

Jagten på supersymmetri i ATLAS-eksperimentet

Af Rasmus Mackeprang, CERN.

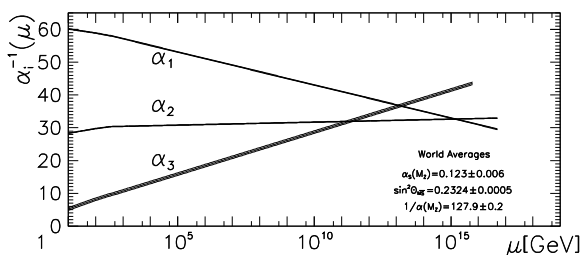
Supersymmetri er en af de mest lovende udvidelser til partikelfysikkens Standardmodel. Den løser mange teoretiske problemer omkring modellen; hvordan holdes Higgsmassen nede? Lader det sig gøre at opskrive Standardmodellens naturkræfter som forskellige manifestationer af én kraft? Supersymmetri kan også på naturlig vis forklare tilstedeværelsen af det såkaldte mørke stof i Universet. I år når ATLAS-eksperimentet starter ved Large Hadron Collider på CERN, får vi bedre muligheder end nogensinde før for at undersøge om supersymmetri er en del af naturen.

Indledning

Supersymmetri, eller "SUSY" (fra engelsk, supersymmetry) er et princip om at naturen indeholder en symmetri mellem partikler med forskelligt spin. Denne symmetri betyder, at der til alle de partikler vi kender i Standardmodellen findes en såkaldt *superpartner*; elektronen er parret med en *selektron*, fotonen med en *photino* og så videre. Modeller der gør brug af denne teori indeholder en utroligt rig fænomenologi. I stedet for én Higgs-partikel får vi fem. Protonen kan blive ustabil. Naturkræfterne kan forenes på en naturlig måde, og teorien giver i mange udgaver en kandidat til mørkt stof. Netop denne kandidat er ledetråden for ATLAS' strategi i jagten på SUSY.

Hvorfor supersymmetri?

For at forstå, hvorfor vi søger efter SUSY på CERN, er det en god idé at kigge på nogle af de problemer der er i partikelfysikkens Standardmodel. Et af disse problemer er *hierarkiproblemet*. Standardmodellen er opskrevet som en matematisk teori funderet i nogle strukturelle antagelser (såkaldte *gauge-symmetrier*) og nogle parametre. Massen af blandt andet Higgs-partiklen bestemmes af disse parametre. Den bliver en sum af mange positive tal der kan være helt op til Planck-skalaen (10^{19} GeV) samt ét stort negativt tal. Imidlertid skal Higgs-massen ligge under 1 TeV. Dette svarer til at lade ti mennesker udvælge et tilfældigt reelt tal mellem 0 og 10, lægge tallene sammen med et negativt tal mellem 0 og 100 som du har skrevet ned på forhånd og få 10^{-17} . Det er ikke umuligt, men det forekommer en anelse unaturligt.



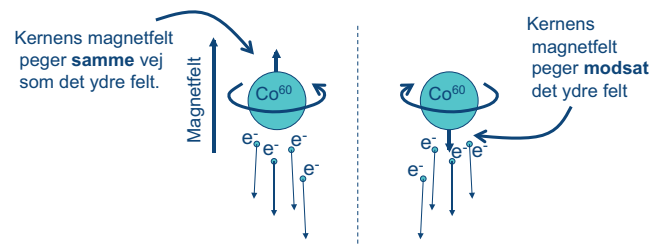
Figur 1. Styrken af de tre naturkræfter i Standardmodellen. De tre linjer repræsenterer (1 divideret med) de såkaldte koblingskonstanter ved forskellige energier. α_1 , α_2 og α_3 er følgelig α_{EM} , α_{Svag} og $\alpha_{Stærk}$.

Et andet problem i Standardmodellen er, at naturkræfterne ikke umiddelbart ser ud til at kunne forenes. Hvis man betragter styrken af henholdsvis elektromagnetismen, den stærke og den svage kernekraft ses det, at de nærmer sig hinanden ved højere energier. Imidlertid mødes de aldrig. Alle målinger indikerer, at de "skyder forbi" hinanden ved høje energier som vist i figur 1.

Det ville være mere naturligt, om disse tre naturkræfter kunne beskrives som lav-energi manifestationer af én naturkraft ved høj energi, og der er i de sidste 20-30 år blevet brugt mange kræfter på at finde netop sådan en forenet teori.

Hvad er supersymmetri?

