

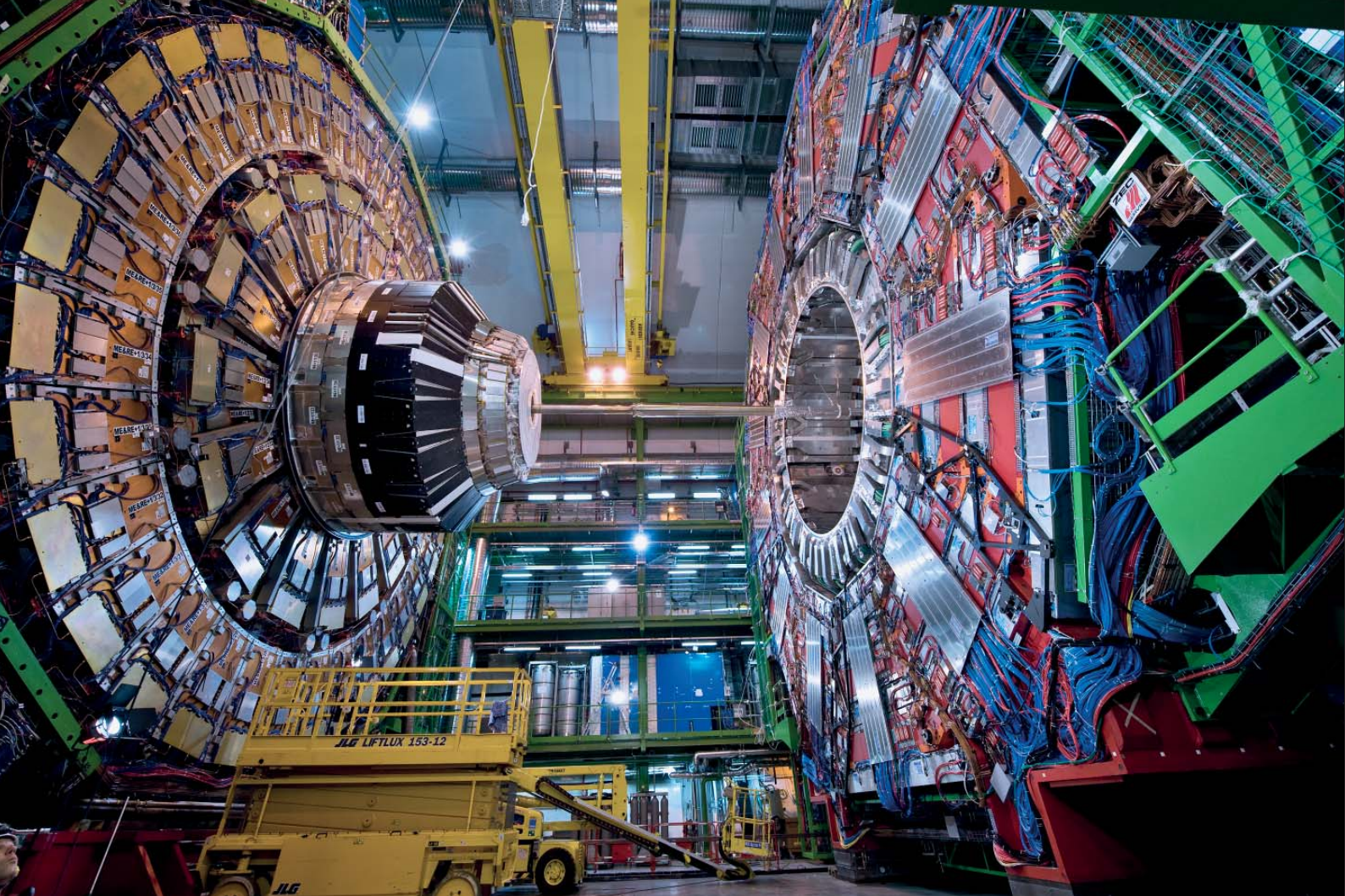


Foto: CERN

En verden med supersymmetri

Har alle elementarpartiklerne i virkeligheden en såkaldt superpartner?

Hvis dette er tilfældet vil det løse en række problemer med partikelfysikernes beskrivelse af verden, som har naget forskerne i årtier.

