 91(26) [6]

Når man har en teori, som korrekt kan forudsige fysiske størrelser med 13 decimalers nøjagtighed, ja, så har man nok fat i den lange ende. Og derfor står QED som en af fysikkens absolutte triumfer.

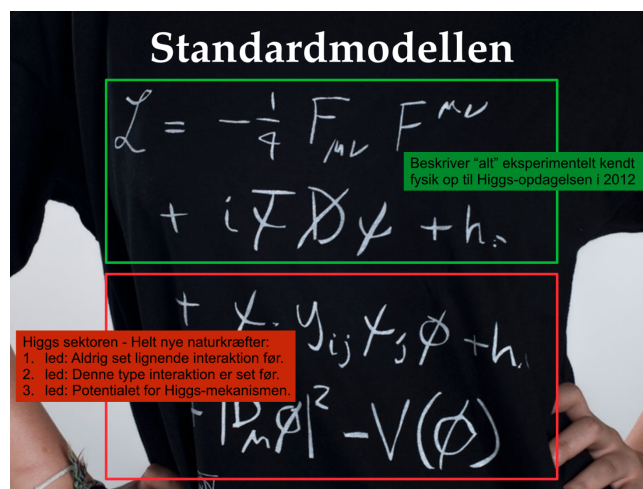
I foregående afsnit beskrev vi, hvordan den stærke kernekraft ligesom QED kan beskrives ved en kvantefeltteori, QCD. Det var derfor oplagt at se, om den svage kernekraft, som blev studeret indgående i 1950'erne og 1960'erne, kunne formuleres med samme formalisme. Det ikke bare lykkedes, men det har vist sig, at Ørstedes og Maxwells gode gamle elektromagnetisme

og den svage kernekraft rent faktisk er to sider af samme sag. De to kræfter kan matematisk forenes, ligesom Ørsted i sin tid havde bidraget til elektricitetens og magnetismens forening. Det fik Weinberg, Glashow og Salam Nobelprisen for i 1979, og i 1983 fandt CERN så de forudsagte W- og Z-bosoner, som er den svage kernekrafts pendant til fotonen og gluonen. Sammen med kvarkerne indgår disse bosoner herefter i Standardmodellen (SM) for partikelfysik. En samlet oversigt over Standardmodellens partikler findes i figur 5.

Standard Model of Elementary Particles



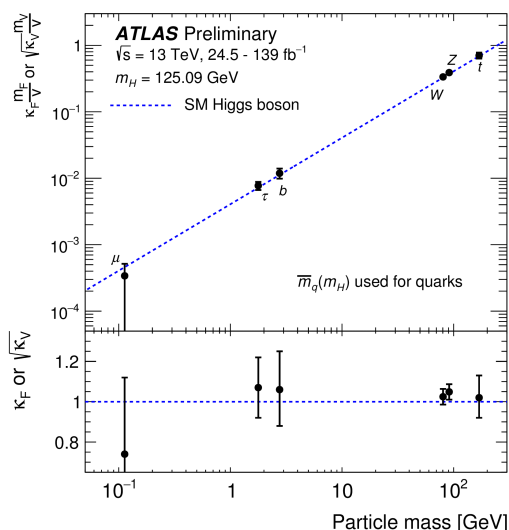
Figur 5. Partiklerne i Standardmodellen. Kvarkerne (som protoner og neutroner er opbygget af) er farvet lilla, mens leptonerne (fx elektronen) er grønne. Disse er alle stofpartikler (fermioner). I rødt finder vi kraftpartiklerne (bosonerne), hvor gluonen repræsenterer den stærke kernekraft, fotonen den elektromagnetiske kraft og W- og Z-partiklerne den svage kernekraft. Sidst, men ikke mindst, finder vi Higgs-bosonen i gult, som falder lidt uden for kategori [7].



Figur 6. Standardmodellens Lagrangefunktion skrevet i meget kompakt form. Det første led er i realiteten 16 formler (idet indekserne μ og ν antager værdierne 0, 1, 2 og 3), hvoraf en af de fire diagonale indeholder Ørstedes lov. Som det kan ses, er udvidelsen med Higgs-mekanismen ret signifikant, og den er stadig under udforskning.

De tre led i Higgs-sektoren af Standardmodellens Lagrangefunktion svarer til hhv. Higgs-partiklens vekselvirkning med stofpartikler (kvarker og leptoner), med W- og Z-partiklerne og sidst, men ikke mindst, med sig selv! Det første led er af en helt ny slags og aldrig set før. Det er nærmest som at have opdaget en femte naturkraft, som giver stofpartiklerne masse. Derfor er selve eksistensen af Higgs-partiklen med de forudsagte vekselvirkninger så vigtig.

