

Jagten på Higgs-partiklen ved LHC

Af Katrine Facius og Stefania Xella, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

At studere de allermindste partikler hænger nøje sammen med at forstå det allerstørste, nemlig vores univers. Men i vores forståelse af Universet på denne allermest fundamentale skala mangler der stadig en meget vigtig brik i puslespillet. De kommende detektor-eksperimenter ved LHC vil forhåbentligt kaste det endelige lys over denne del af teorien der knytter sig til gåden om hvorfor partikler har masse.

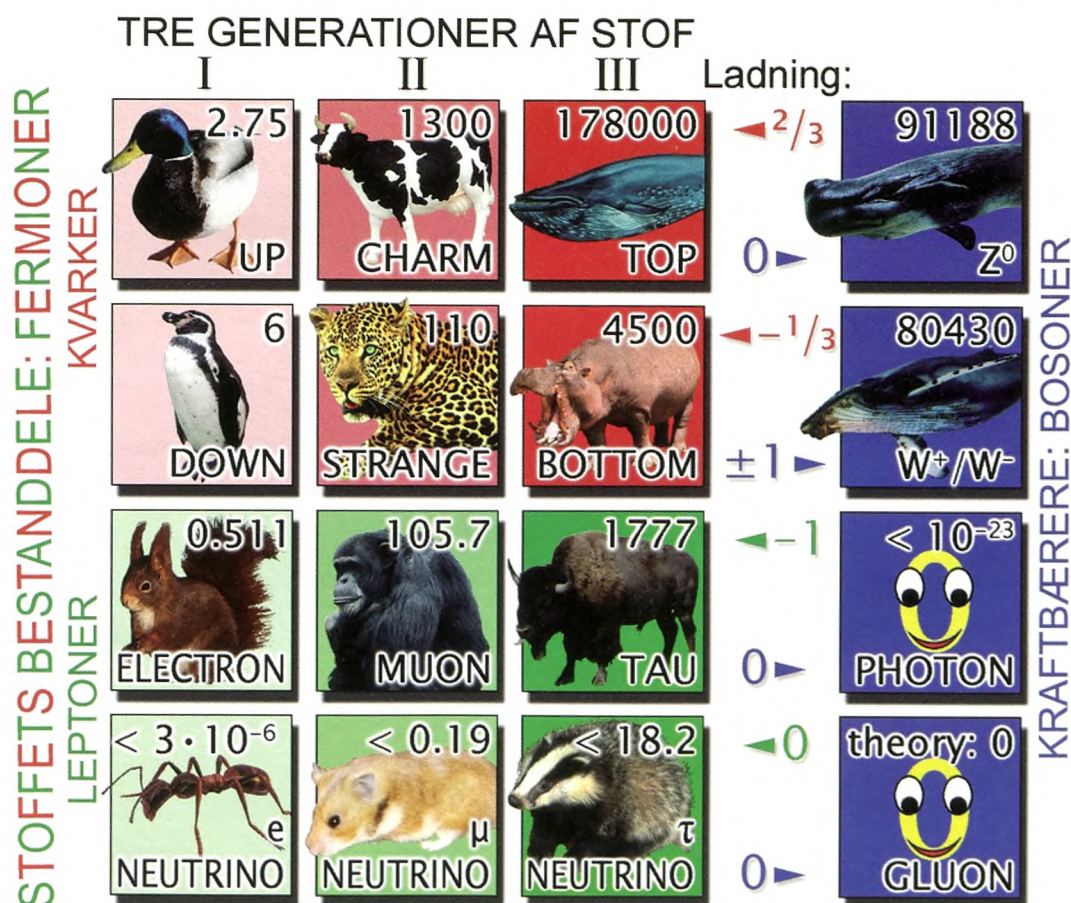
Den manglende brik i teorien

Partikelfysikkens Standardmodel er den teori der beskriver naturen på den mest fundamentale skala. I Standardmodellen er alle partikler repræsenteret af såkaldte *felter*, der som klassiske bølger udbreder sig i tid og rum og som overholder kvantemekanikkens og relativitetsteoriens lovmæssigheder. Der findes to typer partikler; kraftbærende partikler, som fotonen, og stoflige partikler, som elektronen. Disse elementarpartikler udgør de fundamentale byggeklodser som vores

univers er opbygget af, og figur 1 viser en oversigt over dem vi har observeret frem til i dag.