Af Nikolaj Thomas Zinner, Hans Fynbo, Steen Hannestad og Sujeevan Sivasundaram

■ Symmetri er et begreb de fleste forbinder med figurer, som kan føres over i sig selv f.eks. ved drejning om en akse, eller ved at spejles. I fysikken er symmetri et meget bredere begreb og spiller en vigtig rolle inden

for stort set alle grene af fysik. For eksempel kan bevarelsen af energi forstås som en konsekvens af symmetri i naturlovene. Eller mere præcist: det faktum, at resultatet af et bestemt eksperiment vil være det samme,

uafhængigt af, om det udføres i dag, i morgen eller om et år. De seneste årtier har fysikere udviklet en helt ny symmetri, som muligvis kan løse en række problemer i vores forståelse af elementarpartiklerne. Denne nye

symmetri kaldes *supersymmetri*. En konsekvens af at indføre supersymmetri er for eksempel, at vores velkendte elektron, som findes overalt i naturen, får en såkaldt *superpartner*. Selvom den betegnes som en partner,

← Foto af CMS-detektoren ved CERN før den blev lukket og taget i brug ved eksperimenter. Det er i denne detektor samt ATLAS-detektoren, at man måler produkterne af kollisionerne mellem protoner i kæmpeacceleratoren LHC.

så har den nogle ganske andre egenskaber end elektronen. De to partnere indgår i teorierne på en måde, som løser nogle meget grundlæggende problemer med vores forståelse af partikelfysik, der har givet teoretikerne grå hår i hovedet et halvt århundrede.

En superpartner til alle partikler

Supersymmetri forudsiger, at ikke bare elektronen men alle elementarpartikler har en superpartner. I vores nuværende model for de elementarpartikler, som verden er bygget op af – kaldet *Standard-modellen* (se boks), har man tre familier, som hver består af to kvarker og to leptoner (leptoner er en fællesbetegnelse for partikler, der minder om elektronen). Derudover er der en række partikler, som ikke udgør stoffet, vi ser omkring os, men som derimod sørger for, at partikler vekselvirker med hinanden på helt bestemte måder. Et eksempel på en sådan *kraftbærende* partikel er fotonen, som alt lys er opbygget af. Fotonen er således ansvarlig for den elektromagnetiske kraft, som er den kraft, der grundlæggende holder sammen på den verden, vi kender i hverdagen. Udover denne er der nogle såkaldt svage og stærke kernekrafter, som holder sammen på atomkernen samt er afgørende for de henfaldsprocesser, der blandt andet danner grundlag for Solens energiproduktion. Supersymmetri indeholder en superpartner for alle partikler i Standard-modellen, både dem som stof er gjort af samt de kraftbærende.

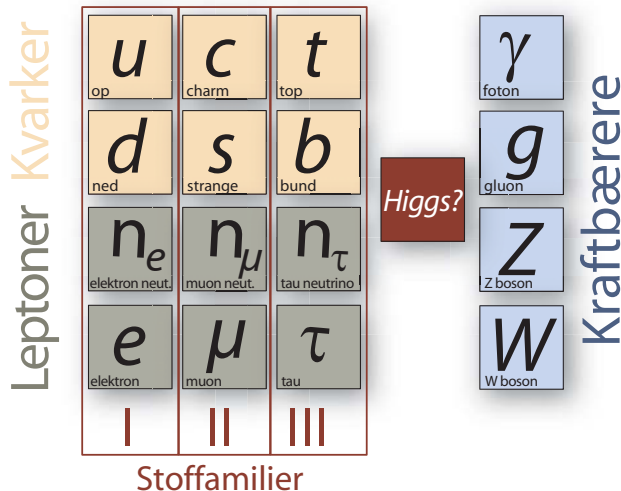
En afgørende forskel på stof- og kraftbærende partikler, er

Standard-modellen

Standardmodellen er den mest fundamentale beskrivelse af naturen, vi kender til i dag. Den er formuleret i et sprog, der kombinerer relativitetsteorien og kvantefysikken, sådan at den på samme tid kan beskrive naturens mindste dele, og fænomener karakteriseret ved meget høje energier. Med kvantefysikken har naturens fundamentale bestanddele både partikel- og bølgeegenskaber – det gælder også i standardmodellen. Her forstås elementarpartiklerne som eksiterede tilstande af kvantefelter, helt på samme måde som vi i dag forstår lyset som bestående af fotoner, som alle er eksitationer af det elektromagnetiske felt, der eksisterer overalt i rummet. Ligesom med lys er elementarpartiklernes bevægelser beskrevet matematisk som løsninger til bølgeligninger.

