

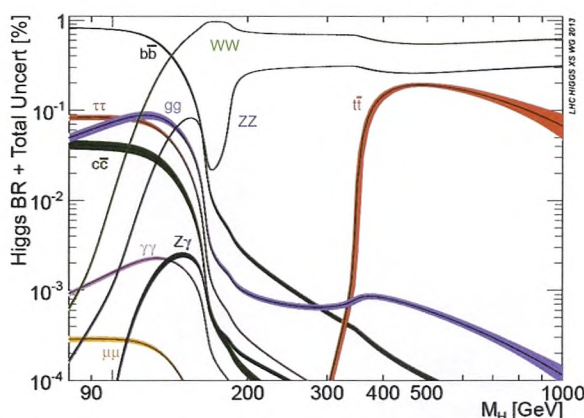
# Opdagelsen af Higgsen og hvad fremtiden bringer

Af Troels C. Petersen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Opdagelsen af Higgs-partiklen den 4. juli 2012 af ATLAS- og CMS-eksperimenterne ved CERN var den foreløbige kulmination på næsten et halvt århundredes jagt på én af de mest centrale udfordringer i vores forståelse af de fundamentale naturlove. Siden da har mere data og forbedrede analysemetoder slået fast, at det observerede signal rent faktisk ligner den Higgs-partikel, som Standardmodellen (SM) forudsagde. Til gengæld har der ikke været nogen tegn på fysik ud over Standardmodellen til trods for, at man har søgt intensivt efter tegn på ny fysik. Jagten har givet en masse udelukkede muligheder, som får én til at overveje, hvilke yderligere naturlove Universet har valgt, og om disse overhovedet kan opdaget ved LHC. Men LHC-acceleratoren har foreløbig kun leveret 2 % af det forventede antal proton-kollisioner og disse "kun" ved halvdelen af LHCs designenergi på 14 TeV. Næste år genstarter LHC ved den dobbelte energi, og dermed fortsætter jagten på nye partikler og fænomener, som måske kan forklare hvad fx det mørke stof i Universet består af og hvorfor der er mere stof end antistof.

Standardmodellen har siden dens gradvise tilblivelse vist sig at være en virkelig god model for Universets fundamentale love, og den har vist sig at stemme overens med alle de partikelfysikseksperimenter vi hidtil har udført. Men det var fra starten af klart, at der manglede en grundlæggende ingrediens, nemlig en mekanisme der tillod, at elementarpartikler havde masse, ligesom man kunne se, at de havde!

Higgs-mekanismen blev det første bud på en sådan forklaring, men der blev siden foreslået utallige andre mulige løsninger (et bud på antallet af artikler er mellem 300-600), som både var variationer af det oprindelige tema (fx "Little Higgs"), men også radikalt andre løsninger (fx "Technicolor"). Men noget skulle der findes for at udfylde denne sidste brik i Standardmodellen.



**Figur 1.** Figuren viser hvad SM-Higgs-partiklen henfalder til som funktion af dens masse. Generelt henfalder Higgs-partiklen helst til tunge partikler, hvis et sådant henfald ellers er muligt. For meget lave Higgs-masser er dette hovedsagligt til  $b + \text{anti-}b$  kvarker ( $bb$ ), mens det for høje masser er  $WW$  og  $ZZ$  samt  $t\text{-anti-}t$  ( $t\bar{t}$ ). Ved 126 GeV er der næsten alle muligheder, hvilket giver Higgs-partiklen en rig fysik. Fra [3].

Spørgsmålet om Higgs-partiklens eksistens blev med tiden mere og mere centralt, og da man designede de detektorer, som skulle observere kollisionerne fra LHC, der havde man stort fokus på at sikre, at ligegyldig hvad Higgs-partiklen vejede, så skulle man være i stand til at observere den. Målet var, at enten ville man

finde Higgs-partiklen eller også ville man få beviser nok til at udelukke dens eksistens.

Den altafgørende parameter, når man skal søge efter Higgs-partiklen, er Higgsens egen masse, idet den afgør, hvad Higgs-partiklen henfalder til, og der er faktisk mange muligheder, se figur 1.