Standardmodellen gør det muligt at beregne hvordan elementarpartiklerne vekselvirker med hinanden, og modellens teoretiske forudsigelser er blevet testet ved eksperimenter over de sidste 30 år. Indtil videre har modellen vist sig at være utrolig succesfuld, da alle observationer har stemt overens med teorien ned til promille præcision. Men der mangler stadig en brik i det store partikelpuslespil, nemlig den såkaldte Higgs-partikel.

Standardmodellens fundamentale partikel-ZOO



Alle masser i MeV; Dyrenes masser skalerer med partiklernes masser

Figur 1. Oversigt over elementarpartiklerne, der er beskrevet i partikelfysikkens Standardmodel. Alle partiklerne på nær gluonen og fotonen har masse, og forholdet mellem disse masser er illustreret ved de forskellige dyr.

Higgsfeltet og det ikke-tomme vakuum

Higgs-partiklen er opkaldt efter fysikeren Peter Higgs, der introducerede den i 1960'erne. Den er nært knyttet til vores forståelse af masse, og er en nødvendig del af vores teori, hvis den skal beskrive naturen som vi ser den. Når man kigger på partiklerne i figur 1 kan man undre sig over hvorfor de har så forskellig masse, ja sågar hvorfor de overhovedet har en masse! Vi ved at en murstens masse er summen af massen af de atomer den består af. Men på mindre skalaer forholder det sig anderledes. Her ved vi at massen af et atom langt overstiger massen af de elektroner, kvarker og gluoner det består af. Protonens masse er f.eks. bestemt af bevægelsen af kvarkerne og af den energi der er knyttet til gluonfelterne der forbinder dem. Så hvorfor er elektronen og kvarkerne ikke bare masseløse?

Standardmodellen har et svar på dette spørgsmål, og svaret involverer en ny fortolkning af vakuum og introduktionen af Higgs-partiklen [1] og [2]. Vakuum er den tilstand med lavest mulig energi som et system kan være i, når man har pumpet alt ud. Betragter vi Universet som vores system er det fyldt med partikelfelter. I vakuum tilstanden er alle disse partikler fjernet, men der er ikke helt tomt. Der kan nemlig stadig ligge et felt som baggrund, og vakuum er altså ikke længere så tomt som det plejede at være!

Dette baggrundsfelt er Higgs-feltet. Higgs-feltet kan deformeres, eller exciteres, ved at vekselvirke med andre ting. Excitationerne tager form som klassiske bølgepakker, hvilket i den kvantemekaniske fortolkning betyder partikler. Fra Higgs-feltets eksistens forventer vi også eksistensen af en Higgs-partikel.

En særlig interessant konsekvens af Higgs-feltet er at det sørger for at alle de andre partikler opnår masse. Når elementarpartiklerne bevæger sig gennem dette baggrundsfelt, vil de vekselvirke med det og herved bliver forholdet mellem deres energi og impuls ændret. Denne ændring svarer til at de får en masse. Denne *træghed* som partiklerne oplever når de bevæger sig igennem Higgs-feltet, minder om den træghed lys oplever når det bevæger sig gennem et medie som vand, hvor hastigheden bliver reduceret. Når vi observerer en partikel med en høj masse, svarer det i følge teorien til at partiklen har en stærk vekselvirkning med Higgs-feltet.

Kraftbærerne mærker også Higgs-feltet. Formidlerne af den svage kernekraft, Z og W, vekselvirker meget stærkt med Higgs-feltet, i modsætning til fotonen der er masseløs. Dette forklarer forskellen i rækkevidde af den elektromagnetiske kraft og den svage kernekraft i dag. Symmetrien mellem disse to kræfter – den elektrosvage symmetri – er brudt, eller skjult for os, pga. den vakuumtilstand vores univers er i.