I standardmodellen forstås de partikler som materien er opbygget af og vekselvirkningen mellem dem på samme måde – de er alle partikler i den kvantefysiske forstand.

Elementarpartiklerne i standardmodellen fordeler sig i tre familier af "stof"-partikler og derudover partikler, der sørger for vekselvirkningen mellem stofpartiklerne. Til sidst er der den berømte *Higgs-partikel*, som mulig-



Skema over standard-modellens zoologiske have af partikler. Alt kendt stof er opbygget af partikler fra den første familie af elementarpartikler, mens medlemmerne af de to andre familier er ekstremt kortlevende. Hvis modellen skal være komplet er endnu en partikel nødvendig – Higgs-partiklen.

vis nu er identificeret på CERN.

Den første familie af stofpartikler består af elektronen og elektron-neutrinoen, og op- og ned-kvarkerne (som protoner og neutroner er opbygget af). De to andre familier ses i dag kun i de kosmiske stråler eller i fysikseksperimenter. Alle stofpartiklerne har også anti-partikler.

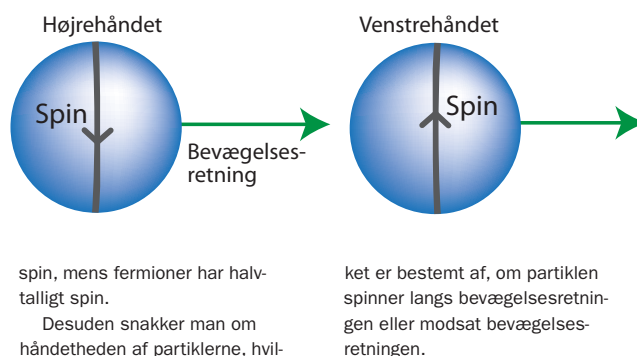
Vekselvirkningspartiklerne

giver anledning til tre fundamentale kræfter: fotonen giver den elektromagnetiske kraft, W og Z-partiklerne giver den svage kraft, og 8 gluoner giver den stærke kraft.

Tyngdekraften er ikke med i standardmodellen, fordi vi i dag ikke ved, hvordan vi skal beskrive denne vekselvirkning i kvantefysikkens sprog.

Et spørgsmål om spin

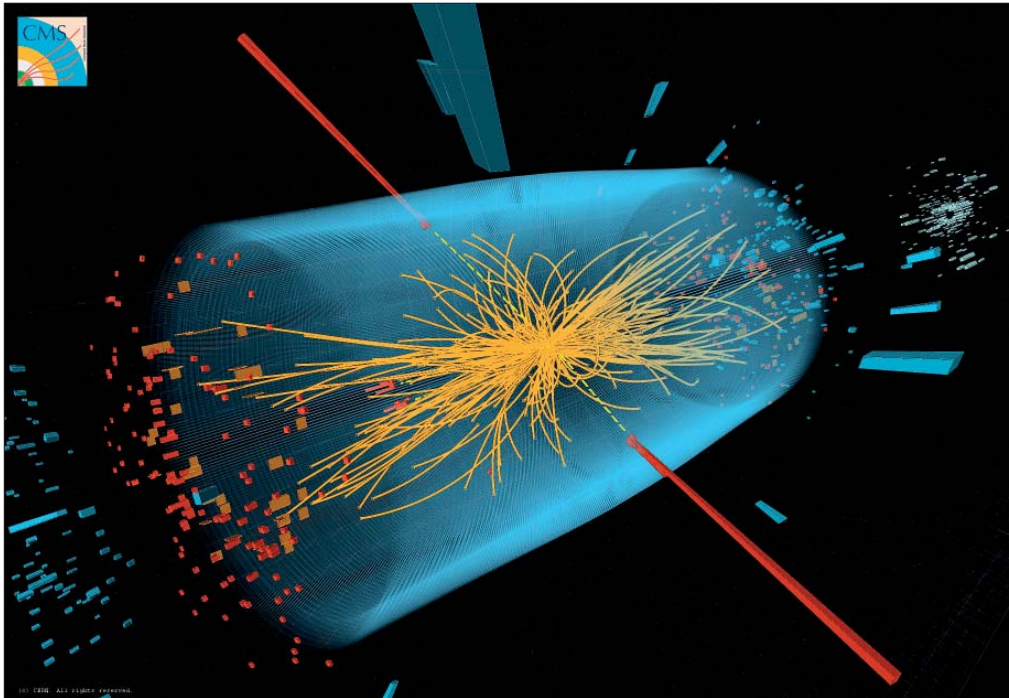
Stofpartiklerne (fermioner) og kraftbærende partikler (bosoner) skelnes fra hinanden ved en fundamental egenskab kaldet spin. Spin kan betragtes som et mål for, hvor meget en partikel roterer omkring sig selv. En partikels spin afhænger af, hvilken partikeltypen den er – dvs. hvilke elektroner har samme spin, alle op-quarker har samme spin mv. Fordi det er en kvanteegenskab, er spin enten halvtalligt eller heltalligt. Bosoner har heltalligt