Symmetrier spiller en helt central rolle i fundamentale teorier om naturen. Ordet "symmetri" bruges dog her i en lidt anden betydning end det alment æstetiske begreb som man normalt forbinder det med. En symmetri i teknisk forstand er en transformation af et fysisk system der efterlader dets vekselvirkninger uforandrede. Når man kan spille fodbold i et tog der kører, skyldes det netop at naturlovene ikke ændrer sig, bare fordi man kører 120 km/t. Det er også normalt en fundamental antagelse, at de grundlæggende naturlove er de samme alle steder. Vi kan altså transformere koordinaterne for et fysisk system ved en vilkårlig flytning og tilskrive det en vilkårlig hastighed, og naturlovene vil stadig være uforandrede.



Figur 2. Paritetsbrud i den svage kernekraft. En prøve af Cobolt-60 kerner i et magnetfelt vil placere sig med deres spin parallelt med det ydre magnetfelt. Da Co-60 er radioaktiv vil prøven udsende elektroner. Dette vil ske i retningen *modsat spinnet*. Spejler vi situationen som vist, vil vi se Co-60 kerner udsende elektroner parallelt med deres spin. Denne situation forekommer ikke i naturen, og den svage kernekraft (som er ansvarlig for β -henfald) adlyder altså *ikke* spejlsymmetri.

Symmetrier i mikrokosmos er normalt formuleret i termer af hvad en given naturkraft “kan se forskel på”. Som eksempel kan vi kigge på Solsystemet. Tyngdekraften er et godt eksempel på en naturkraft der adlyder spejlsymmetri. Vi ser ingen fysiske love overtrådt, hvis vi kigger på et spejlbillede af solsystemet. Den svage kernekraft derimod adlyder ikke spejlsymmetri, hvilket er illustreret i figur 2. Netop dette såkaldte paritetsbrud var en af de centrale opdagelser i det 20. århundrede på vej mod en forståelse af naturkræfterne.

Når supersymmetri er “super” betyder det, at det er en symmetri mellem partikler med halvtalligt spin (fermioner) og partikler med heltalligt spin (bosoner). Princippet dikterer, at der til hver partikel i naturen findes en partikel der er fuldstændig identisk, blot har den et spin der afviger med $\frac{1}{2}$. Til hver fermion (hhv. boson) i Standardmodellen svarer altså en boson (hhv. fermion) med *nøjagtigt* samme egenskaber. Specifikt skal massen og ladningen være den samme.

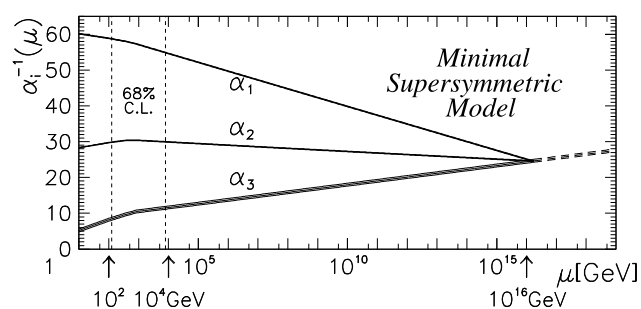
Alle disse nye partikler har navne baseret på dem vi kender fra Standardmodellen. Fermioners superpartnere er blot navngivet ved at sætte et “s” foran partikelnavnet (elektron \rightarrow *selektron*, kvark \rightarrow *skvark* ...), mens bosonernes partnere er navngivet ved at sætte endelsen “-ino” på. Således er *W*-partiklen parret med en *Wino*, mens fotonens superpartner er en *photino* og gluonens en *gluino*. Imidlertid vil de fysisk observerede partikler i nogle modeller være *superpositioner* af disse partnere, hvorfor man ofte taler om *gauginoer* (partnere til *gaugebosoner*).

Higgs-sektoren bliver også voldsomt meget mere kompleks i supersymmetriske teorier. I stedet for én Higgs-partikel, ser vi nu pludselig ikke mindre end fem: h^0, H^0, A^0, H^+, H^- . Deres superpartnere kaldes “higgsinoer”. Disse higgsinoer kan mixe med gauginoerne. Man inddeler derfor ofte blot de nye supersymmetriske fermioner i *charginoer* (ladede) og *neutralinoer* (neutrale).

Det er vigtigt her at understrege, at SUSY ikke er én teori men snarere et princip der har givet anledning til hundredevis af forskellige forslag til, hvordan naturen kunne hænge sammen. Disse “forslag” kaldes for *modeller*. Modeller har altid været en central del af fysikerens arbejde.