Ingen har set Higgs-partiklen

I dag mener vi at Universet, da det opstod i Big Bang, var i en vakuumtilstand og at alle partikler var masseløse. Men Universet begyndte at udvide sig og herved skete en nedkøling der betød en overgang til en ny vakuumtilstand. Sådan en faseovergang minder

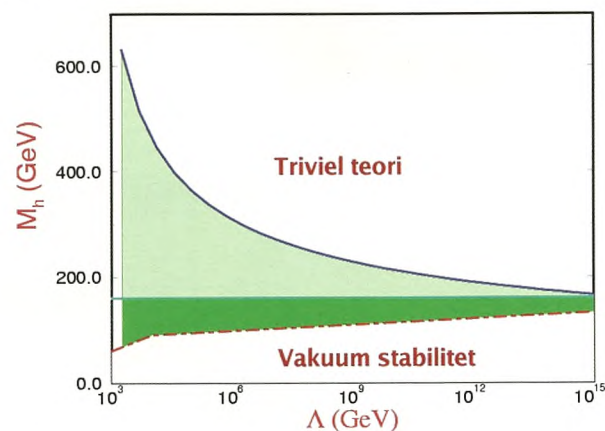
om den der sker når vand, der ved høje temperaturer er en gas, bliver til is ved nedkøling. I den nye vakuumtilstand var Higgs-feltets forventningsværdi ikke nul mere, og partiklerne fik de masser som vi kender i dag via vekselvirkninger med dette baggrundsfelt.

Selv om introduktionen af Higgs-feltet og Higgs-partiklen er en nødvendighed for at beskrive partiklerne med masse, er der dog et enkelt problem; man har endnu ikke observeret Higgs-partiklen ved noget eksperiment, og har altså ikke fået bekræftet denne del af teorien.

Med opstarten af ATLAS og CMS detektoren ved LHC i september 2008 begynder jagten officielt! Ved LHC vil vi genskabe forhold der minder om dem der var i Universets allertidligste stadier, mindre end 10^{-12} sekunder efter Big Bang. Her bliver det muligt at producere og observere Higgs-partiklen, hvis den findes, og opnå en forståelse af fysikken der herskede i Universets spæde begyndelse.

Higgs-strategier ved ATLAS og CMS

Higgs-partiklen har masse, spin og en levetid som alle andre partikler. Den har dog ingen ladning og levetiden er meget kort, 10^{-22} sekunder, så den eneste måde vi kan observere den på, ved detektorer som ATLAS og CMS, er ved at studere dens henfaldsprodukter. Hvad Higgs-partiklen kan henfalde til afhænger af hvor meget den selv vejer. Fra teoretiske beregninger såvel som tidligere eksperimentelle resultater ved vi at Higgs-partiklens masse skal ligge mellem 115 og 1000 GeV (10 gange så meget som Z-partiklen, se figur 2).

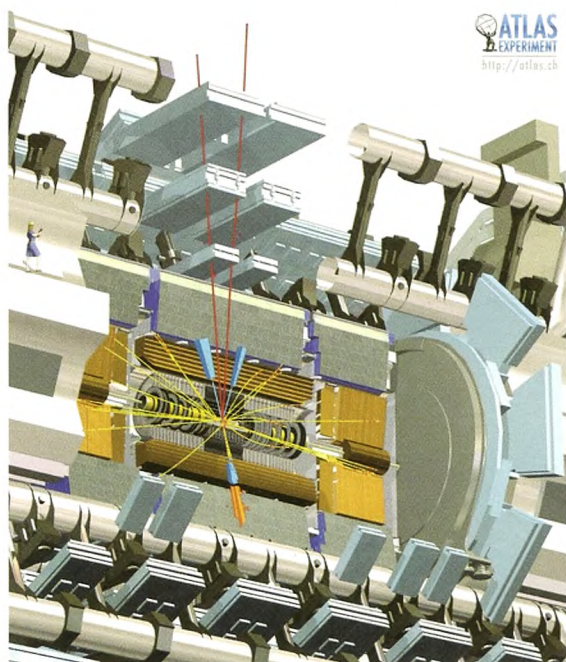


Figur 2. Teoretiske og eksperimentelle grænser for Higgs-partiklens masse M_h , som funktion af Λ , der er den øvre energi-grænse for Standardmodellens gyldighed. Den blå linie er en øvre teoretisk grænse for M_h , da en Higgs-masse over dette vil medføre en såkaldt *triviel* teori. Den røde stiplede kurve er en nedre teoretisk grænse for M_h , da en Higgs-masse under denne vil betyde et ustabilt vakuum. Den grønne vandrette linie er en indirekte øvre grænse for M_h fra eksperimentelle data.