hvorledes de opfører sig, når man har mange af dem samlet på ét sted. I et atom befinder elektronerne sig i en række skaller, som blandt andet Niels Bohr beskrev. Dette blev senere forklaret af den østrigske teoretiske fysiker Wolfgang Pauli som en konsekvens af, at to elektro-

ner ikke kan befinde sig i den samme bane omkring atomkernen. Partikler, der, ligesom elektronen, ikke kan findes flere af i samme tilstand eller bane, kaldes *fermioner*. Det gælder for alle stofpartiklerne. Derimod ved vi, at fotoner i en lysstråle meget gerne vil være i samme

bane eller tilstand. Denne type partikler benævnes *bosoner*, og alle kraftbærende partikler har denne egenskab. I forbindelse med supersymmetri er det således, at hvis en partikel er en fermion, så vil dens superpartner være en boson og omvendt. Dette er helt afgørende for,



Illustrationen viser en typisk "Higgs-begivenhed" målt i CMS-detektoren ved CERN, hvor kollisioner mellem protoner har produceret partikler, der kan være kandidater til Higgs-partiklen. Begivenheden inkluderer bl.a. to højenergi-fotoner (de kraftige røde streger), hvis energi svarer til, hvad man ville forvente ved produktion af en Higgs-partikel. De gule streger er spor af andre partikler produceret ved kollisionen.

hvorledes supersymmetri kan løse en række gåder i partikelfysikken.

Den afgørende higgs-partikel

En essentiel ingrediens i Standard-modellen er, at stofpartiklernes masse og elektriske ladning er resultatet af vekselvirkninger med en mystisk sidste partikel kaldet *Higgs-partiklen*, som også er en boson. Med andre ord anses elektrisk ladning og masse ikke som fundamentale egenskaber, men som afledte egenskaber af vekselvirkningen mellem de enkelte partikler og Higgs-partiklen.

Eksistensen af Higgs-vekselvirkningen er derfor helt essentiel for at få Standard-modellen til at hænge sammen. Men Higgs-partiklen er endnu ikke identificeret eksperimentelt, og det er derfor utroligt spændende at følge med i LHC-eksperimentet ved CERN, der netop leder efter Higgs-partiklen.

Higgs-partiklen giver alle partikler i standardmodellen masse, inklusiv Higgs-partiklen selv!

Dette skyldes, at Higgs-partiklen vekselvirker med sig selv, på samme vis som en elektron kan mærke virkningen af dens eget elektromagnetiske felt, når den bevæger sig. Et problem i denne forbindelse er, at man ikke forventer, at standardmodellen er korrekt ved energier, som er væsentligt højere end dem, man hidtil har undersøgt i eksperimenter. Ved meget høje energier forventer man eksempelvis, at tyngdekraften spiller en vigtig rolle, og at andre partikler end dem vi kender vil dukke op. Dette er ganske naturligt og svarer meget godt til, hvorledes man først opdagede atomet, så kernen, og sidenhen protoner og neutroner. Alt sammen ved progressivt at skrue op for energien i eksperimenterne.

Supersymmetri kan løse Higgs-problemet

Vores teoretiske forståelse af Higgs-partiklen indeholder imidlertid et paradoks, idet beregninger af dens egenskaber skal opfylde to tilsyneladende uforenelige krav. Det første er, at man forventer, at Higgs-

partiklen har en masse, der er omtrent den samme som de tungeste kendte partikler i standardmodellen. Det er nødvendigt for, at Higgs-partiklen kan opfylde sin rolle med at give disse partikler masse. Hvis man forestiller sig, at Higgs-partiklen var meget tungere end dette, vil det være svært at forstå, hvorfor standardmodellens partikler har de egenskaber, vi faktisk observerer.