Efter selve opdagelsen af Higgs-partiklen i 2012 var det vigtigt at fastslå, at den faktisk kan tilskrives Higgs-mekanismens beskrivelse af partiklernes masse. Der er en meget simpel forudsigtelse, nemlig at Higgs-partiklen kobler proportionelt med partiklernes masse. I ATLAS-eksperimentet ved LHC arbejdes der på at teste, i hvor høj grad dette er tilfældet. Det kræver så præcise målinger som muligt af så mange forskellige henfald af Higgs-partiklen som muligt. Det foreløbige resultat kan ses opsummeret i figur 7. Som det kan ses, så stemmer det overens, men mere data vil kunne udfordre forudsigtelsen med større præcision.



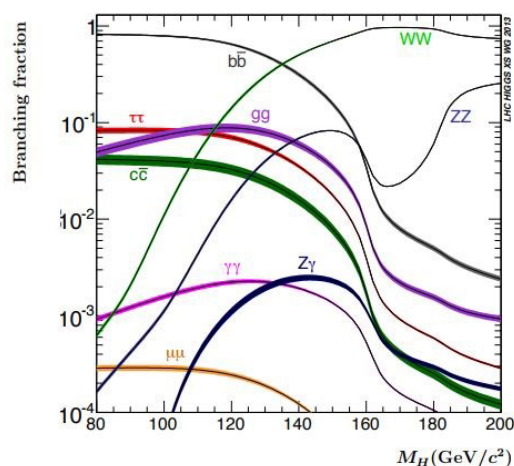
Figur 7. Plottet viser forskellige partiklers kobling med Higgs-partiklen versus deres masse. Hvis Higgs-mekanismen fungerer som forudsagt, bør der være en lineær relation mellem disse, hvilket synes at være tilfældet [8].

Standardmodellen kommer med meget præcise forudsigelser for, hvordan Higgs-partiklen selv skal henfalde (se figur 8), og hvor stærkt den kobler (dvs. interagerer) med de forskellige partikler. Til stor glæde for partikelfysikere har naturen valgt, at Higgs-partiklen har en masse på 125 GeV, hvilket resulterer i, at den kan henfalde på mange forskellige måder. Eksperimenterne viser igen, at forudsigelserne passer så godt, som vi er i stand til at måle. Dog må vi væbne os med tålmodighed, før vi vil få statistik nok til at måle de meget sjældne henfaldsmåder.

Det er i sig selv meget underligt, at Higgs-partiklen har denne masse, idet man teoretisk set umiddelbart skulle have forventet noget, som måske var en faktor 10^{13} større! Hvorfor det? Fordi Higgs-partiklens masse iflg. teorien får bidrag via kvantemekanik ved højere

energier, hvormed energier ved Planck-skalaen (10^{19} GeV) skulle give en langt højere masse. Men det har den ikke, og man står derfor tilbage med en følelse af, at der foregår noget endnu ukendt. Som om et eller andet princip sørger for, at disse bidrag på en eller anden måde modvirker hinanden.

Et bud på et sådant princip er Super Symmetri (SUSY). Ligesom alle partikler har en antipartikel, så kunne de også have en supersymmetrisk partner, hvor rollerne mellem stofpartikler og kraftpartikler er byttet rundt. Da disse bidrager til Higgs-massen med modsat fortegn, vil de have evnen til at modvirke hinanden. SUSY forudser dermed mange nye partikler, hvor den letteste evt. også kunne udgøre det mørke stof, som vi også ved eksisterer i universet, men som Standardmodellen heller ikke kan forklare! Vi har dog ikke set nogen tegn på SUSY endnu, og derfor forbliver dette blot en idé.



Figur 8. Beregning af Higgs-partiklens andel af henfald ("Branching fraction") som funktion af dens masse. Med den nu kendte masse på omkring 125 GeV findes mange forskellige henfald, der kan testes i eksperimenter.

LHC i endnu to årtier.

Som det fremgår ovenfor, er der kommet et væld af resultater ud af LHC's første ti leveår [9], som i alle henseender understøtter Standardmodellen og dens forudsigelser om sammenhængen imellem de fire fundamentale kræfter i naturen. Vi er kommet langt siden Ørstedes dage. Man kan så måske undre sig over, at man planlægger at fortsætte med LHC i endnu to årtier, men det er der rigtig gode grunde til. Ydermere har man et stort anlagt upgrade-program under opsejling, som skal øge antallet af partikelkollisioner med en faktor fem i forhold til nu. Det vil betyde, at når vi når hen i 2030'erne, vil den nuværende datamængde kun udgøre ca. 5%. Der er gode grunde til ikke at stoppe, hvor vi er.

Vi har antydnet ovenfor, at der er væsentlige dele af Standardmodellen, som vi endnu ikke kan teste, fordi vi ikke har tilstrækkeligt med data. Der er også forhåbninger om, at man ved at bore rigtig dybt kan finde små revner i modellen, som afdækker nye fænomener og en bedre forståelse af verden. Her kan blot nævnes muligheden for at observere nye partikler, som kan forklare naturen af mørkt stof, ligesom vi

allerede har nævnt SUSY som en vigtig udvidelse af Standardmodellen.

