

Jagten på de ekstra dimensioner

Af Jørgen Beck Hansen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Idéen om ekstra dimensioner ud over vores, fra dagligdagen, velkendte fire dimensioner, har eksisteret i ca. 90 år¹. Muligheden for små ekstra dimensioner, hvor Universet er fanget på en firedimensional membran, kan forklare hvorfor tyngdekraften er så svag på partikelniveau. Med opstarten af verdens kraftigste supermikroskop – Large Hadron Collider – kan eftersøgningen af små ekstra dimensioner begynde

Indledning

Oprindelsen til idéen om ekstra dimensioner tager sit udgangspunkt i partikelfysikkens søgen efter at forene alle naturens kræfter i én fuldstændig teori – på engelsk TOE, “Theory Of Everything” – som beskriver verden på partikelniveau. Partikelfysikkens Standardmodel har således med succes kunne forklare alle eksperimentelle udfald til dags dato og “modstået” mere end 30 års ihærdige forsøg fra partikelfysikere på at finde afvigelser eller fejl. Alligevel ved vi at den ikke kan være den fuldstændige teori, for den inkluderer ikke den mest fundamentale kraft af alle: Tyngdekraften. Der har i årevis været gjort mange forsøg på at inkludere tyngdekraften i en komplet teori, men uden succes. Strengteori – se artikel i næste nummer af Kvant – anses i dag for at være en af de bedst udviklede formalismer til at kunne forene tyngdekraften med de 3 andre kræfter i naturen. Men for at dette kan lade sig gøre kræves eksistensen af to radikale idéer: Supersymmetri og ekstra dimensioner. I strengteori bliver begge dog først relevante ved så store energier i partikel-kollisionerne, at man antageligt aldrig vil kunne opdage dem.

Det er imidlertid værd at bemærke, at netop den manglende beskrivelse af tyngdekraften måske gemmer sig indirekte bag den, vel nok største, manglende opdagelse for Standardmodellen: Higgs-partiklen. For tyngdekraften beskriver tiltrækningen mellem objekter med masse og Higgs-mekanismens eneste formål er at forklare, hvordan partiklerne i standard modellen netop kan tænkes at få de masser som vi har målt. Med indførslen af Higgs-mekanismen og den tilhørende Higgs-partikel opstår imidlertid et nyt problem. Som beskrevet i artiklen om supersymmetri, så er problemets kerne at skalaen for tyngdekraften, Planck-skalaen, nok er så utroligt meget større end alle de andre kræfters skala, men den kan alligevel direkte influere Higgs-partiklen og dens masse. Indførslen af supersymmetri er en velkendt og populær mulig løsning på at begrænse dette problem. En anden, meget ny og mere kontroversiel løsning, ligeledes inspireret af strengteori, er at introducere ekstra rumlige dimensioner (ED) ved lavere energier.

Der er naturligvis flere mulige løsninger på dette problem og måske er Higgs-partiklen blot en skjult manifestation af tyngdekraften? Hvem ved – men en

ting er sikker: De næste 10 år med LHC kommer på en eller anden måde til at stå i tyngdekraftens tegn og vil blive utrolig spændende!

Planck-skalaen

Planck-massen anses af fysikere for at angive den omtrentlige energiskala for kvantegravitation. Den er bestemt ved dimensionsanalyse og er en kombination af de fundamentale naturkonstanter for tyngdekraften (G_N), Relativitetsteorien (c) og kvantemekanikken (\hbar):

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} = 1,220862(61) \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2,$$

svarende til ca. en 1/5000 af en loppes vægt. Man kan ligeledes konstruere en karakteristisk længde, Planck-længden,

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}} = 1,616252(81) \times 10^{-35} \text{ m},$$

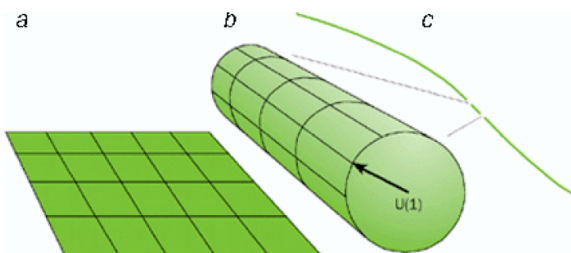
hvilket er omkring 10^{20} gange mindre end størrelsen af en proton.