Imidlertid er det kun de færreste fysikere, der tror, at de partikler, vi kender fra standardmodellen i dag, er de eneste, der findes. Med god sandsynlighed vil eksperimenter med meget højere energier end dem, vi kan præstere i dag, afsløre partikler, der er endnu tungere end de tungeste kendte partikler. Og her kommer paradokset ind i billedet, fordi Higgs-partiklen i så fald også må forventes at være endnu tungere for at kunne give disse partikler masse. Så Higgs-partiklen bliver altså i teorien nødt til på samme tid højst at være så tung som de tungeste kendte partikler i dag – og endnu tungere!

Derfor spekulerer fysikere i, at der må være en grundlæggende forklaring på dette paradoks. De seneste resultater fra LHC ved CERN indikerer faktisk, at Higgs-partiklens masse er meget tæt ved de tungeste partikler i standardmodellen.

Supersymmetri løser på en meget elegant måde paradokset. Det skyldes, at for hver partikel i standardmodellen, som Higgs-partiklen vekselvirker med, er der en tilhørende superpartner, som den nødvendigvis også er nødt til at vekselvirke med og give masse. Et enestående faktum er nu, at modellen forudsiger, at fordi partikler og deres superpartnere er henholdsvis fermioner og bosoner (eller omvendt) så udligner de faktisk hinandens bidrag til Higgs-partiklens masse, således at den i sidste ende stemmer overens med resten af standardmodellen.

Kan også løse problem med mørkt stof

Supersymmetri giver som bonus også en mulig forklaring på problemet med det mørke stof i Universet. Vi ved, at langt det meste stof i Universet er usynligt i den forstand, at det ikke udsender og absorberer elektromagnetisk stråling. Til gengæld kan man meget præcist måle, hvordan tyngdekraften fra det mørke stof påvirker stjerner, gas og støv i Universet. Den mest sandsynlige kandidat til, hvad mørkt stof kan være, er en ny elementarpartikel uden elektrisk ladning. Hvis man kigger på supersymmetri er der netop nogle mulige kandidater her.

I standardmodellen er fotonen, Z -, og Higgs-partiklen uden elektrisk ladning. De supersymmetriske partnere har derfor heller ingen elektrisk ladning og kunne i princippet udgøre det mørke stof. Problemet er bare, at hvis man ser på standardmodellen, er Z - og Higgs-partiklen begge stabile og henfalder hurtigt, mens fotonen ikke har nogen masse og derfor ikke kan bidrage til tætheden af stof. Gælder det samme så ikke for de supersymmetriske partnere? Svaret er både ja og nej. De supersym-

metriske partnere kan ikke være masseløse, fordi supersymmetri er blevet spontant brudt (se boks). Det betyder, at de alle har en ret stor masse, formentlig højere end massen af både Z og H. Men henfalder de så ikke? Svaret er jo, alle på nær én henfalder meget hurtigt, men den letteste af de supersymmetriske partnere kan ikke henfalde. Den letteste supersymmetriske partner har derfor den egenskab, at den er både tung og stabil – med andre ord en ideel kandidat til mørkt stof.

Supersymmetri kan i princippet måles af LHC

I de simpleste supersymmetriske modeller har denne letteste superpartner en masse på omkring 100-1000 GeV (i partikelfysikken angives masse i enheden eV = elektronvolt, som strengt taget er et mål for energi, men masse og energi er jo to sider af samme sag). LHC kan potentielt måle partikler med masser, der er endnu højere, og man kan derfor overveje, om man faktisk kan se beviser på supersymmetri i eksperimentet. Det er langt fra umuligt, men den letteste supersymmetriske partikel bliver næppe den første superpartner, der måles direkte i et acceleratoreksperiment. Problemet er netop, at selv hvis den produceres, vekselvirker den så svagt, at den ikke kan opfanges i de store detektorer ATLAS og CMS, der er beregnet til at måle de partikler, der produceres når protoner kolliderer i LHC. Man vil derfor kun kunne se den letteste superpartner som det, man kalder "missing energy" – altså energi, der undslipper detektoren. Det er mere sandsynligt, at man vil kunne måle nogle af de lidt tungere supersymmetriske partnere, fordi mange af dem vil have meget stærkere vekselvirkninger. Til gengæld er de tungere, og selv hvis supersymmetri findes er det muligt, at LHC på nuværende tidspunkt ikke har høj nok energi til, at de kan produceres.