Man havde en svag idé om, at hvis det var en SM-Higgs, som man var på jagt efter, så ville den have en masse mellem 50 og 500 GeV. Dette vidste man fra præcise målinger af  $W$ -massen, som en eventuel Higgs havde en svag indflydelse på.

Men inden LHC startede, så havde flere andre eksperimenter forsøgt at finde Higgsen. Acceleratoren Large Electron-Positron (LEP) collider – som var den oprindelige grund til, at man på CERN byggede den 27 km lange tunnel, som LHC nu "bebor" – var følsom overfor Higgs-partikler op til 115 GeV, mens "Tevatron-acceleratoren" ved Fermilab i USA begyndte at have følsomhed i masse-intervallet 160-170 GeV, da LHC skulle til at starte.

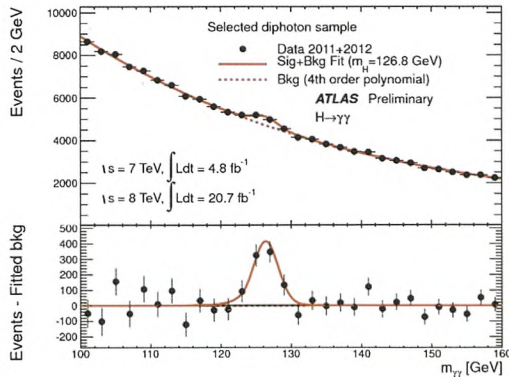
Higgs-partikler produceres, når man støder protoner sammen ved høj energi. Da protoner ikke er fundamentale partikler, men består af kvarker og gluoner, så er det kvarker og gluoner, som støder sammen, og det typisk med en energi, som er en del lavere, end den protonerne har.

Den energi, der er i sammenstødet kan bruges til at producere nye partikler, ligesom man kan veksle danske kroner til fx amerikanske dollars. Alle – også ikke-fysikere – kender faktisk godt vekselkursen, idet den er bestemt ved Einsteins berømte formel,  $E = m \cdot c^2$ . Hvis man har en bestemt mængde energi,  $E$ , så kan man "købe" partikler med en bestemt masse,  $m$ , og vekselkursen er lysets hastighed i anden.

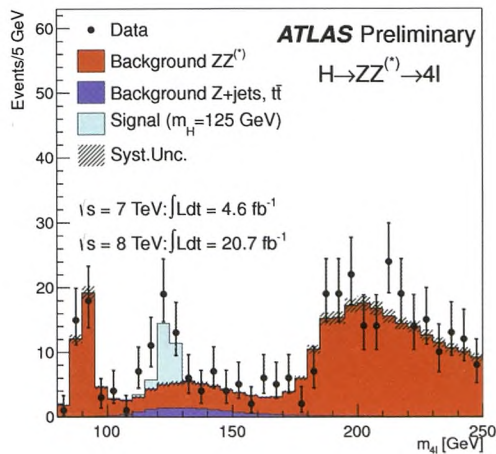
Nu er det sådan, at lysets hastighed er et stort tal (ca. 300.000.000 m/s), hvormed det er "dyrt" at købe partikler med energi. Det er derfor, at CERNs LHC-accelerator er så stor. Desuden er man tvunget til at overholde de bevarelseslove, som gælder i partikelfysikken, fx at den elektriske ladning skal være bevaret. Sidst men ikke mindst, så kan man ikke selv bestemme, hvad man veksler til! Man er simpelthen tvunget til at

kollidere en masse protoner, og så se alle kollisionerne igennem. Naturen er ikke rar, når man veksler, idet den oftest giver en billig valuta tilbage i form af lette kvarker. Faktisk får man kun én observerbar SM-Higgs-partikel ud af 10.000.000.000.000 (titusind milliarder) kollisioner.

Rent faktisk produceres der i proton-kollisioner i princippet *alle* eksisterende partikler, så længe deres masse ligger under kollisionsenergien. Således producerer LHC også store mængder af kendte partikler, som man så kan studere i større detalje. Og så kommer der måske en sjælden gang imellem en ny type partikel, som afslører noget yderligere om Universets mangfoldighed.