Velkommen til de ekstra dimensioner

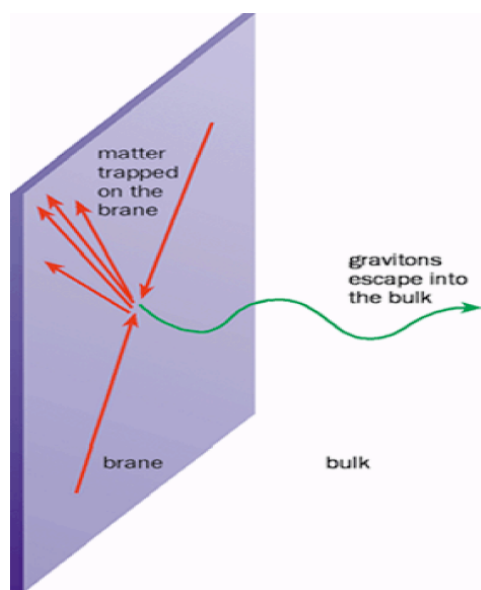
I mange år har strengteoriene antaget at der var 6 ekstra dimensioner ud over de 4 velkendte således, at tyngdekraften – sammen med de 3 andre kræfter – befandt sig i et 10 dimensionalt rum-tid kontinuum. Nu er vi alle bekendte med de sædvanlige 3 rumlige dimensioner: Højde, længde og dybde, og nok er det svært at forestille sig hvordan ekstra dimensioner vil se ud, men vi burde på en eller anden måde kunne se effekten af dem. Men hvorfor har vi ikke set dem? Et muligt svar har været kendt i lang tid: Fordi disse ekstra dimensioner er så små i forhold til vores 4 kendte dimensioner, at vi ikke kan måle dem. Den naturlige størrelse antages i strengteoriene at være omkring Planck-længden, ca. 10^{-35} m, som angiver den

¹Theodor Kaluzas artikel er fra 1921, men der var allerede et skandinavisk bidrag i 1914. Se mere på <http://en.wikipedia.org/wiki/Kaluza-Klein>.

karakteristiske afstand hvor tyngdekraften bliver lige så stærk som de andre kræfter. Forklaringen på at de ekstra dimensioner er så små skyldes at de er "krøllet" sammen, via den såkaldte Kaluza-Klein mekanisme – man kan forestille sig et næsten uendeligt langt (de sædvanlige dimensioner) men meget tyndt (de ekstra dimensioner) sugerør. Hvis dette virkelig er tilfældet, så vil ethvert fænomen knyttet til de ekstra dimensioner ligge langt udenfor rækkevidden af partikelfysikeksperimenter på Jorden. Til sammenligning vil LHC "kun" være følsom for effekter ned til 10^{-19} m.



Figur 1. Illustrationen viser hvordan man forestiller sig at ekstra dimensioner vil fremstå når man ser dem på forskellige afstande: (a) Afstande meget mindre end størrelsen på de ekstra dimensioner, (b) afstande sammenlignelige med dimensionernes størrelse, og (c) meget store afstande.



Figur 2. Standardmodellens partikler tænkes alle fanget på en 4 dimensional membran ("Brane"). Kun den kraftbærende partikel for tyngdekraften, gravitonen, kan bevæge sig frit i de ekstra dimensioner ("Bulk").

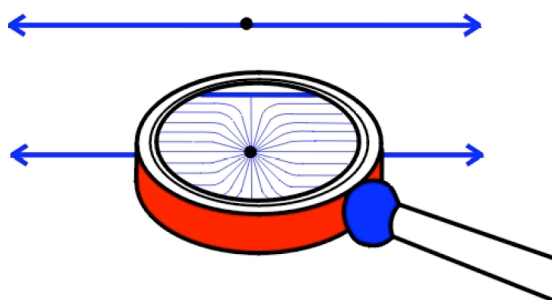
I 1998 ændrede denne opfattelse sig dramatisk da de 3 teoretikere, Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos og Gia Dvali, foreslog muligheden for at tyngdekraften var ene om at kunne bevæge sig i de ekstra dimensioner, mens alle andre partikler og kræfter var bundet til at bevæge sig i de sædvanlige 4 dimensioner. Dermed var idéen om at vores verden er en 4 dimensional membran i et højere dimensionalt rum født. Pludselig behøver de ekstra dimensioner ikke at være voldsomt små, da de tre kræfter som vi kender bedst, er fanget i 4 dimensioner og slet ikke kan mærke de ekstra

dimensioner. Ifølge matematikken som beskriver disse ekstra dimensioner, så skulle tilfældet med kun én enkelt ekstra dimension betyde en størrelse af denne svarende til vores solsystem - hvilket for længst burde være fundet. Men allerede med blot 2 ekstra dimensioner bliver størrelsen mindre end 1 mm og med 3 dimensioner svarer størrelsen til diameteren på et atom.