I så fald må man væbne sig med tålmodighed og vente på den kommende opgradering af LHC i 2013.

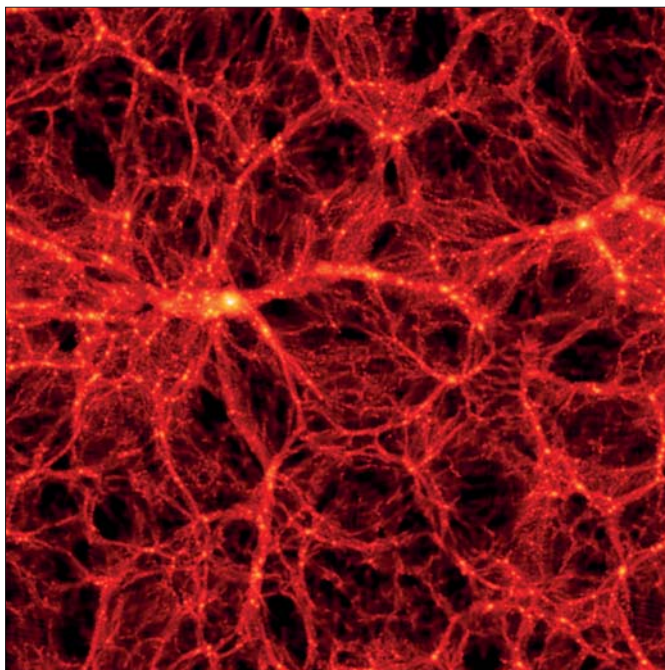


Illustration: Steen Hannestad

Simulering af fordelingen af mørkt stof i Universet. Udsnittet dækker ca. 500 mio. lysår på hver side.

Spontant symmetribrud



Vores forståelse af naturen i form af dens symmetrier skal ses i lyset af, at disse i mange tilfælde faktisk er brudt. Et prominent eksempel herpå er det, man kalder for spontant symmetribrud. Dette kan for eksempel ses i stangmagneter. Når de opvarmes mister de helt deres magnetisme, men denne kommer tilbage, hvis man derpå afkøler dem. Imidlertid er der intet fysisk princip, der fortæller stangmagneten hvilken ende, der skal være nordpol og hvilken, der skal være sydpol. Her foretager naturen altså et spontant valg, hvilket fysikere betegner som et spontant symmetribrud.

Higgs-partiklens eksistens og rolle i standardmodellen er ligeledes et resultat af spontant symmetribrud. Her er der tale om, at naturen spontant har valgt et bestemt vakuum for hele Universet, som netop giver alle de andre partikler deres observerede egenskaber såsom ladning eller impulsmoment. Ganske som i eksemplet med stangmagneten foretages dette spontane valg af vakuum ved lav temperatur. Universet har i dag en meget lav gennemsnitstemperatur. I det tidlige univers var der til gengæld ufatteligt varmt og her var der ikke sket noget spontant symmetribrud endnu, hvilket betød at alle partikler havde de samme egenskaber. Således spiller spontant symmetribrud en afgørende rolle for verden som vi kender den 13,7 milliarder år efter Big Bang.

Om forfatterne



Nikolaj Thomas Zinner er postdoc
zinner@phys.au.dk



Hans Fynbo er lektor
fynbo@phys.au.dk



Steen Hannestad er professor
sth@phys.au.dk



Sujeevan Sivasundaram er studerende
sujeevan77@gmail.com

Alle ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Videre læsning

En populærvidenskabelig bog om supersymmetri.
Gordon Kane: *Supersymmetri*. Basic Books, 2001.

Populærvidenskabelig bog om universet og teoretisk fysik
Steen Hannestad: *Fra superstrengte til stjerner*. Aarhus Universitetsforlag 2003

En meget teknisk introduktion til folk, der er godt inde i standardmodel-fysik
Stephen P. Martin: *A Supersymmetry Primer*.
<http://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356>