**Figur 2.** Fordelingen af masser fra begivenheder med to fotoner. Langt den overvejende del kommer fra “almindelige” SM-processer, men den lille top ved 126 GeV (lettere at se i nederste plot, hvor den monotone baggrund er trukket fra) er Higgs-signalet.



**Figur 3.** Fordelingen af masser fra begivenheder med fire leptoner (elektroner eller myoner). Det røde og lilla histogram viser baggrunden fra SM-processer, mens der ved 125 GeV ses et Higgs-signal ud over den forventede baggrund.

I jagten på Higgs-partiklen var der tre af dens mulige henfald, som kom til at spille den afgørende rolle, nemlig  $\gamma + \gamma$  (to fotoner),  $Z + Z^*$  og  $W + W^*$ .<sup>1</sup> Grunden til, at disse henfald blev afgørende var både, at Higgsen havde en masse, som tillod henfald til disse sluttillstande, men også (og især) at det man skal observere ikke indeholder kvarker, og dermed har mindre baggrundsstøj, idet LHC producerer utrolige mængder af kvarker.

<sup>1</sup> Stjernen på hhv. Z og W refererer til, at partiklen ikke har sin fulde masse.

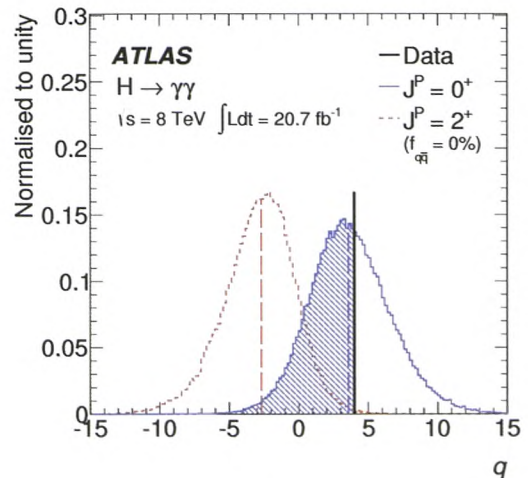
Alle tre sluttillstande produceres også uden Higgs-partiklens eksistens, så udfordringen er at se, om disse sluttillstande produceres yderligere (altså udover den forventede baggrund fra SM) og om denne yderligere produktion er ved en specifik masse. Denne masse,  $m$ , kan beregnes ved at tage de to fotoner og “lægge dem sammen” ifølge speciel relativitetsteori. Da fotonerne er masseløse, så er dette specielt nemt, og givet ved formelen:

$$m^2 = \frac{2E_1E_2}{c^4}(1 - \cos(\theta)), \quad (1)$$

hvor  $E_1$  og  $E_2$  er energien af de to fotoner, og  $\theta$  er vinklen imellem dem.

I modsætning til fotoner, så henfalder Z-partikler videre, engang imellem (6 %) til to elektroner eller to myoner, som er relativt lette at observere. Man kigger derfor efter kollisioner, hvor der kommer fire elektroner/myoner ud. Igen lægger man dem sammen, og ser, om der er en overskudsproduktion ved en specifik masse.  $WW^*$ -tilfældet ligner  $ZZ^*$ -tilfældet meget, undtagen at  $W$ 'er ikke henfalder til to elektroner/myoner, men kun til én samt en tilhørende neutrino, som man ikke ser. Dette gør det sværere at se, om der er et overskud af partikler, hvormed denne henfaldskanal ikke er helt så “stærk”, som de to foregående.

Efter Higgsens opdagelse var det store spørgsmål, om det nu også var en Higgs, dvs en partikel med spin 0, og om den fulgte Standardmodellens forudsigelse om at have positiv paritet (lidt løst sagt, om den er højre- eller venstrehåndet!). Dette kan man måle ved at se på vinkelfordelingerne af Higgs-kandidaternes henfald, og selv om dette er en udfordring, så kunne man allerede med de data LHC har leveret bestemme, at den nyopdagede Higgs-partikel har spin 0. Faktisk har ATLAS lige udgivet en artikel med titlen: “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data” [5].