Det oplagte spørgsmål er så naturligvis: Hvor præcist har vi målt tyngdekraften på korte afstande? Forbavsende dårligt! Konventionelle ultra-præcise eksperimenter, der måler tyngdekraften mellem to massive objekter, kan i dag sætte en grænse for størrelsen af ekstra dimensioner på omkring 0,2 mm.

For at kunne sætte bedre grænser er det nødvendigt at bruge meget kraftige mikroskoper i form af partikelacceleratorer. Moderne partikelacceleratorer rundt om i verden har indtil nu studeret de elektromagnetiske, stærke og svage kræfter i kollisioner med energier op til 1000 GeV uden at finde bevis for ekstra dimensioner og i dag forventer man derfor at størrelsen af disse er mindre end 10^{-18} m. Dette svarer til at hvis vi forstørret et atom til Jordens størrelse, så vil de ekstra dimensioner være på størrelse med et knappenålshoved eller mindre i forhold hertil. LHC acceleratoren bliver verdens største supermikroskop, som vil gøre vores hidtidige opløsningsevne 10 gange bedre.

En meget vigtig konsekvens af idéen om en 4 dimensional membran er, at tyngdekraften faktisk slet ikke er svag. Forklaringen er, at en teori med flere dimensioner har en meget lavere Planck-skala, M_{ED} , som kan være så lav som $1000 \text{ GeV}/c^2$, hvorved tyngdekraften bliver ligeså stærk som de andre kræfter. Den store værdi for den 4-dimensionale Planck-skala, M_P , skyldes de ekstra dimensioner: Tyngdekraften spredes ud i de ekstra dimensioner. Derfor svækkes tyngdekraften meget mere for afstande, der er mindre end størrelsen af de ekstra dimensioner. På store afstande ser vi den sædvanlige svage styrke af tyngdekraften i 4 dimensioner. Den virkelige Planck-skala er altså meget mindre og den synes meget høj fordi vi kun betragter tyngdekraften i 4 dimensioner. På den måde fjerner eksistensen af ekstra dimensioner også problemet med Planck-skalaens betydning for massen af Higgs-partiklen – for nu er den virkelige Planck-skala omtrent magen til de andre skalaer i Standardmodellen.



Figur 3. På store afstande virker tyngdekraften svag fordi vi kun mærker den del af feltet som udbreder sig i de normale dimensioner, men på afstande mindre end størrelsen af de ekstra dimensioner kan vi føle den fulde styrke af tyngdefeltet.

Jagten kan gå ind!

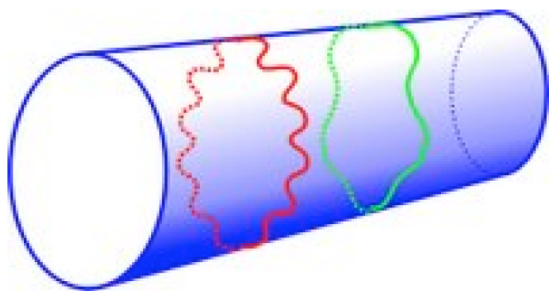
I dag findes der flere modeller med ekstra dimensioner, som man groft kan inddelle i tre forskellige grupper: Store ekstra dimensioner, Universelle ekstra dimensioner og "warped" (bøjede) ekstra dimensioner. Grupperingen afspejler de forskellige antagelser om, hvorledes partikler og kræfter kan bevæge sig i de ekstra dimensioner. Fælles for alle er, at skalaen for tyngdekraften er meget lavere end Planck-massen.

Men kan eksistensen af ekstra dimensioner detekteres? Ja! Afhængigt af hvilken størrelse, form og model, der beskriver de ekstra dimensioner, vil forskellige signaturer afsløre deres eksistens ved LHC. Alle modellerne for ekstra dimensioner giver anledning til en række nye bidrag til mange af de processer som kan ske i sammenstødene mellem protonerne i LHC, nogle modeller giver desuden anledning til nye partikler og andre sågar til produktion af sorte huller!