Det sidste led i figur 5, som repræsenterer Higgs-bosonens vekselvirkning med sig selv, er vigtigt for endeligt at kunne fastslå rigtigheden af Standardmodellens Lagrange-funktion. Det har vi stadig ikke kunne udforske eksperimentelt, idet det kræver meget mere data end LHC-acceleratoren hidtil har leveret. Med tyve gange mere data fra LHC vil det formentlig blive muligt at teste, om dette led også har sin realitet i virkeligheden. Også med Higgs-partiklens henfaldsmåder har vi stadig lang vej. De henfald, vi hidtil har studeret med præcision, svarer til dem, der i figur 6b ligger over 10% i branching fraction. Vi nærmer os kun lige 1%-niveauet, og vi vil meget gerne meget længere ned. Derfor vil vi gerne tage så meget data som overhovedet muligt og dermed undersøge alle Standardmodellens facetter og få præcise forudsigelser for stort set alle dele af partikelfysikken.

Selv om Standardmodellen kan virke kompliceret, er det på mange måder den simplest mulige model, vi kan forestille os med vores nuværende kendskab til partikler og kræfter. Det kunne dog sagtens tænkes, at der eksisterer både flere Higgs-partikler og flere W'er og Z'er, uden at Standardmodellen som sådan bryder sammen. Det vil umiddelbart komplicere sagerne, men det kunne måske også give indsigt i, hvad der skal til for at simplificere sagerne igen. Flere data er nødvendige.

Der er også mange ubesvarede spørgsmål omkring de stærke kernekræfter og kvark-gluon-plasma. Plasmaet er en hidtil ukendt tilstand af stoffet i universet, som vi stadig kun ved meget lidt om. Det er en stor succes at have tilvejebragt plasmaet i laboratoriet, så nu er det tid til at studere dets egenskaber nærmere. Med flere data og detektorer, som er i stand til bedre at adskille kvark-typerne og udforske de tungere kvarkers rolle, vil vi åbne for en bedre forståelse af kræfterne og udviklingshistorien af det tidlige univers.

I sidste ende har Standardmodellen en snes parametre, og deres værdi er afgørende for, hvordan universet omkring os ser ud. Der er en udbredt mistanke om, at der er et mønster i deres værdier, men vi har ikke kunnet gennemskue, hvordan de hænger sammen. Kunne vi bare ændre på en af dem, og så se hvordan de andre opførte sig, så kunne vi måske finde ud af det. Men ak, disse parametre er vi ikke herrer over. Alt, vi kan gøre, er at måle dem så godt, vi kan, og så se om vores intellekt kan gennemskue deres sammenhæng. Hvis vi kan, vil vi tage et stort skridt nærmere for at forstå universets mest basale naturlove helt fundamentalt, og hvorfor det ser ud, som det gør. Mere præcise målinger er vejen frem, både til opdagelse af nye fænomener og til at finde nye sammenhænge. Det var også tilfældet for 200 år siden, hvor det tog adskillige årtiers eksperimenter efter Ørsted, inden Maxwell kunne samle det hele i sine flotte og simple ligninger.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2020) *Fra Descartes til superstrengte: aspekter af foreningsteoriernes historie*, Kvant, dette nummer side 3.

- [2] B. Hayes (2008) *Getting Your Quarks in a Row*, American Scientist, bind 96, side 6.
- [3] P. Christiansen (2015) *Kvark-gluon plasmaet – den perfekte væske vi ikke kan forstå*, Kvant, bind 30, nr. 1.
- [4] B. Abelev, J. Adam, D. Adamová m.fl. (2015) *Elliptic flow of identified hadrons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*, J. High Energ. Phys. bind 190.
- [5] T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita og M. Nio (2015) *Tenth-Order Electron Anomalous Magnetic Moment – Contribution of Diagrams without Closed Lepton Loops*, Phys. Rev. D., bind 91, side 3.
- [6] M. Tanabashi m.fl. (Particle Data Group) (2018 og 2019-opdatering) *The Review of Particle Physics*, Phys. Rev. D, bind 98, side 030001.
- [7] commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg
- [8] atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CombinedSummaryPlots/HIGGS/
- [9] M. Mangano (2020) *LHC at 10: The Physics Legacy*, CERN Courier, marts/april, side 40.



Kristján Gulbrandsen er lektor ved Niels Bohr Institutet og arbejder med ALICE-eksperimentet ved LHC.



Troels C. Petersen er lektor ved Niels Bohr Institutet og arbejder med ATLAS-eksperimentet ved LHC.



Børge Svane Nielsen er lektor ved Niels Bohr Institutet og arbejder med ALICE-eksperimentet ved LHC.