**Figur 4.** Figuren viser den forventede fordeling af  $q$  (som er log af likelihood ratio for hypoteserne spin=0 og spin=2), der er følsomt overfor, hvilket spin Higgs-signalet har. Den røde fordeling er, hvad man forventer for spin=2 og den blå for spin=0, som Higgs-partiklen skal have. Data er den sorte streg, som altså klart favoriserer spin=0 med meget lille chance for spin=2 hypotesen [5].

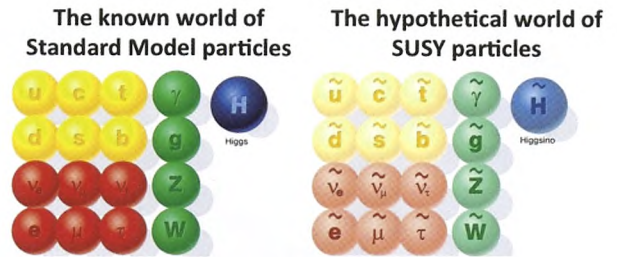
Figur 4 viser, hvad man skulle forvente hvis Higgsen var spin 0 eller spin 2. Den sorte linier markerer, hvad man rent faktisk ser i data, og den favoriserer klart spin 0 hypotesen, så det er en Higgs-partikel. Man måler også, om den nye partikel nu henfalder lige så ofte som den "skal" til de forudsagte sluttillstande, og foreløbig er svaret, at det gør den!

### Supersymmetri

Med opdagelsen af Higgs-partiklen er Standardmodellen sådan set afrundet og komplet. Men der er flere grunde til, at vi ved, at det ikke er den endelige teori. For det første forklarer SM ikke eksistensen af mørkt stof og heller ikke hvorfor der endte med at være et overskud af stof i forhold til antistof i Universet. Desuden er der flere ting i SM, som ikke falder naturligt. Fx burde massen af Higgs-partiklen naivt/naturligt være  $10^{16}$  gange større, end den er, fordi andre SM-partikler gennem kvantekorrekationer "bidrager" voldsomt til Higgs-partiklens masse (ligesom den bidrager lidt til W-massen, se ovenfor). Men der synes at foregå en eller anden meget delikat og præcis annullering af disse korrekationer, således at Higgs-massen ender på de 126 GeV. Den slags er ikke naturligt, og en fysikers skepsis er dermed vakt!

Et muligt svar på alle disse udfordringer kunne være en ny symmetri, "Super Symmetri" (SUSY), som postulerer, at der for hver SM-partikel findes en super-

symmetrisk partikel, som vist på figur 4. Disse skulle være tungere end SM-partiklerne, og af den grund ikke opdaget – endnu!



**Figur 5. SUSY-partikler.** Til venstre er de partikler vi kender, som alle findes i Standardmodellen. SUSY postulerer, at der for hver af disse er en super-partner. Den letteste af disse (her er der dog flere muligheder!) vil være stabil og kan derfor udgøre det mørke stof. SUSY-partiklerne har de samme elektriske- og farveladninger, som deres SM-partnere, men deres spin er ændret med 1/2, således at der byttes om på fermioner og bosoner. Fra Quantum Diaries.