Egenskaber ved supersymmetri

SUSY er åbenlyst ikke realiseret i naturen som en eksakt symmetri. Vi er ganske udmærket klar over, at elektronen er en spin- $\frac{1}{2}$ -partikel, og at vi aldrig har set en elektron med spin 1 eller spin 0 for den sags skyld. Hvis SUSY eksisterer, er det altså som en *brudt* symmetri. Lige som Higgs-mekanismen bryder den elektrosvage symmetri (se Higgs-artiklen i dette blad), indeholder enhver SUSY model også en antagelse om *hvordan* SUSY er brudt. Dette minder lidt om Standardmodellens foreningsproblematik, og det er da også muligt at opskrive en supersymmetrisk og forenet teori ved høje energier der giver nøjagtig Standardmodellen ved de energier, som vi kender. Dette er vist i figur 3.



Figur 3. Et eksempel på en teori, hvor naturkræfterne er forenet ved høje energier. De ekstra partikler i teorien korrigerer koblingskonstanterne, så de mødes. I denne type af teorier kaldet *Minimal Super-Gravity* er det tyngdekraften der bryder SUSY.

Udover at kunne forene naturkræfterne har SUSY også den behagelige egenskab, at korrektionerne til Higgs-massen bliver væsentligt mindre. Dette skyldes at alle superpartnere bidrager med modsat fortegn. Kort fortalt betyder dette at hierarki-problemet reduceres til at lade ti personer vælge et tal mellem +10 og -10, lægge dem sammen og få et tal af størrelsesordenen 10. SUSY kan altså sikre, at Higgs-massen bliver stabil. Dette lader sig dog kun gøre, hvis de letteste SUSY-partikler er lettere end 1 TeV. Vi taler om supersymmetri ved *TeV-skalaen*.

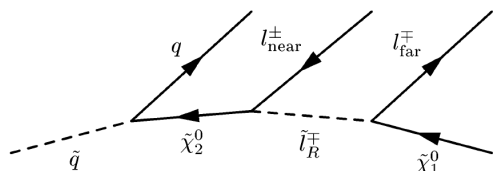
Der er da også tilsyneladende problemer med SUSY. Alle disse nye partikler åbner op for nye henfaldskanaler. Heriblandt kan også protonen lige pludselig henfalde, hvilket godt kan betegnes som et problem. Vi har endnu til gode at observere et protonhenfald til trods for at vi har bedrevet partikelfysik i op mod 100 år. Hvis protonen er ustabil er dens levetid i hvert fald større end 10^{29} år. For at løse dette problem indføres typisk et ekstra kvantetal der er forskelligt for partikler og deres superpartnere. Dette kvantetal kaldes *R-paritet* og er defineret ud fra baryontal (B), leptontal (L) og spin (s):

$$R = (-1)^{3B+L+2s} \quad (1)$$

Kvarker (og skvarker) har baryontal $\frac{1}{3}$, mens leptoner og deres partnere har leptontal 1. Dette resulterer i, at alle partikler i Standardmodellen har R-paritet $R = +1$, mens deres superpartnere har $R = -1$. En interessant konsekvens af dette kvantetal er, at *den letteste superpartner ikke kan henfalde*. Husk her, at vi endnu ikke har set nogle SUSY-partikler. De skal altså enten være meget sjældne, eller også skal de være svære at se. Hvis masserne er under 1 TeV som de jo skal være for at redde Higgsmassen, har vi ingen grund til at tro at de er sjældne. Følgelig ved vi, at de kun vekselvirker gennem den svage kernekraft, og at de altså er at betragte som “tunge neutrinoer”. Som sådan udgør de en perfekt kandidat til mørkt stof. Vi ser kun en mikroskopisk del af det stof der er i Universet. Hvad resten af stoffet er, er et af de store spørgsmål i kosmologien, men det er i dag alment accepteret, at store dele af det netop er tunge partikler der kun vekselvirker svagt. Den samme mekanisme som sikrer os, at protonen forbliver stabil kan altså forklare en af de store astronomiske gåder.

Supersymmetri i ATLAS

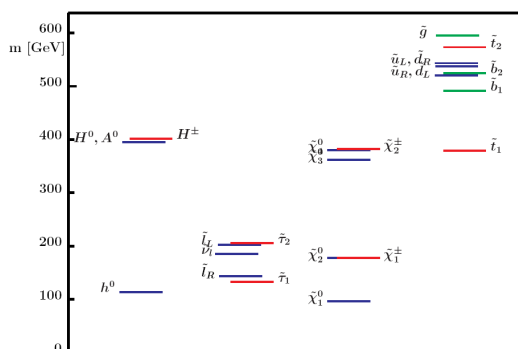
Hvis supersymmetri findes i naturen ved TeV-skalaen som beskrevet tidligere, burde supersymmetriske partikler kunne dannes i sammenstød ved LHC. Disse partikler vil henfalde i kaskader til den letteste supersymmetriske partikel (LSP) som illustreret i figur 4.