Det er værd at bemærke at hvis Higgs-partiklen viser sig at have en masse omkring 130 GeV, vil det i følge figur 2 betyde at Standardmodellen er i stand til at beskrive verden helt op til de højeste energier og helt tilbage til det tidligste univers.

ATLAS- og CMS-detektorerne er designet så de med høj præcision kan observere Higgs-partiklen, hvis

den har en masse af den forudsagte størrelse. Som nævnt vekselvirker Higgs-partiklen stærkere med partikler, jo tungere de er. Det betyder at en Higgs-partikel altid vil foretrække at henfalde til de tungest mulige partikler. Har Higgs-partiklen en masse på 130 GeV, eller mindre, vil det være tau-leptoner eller fotoner (igennem top-kvarkhenfald). Hvis Higgs-partiklen har en masse over 130 GeV vil den typisk henfalde til W- og Z-bosoner, og det vil være signaturer efter sådanne processer man skal kigge efter i detektoren.



Figur 3. Et kig ind i ATLAS detektoren, hvor en Higgs-partikel er blevet skabt i proton-proton sammenstød.

Figur 3 viser et eksempel på hvordan en Higgs-partikel kan observeres i ATLAS. På billedet er en Higgs-partikel blevet skabt i den centrale proton-proton kollision, hvorefter den er henfaldet til to Z-bosoner. De er igen henfaldet til henholdsvis to myoner og to elektroner, og det er kun sporene fra disse myoner (røde spor) og elektroner (blå spor) som bliver registreret i detektoren. Billedet er lavet ved hjælp af computer-simuleringer af hvordan ATLAS detektoren reagerer når partiklerne bevæger sig igennem den, og billeder som dette er med til at give fysikerne et overblik og en bedre forståelse af hvad der sker i eksperimentet.

Svaret er om hjørnet

Higgs-partiklen er altså en meget vigtig manglende brik i det puslespil vi kalder partikelfysikkens Standardmodel. En brik der er afgørende for om vores teori kan beskrive vores Univers helt tilbage til Big Bang. Med de store eksperimenter ved LHC har vi nu en klar strategi for hvad vi skal kigge efter for at se om vi endelig kan observere Higgs-partiklen, og finde ud af hvad den vejer.

Men selv om svaret på denne gåde synes lige om hjørnet, vil det ikke blive åbenbart umiddelbart efter

LHC's opstart. LHC vil producere mere end 10 millioner sammenstød per sekund, og al data der bliver gemt om disse sammenstød vil fylde CD'ere nok til at bygge en 20 km høj stak om året. Men kun en meget lille del af al denne data vil indeholde information om Higgs-partiklen. Faktisk vil Higgs-partiklen kun blive produceret i ét ud af 10^{12} proton-proton sammenstød. Der skal altså en virkelig grundig sortering til, for at udvælge netop det der kan fortælle os noget om denne partikel. Denne sortering vil aldrig opsamle alle de sammenstød, hvor der var en Higgs-partikel, og alt i alt forventer vi at kun omkring et par hundrede Higgs-partikler vil blive observeret i ATLAS om året. Det betyder at vi må vente til vi har cirka tre års data før vi kan give et sikkert svar på gåden om Higgs-partiklen. Men svaret er ventet med spænding, og er tættere på end nogen sinde før.

Prøv selv at finde Higgs-partiklen

Mens forskerne venter på at der kommer data, bruger de computersimuleringer til at træne dem selv til jagten på Higgs-partiklen. Prøv selv "The Hunt for Higgs" spillet [3].

Litteratur

- [1] P.W. Higgs (1964), Broken Symmetries and the Masses of Bosons, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 508-509
- [2] P.W. Higgs (1966), Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons, *Phys. Rev.* **145**, 1156-1163
- [3] <http://www.sciencemuseum.org.uk/antenna/bigbang/huntforhiggs/index.asp>



Stefania Xella er adjunkt ved Niels Bohr Institutet og arbejder i gruppen for eksperimentel partikelfysik. Hun er aktivt medlem af "Higgs-hunter"-teamet ved ATLAS.



Katrine Facius er ph.d.-studerende i gruppen for eksperimentel partikelfysik ved Niels Bohr Institutet, hvor hun er involveret i forberedelsen af det hidtil største jordske acceleratoreksperiment LHC ved CERN ved Geneve.