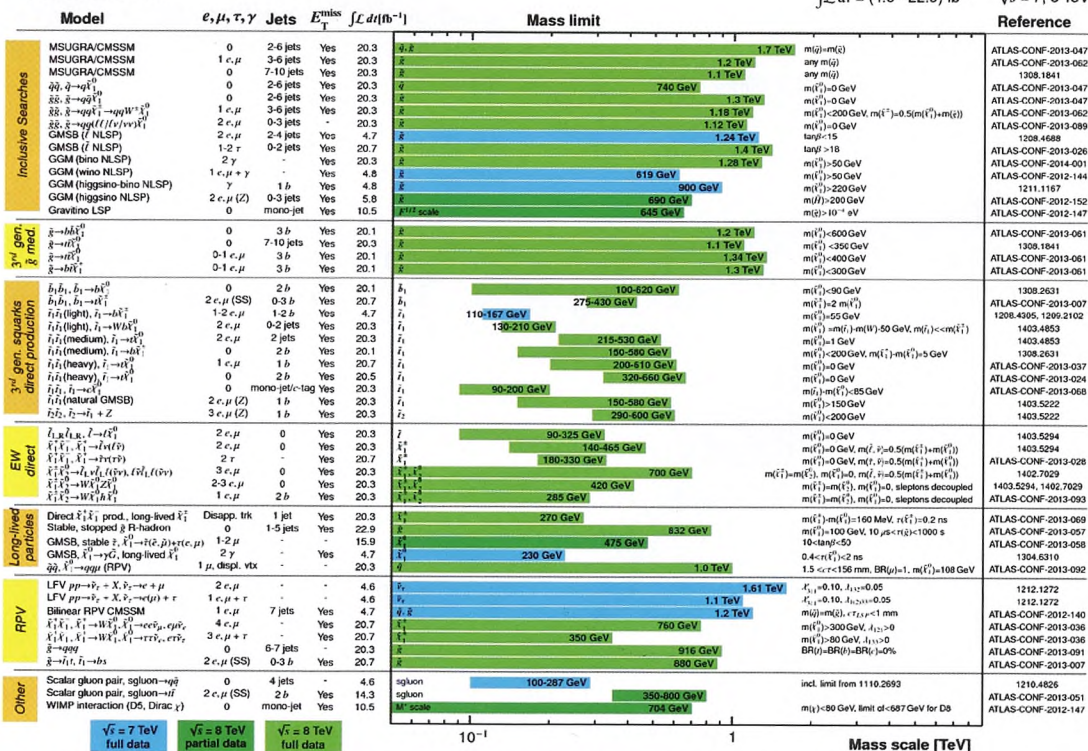
Ligesom SM-partikler henfalder disse til lettere partikler, men SUSY-partikler kan ikke uden videre henfalde til SM-partikler, idet de ikke kan "komme af med" deres supersymmetri, og dermed vil den letteste SUSY-partikel være stabil. Denne partikel (kaldet LSP = "Lightest SUSY Particle") kan udgøre det mørke stof, idet den kun vekselvirker gennem tyngdekraften og den svage kernekraft (og altså ikke elektromagnetisk).

### ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: Moriond 2014

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



**Figur 6. ATLAS SUSY-resultater.** Denne meget informationsrige figur opsummerer de vigtigste (men ikke alle!) ATLAS SUSY-analysers resultat i form af en minimum masse de eftersøgte SUSY-partikler kan have, givet at vi ikke har fundet signal i nogle af alle disse søgninger. Generelt kan SUSY-partikler med masse under omkring 1 TeV udelukkes. Når LHC starter op igen i 2015, ved "Run2", forventer man at kunne observere SUSY-partikler op til 2,0-2,5 TeV, og så må man se, om der er spor af SUSY-signaler i nogle af dem. Fra ATLAS public results.

Spørgsmålet om, hvordan der endte med at være mere stof end antistof i Universet, kræver at der på et tidligt tidspunkt i Universets udvikling skete en faseovergang, helt ligesom vand der fryser til is. Der er flere teorier, som giver et bud på, hvordan der forekommer sådan en faseovergang, men Higgs-mekanismen er den mest populære. Det viser sig dog, at den nyligt fundne Higgs-partikel på 126 GeV *ikke* kan give den krævede overgang, og man skal derfor have flere Higgs-partikler. Med SUSY får man faktisk fem Higgser ialt, men andre teorier med flere Higgser kan også gøre det. Denne sidste mulighed er bl.a. et resultat af forskning ved Niels Bohr Institutet.

Mens SUSY i sig selv er en glimrende idé, så har den det problem, at de mange nye partikler og vekselvirkninger kræver over 100 parametre at beskrive. Dermed kan SUSY have næsten uendelig mange udformninger, hvilket gør dens forudsigelser og mulighed for at blive afkræftet langt mindre.