Figur 4. En kvarks superpartner (skvark, \tilde{q}) henfalder igennem en kaskade af sekundære partikler til den letteste supersymmetriske partikel (LSP) igennem en neutralino (χ_2^0) og en slepton (\tilde{l}_R^\pm). I dette tilfælde er LSP endnu en neutralino.

Denne partikel er stabil og vekselvirker kun gennem den svage kernekraft. Den er altså at betragte som en "tung neutrino"; den undslipper detektoren uopdaget og efterlader kun en ubalance. Denne ubalance kan kvantificeres ved at betragte begivenheden i en plan transvers (vinkelret) på beam-aksen. Impulsbevarelse i denne plan giver os mulighed for at kvantificere størrelse og retning af den manglende transverse impuls.

Som det kan anes af figur 4, er SUSY begivenheder i de fleste modeller kendetegnet ved en meget høj grad af aktivitet. I dette tilfælde kommer der fra denne ene supersymmetriske partikel en jet og to leptoner. Eksemplet er hentet fra en model kaldet SPS 1a [1]. Modellens massespektrum er gengivet i figur 5.



Figur 5. Massespektrum for SPS 1a modellen. Partiklerne er inddelt i familier. Fra venstre mod højre ses i de fire kolonner: Higgspartikler, sleptoner, charginoer/neutralinoer (superpartnere til W, Z, γ og Higgspartiklerne) og skvarker + gluinoen. Den letteste partikel er en neutralino (χ_1^0).

Som det kan ses, er skvarkerne forholdsvis tunge, mens der er et rigt udvalg af henfaldskæder til χ_1^0 (LSP'en). I kollisionen vil der være dannet to supersymmetriske partikler hvoraf den anden oftest går til tre jets og en neutralino. For at teste om SPS 1a er en god model skal man altså kigge efter alle disse elementer:

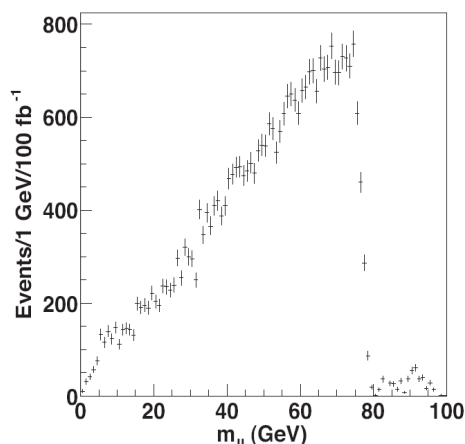
- Fire jets (en jet opstår når en kvark eller en gluon udsendes med stor energi)
- To leptoner af samme type (e/μ) men med modsat ladning
- Manglende transvers impuls

Idet de forskellige SUSY-modeller forudsiger et komplet spektrum af partikler, er det imidlertid ikke nok at pege på en sådan begivenhed og sige: "SUSY!". Man er også nødt til at rekonstruere masserne af de involverede partikler og sammenligne med forskellige modeller. Fra de to leptoner kan man for eksempel rekonstruere deres invariante masse:

$$m_{ll} = E_{l_1} + E_{l_2} - (\vec{p}_{l_1} + \vec{p}_{l_2}) \quad (2)$$

Den kan måles med stor præcision og er opadtil begrænset af:

$$(m_{ll}^2)_{max} = \frac{(m_{\chi_2^0}^2 - m_l^2)(m_l^2 - m_{\chi_1^0}^2)}{m_l^2} \quad (3)$$



Figur 6. Et eksempel på, hvordan det kunne se ud, hvis SPS 1a var en god model for naturen. Kanten til højre, viser hvor $m_{ll,max}$ ligger, men da henfaldene jo ikke altid vil ske, så m_{ll} er maksimal fordeler begivenhederne sig som vist. Baggrunden fra andre processer der kunne give lignende begivenheder er trukket fra.

Ved at måle denne, og andre størrelser, kan man forbinde masserne i teorien med målingerne og således udforske massespektret. Efterhånden som vores data bliver mere og mere præcise vil vi blive i stand til at udelukke eller bestyrke modeller gennem målinger som denne.

Litteratur

- [1] B. C. Allanach m.fl. (2001), i Proc. of the APS/DPF/DPB Summer Study on the Future of Particle Physics (Snowmass 2001), red. N. Graf, Snowmass, Colorado, 30 Jun-21 Jul 2001, pp P125, [arXiv:hep-ph/0202233].



Rasmus Mackeprang har en ph.d. i eksperimentel partikelfysik fra Københavns Universitet. Han er i dag ansat som "research fellow" ved CERN, hvor han er tilknyttet ATLAS-eksperimentet.