Både ATLAS- og CMS-eksperimenterne har ledt intenst efter signaturer fra SUSY, men det foreløbige resultat er, at man ikke har fundet noget tegn på SUSY endnu. Figur 6 viser et udvalg af resultater fra ATLAS, hvor de forskellige linier repræsenterer hvor høje masser på SUSY-partikler, man har kunnet udelukke (idet man ellers allerede ville have set dem, hvis de eksisterede).

### En historisk opdagelse

Det er ikke så ofte, at man får lov til at være del af en så afgørende opdagelse i partikelfysik, som fundet af Higgs-partiklen 48 år efter Higgs, Brout og Englerts oprindelige ideer. Det er noget nær en lille revolution. Robert Brout (1928-2011) døde kort tid før opdagelsen af Higgs-partiklen blev annonceret.

Ud over at resultere i en nobelpris til Higgs og Englert allerede året efter, så var det også en opdagelse, som gav genlyd uden for naturvidenskabens, idet mange af verdens aviser havde nyheden på forsiden.



Billedet viser Fabiola i Time Magazine. Fabiola Gianotti var talsperson for ATLAS-eksperimentet, og kendt for at gøre en dyd ud af det faktum, at ATLAS er en kollaboration, og at resultater som Higgs-opdagelsen kun kan lade sig gøre ved samarbejde. Hun var med i opløbet til at blive Time Magazines "person of the year" i 2012. Det var dog Barack Obama, der ved genvalg løb med titlen.

### Fremtiden

Dette er status i skrivende stund – Higgsen er fundet og den ligner SM-Higgsen, mens SUSY gemmer sig, hvis den overhovedet eksisterer. Men som sagt har LHC foreløbig kun leveret 2 % af det forventede antal proton-kollisioner og disse "kun" ved det halve af LHCs designenergi på 14 TeV.

Imens LHC opgraderes til sit fulde potentiale og design, så er forskningsgrupperne bag eksperimenterne også i gang med at reparere og forbedre deres detektorer. ATLAS har fået sat et ekstra lag af sporingsdetektorer ind helt tæt på kollisionspunktet, så man bedre kan se, om de partikler der kommer fra kollisionen, når at bevæge sig et lille stykke ( $< 1$  mm) inden de henfalder. Det er der nemlig nogle, der gør, og evnen til at kunne se dette giver bedre resultater, simpelthen fordi man har et skarpere syn, der kan skelne den interessante fysik (fx Higgser) fra støj.

I starten af 2015 genstarter LHC så ved dobbelt energi, og dermed fortsætter jagten på nye partikler og fænomener, som kan forklare hvad det mørke stof i Universet består af og hvorfor der er mere stof end antistof. Med Higgs-opdagelsen in mente bliver det mere end overordentligt interessant at se, hvad naturen har i vente til forskningen ved LHC på CERN.

### Litteratur

- [1] The ATLAS Collaboration (2012), Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Lett. B* **716** 1-29, <http://arxiv.org/abs/1207.7214>
- [2] CMS Collaboration (2012), Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Phys. Lett. B* **716** (2012) 30-71, <http://arxiv.org/abs/1207.7235>
- [3] S. Dittmaier *et al.* [LHC Higgs Cross Section Working Group] (2011), Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables, <http://arxiv.org/abs/1101.0593>
- [4] The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD Collaborations, Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance, *Phys. Rept.* **427**, 2006
- [5] ATLAS Collaboration (2013), Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data, *Phys. Lett. B* **726** (2013), 120-144, <http://arxiv.org/abs/1307.1432>

Troels C. Petersen er forskningslektor ved Niels Bohr Institutet. Han har tidligere arbejdet på BaBar-eksperimentet med målinger af CP-brud, dvs forskelle på stof og antistof. Siden 2004 har han arbejdet på ATLAS-eksperimentet med identifikation af elektroner i Transition Radiation Tracker (TRT) og præcisionsmåling af W-massen. Efter LHCs start har han arbejdet på at søge efter stabile massive partikler og Higgs-partiklen.