At bestemme disse fingeraftryk fra ekstra dimensioner i en kollision ved LHC minder på mange måder om et detektiv arbejde efter et voldsomt sammenstød mellem biler, hvor vi skal finde alle, eller de rigtige, dele for at kunne bestemme bl.a. hastighed, bilmærke og model. Ud af en kollision i LHC kommer i hundredvis af partikler, som hver især skal typebestemmes, og deres energi og bevægelsesretning skal måles. Derefter begynder det komplekse arbejde med at samle alle målingerne til et fuldstændigt billede af en enkelt kollision.

En skov af nye partikler

Den meget begrænsede størrelse og, endnu vigtigere, den periodiske form af de sammenkrøllede ekstra dimensioner medfører, at bevægelsesmængden i de ekstra dimensioner bliver *kvantiseret*. Det betyder at partikler som bevæger sig i de ekstra dimensioner kun kan have bestemte diskrete værdier af deres bevægelsesmængde langs disse. Afstanden mellem de enkelte værdier er omvendt proportionalt med radius. Dette svarer på mange måder til en guitar-streng, som foruden sin grundtone har et uendeligt antal overtoner med en fast afstand i frekvens, der kun afhænger af længden.



Figur 4. I lighed med en guitarstreng, kan der være svingninger langs med de små ekstra dimensioner svarende til grundtonen og alle mulige overtoner. Hver overtone giver anledning til en ny anslået tilstand, en såkaldt KK-tilstand.

Set fra vores 4-dimensionale verden vil partikler med bevægelsesmængde i de ekstra dimensioner synes

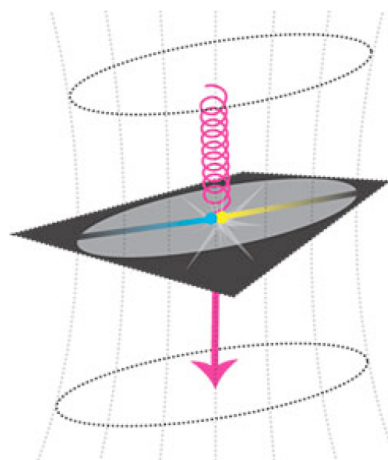
at have en mindre bevægelsesmængde – de ser ud som om de har fået ekstra masse. Partikler som kan bevæge sig i de ekstra dimensioner vil således kunne komme med en uendelig "stige" af mulige bevægelsesmængder, som i 4 dimensioner ser ud som kopier af samme partikel med forskellige masser! Disse såkaldte KK-tilstande (fra Kaluza-Klein) kan i princippet skabes i kollisioner ved LHC, hvis energien er høj nok.

Det interessante er imidlertid, at alle Standardmodellens partikler, som er fanget på den 4 dimensionale membran, også har KK-tilstande, men den relevante skala for deres uendelige stige af kopier er den nye og lavere Planck-skala, M_{ED} , på 1000 GeV/ c^2 eller højere. Dermed kan LHC faktisk producere disse nye KK-partikler, som f.eks. KK-elektroner, KK-fotoner osv. Da alle disse tungere udgaver stadig mærker de andre kræfter i Standardmodellen vil vi være i stand til at detektere disse nye dramatiske signaturer. Hvis de skabte KK-partikler henfalder, vil et af deres henfaldsprodukter altid være den tilsvarende meget lettere standardmodelpartikel, som typisk vil have en voldsom energi, da den kommer fra en ekstrem tung KK-partikel.

Hvis de ekstra dimensioner ikke er alt for små, kan vi være heldige at kunne producere flere (overtoner) af disse anslåede tilstande ved LHC og dermed ikke bare opdage ekstra dimensioner, men også bestemme antallet, størrelsen og endda formen af dem.

Gravitationel stråling

Foruden muligheden for at skabe et væld af nye KK-partikler, så betyder en tilstrækkelig lav karakteristisk skala for tyngdekraften, at vi med sikkerhed vil kunne producere gravitationel stråling – også kaldet gravitoner – ved LHC. Da gravitonen kan vekselvirke med alle partikler som har energi (hvilket jo også er masse) så vil den bidrage til mange processer som kan skabes i kollisionerne i LHC, dog kun betydeligt for kollisionsenergi omkring M_{ED} eller højere.



Figur 5. Da gravitonen kan bevæge sig i de ekstra dimensioner, vil et muligt tegn på disse være en kollision, hvor en partikel, og dermed energi, er "forsvundet", fordi en graviton er blevet udsendt i de ekstra dimensioner. Det ses i vores 4 dimensionale detektor som om at energi og bevægelsesmængde ikke er bevaret.

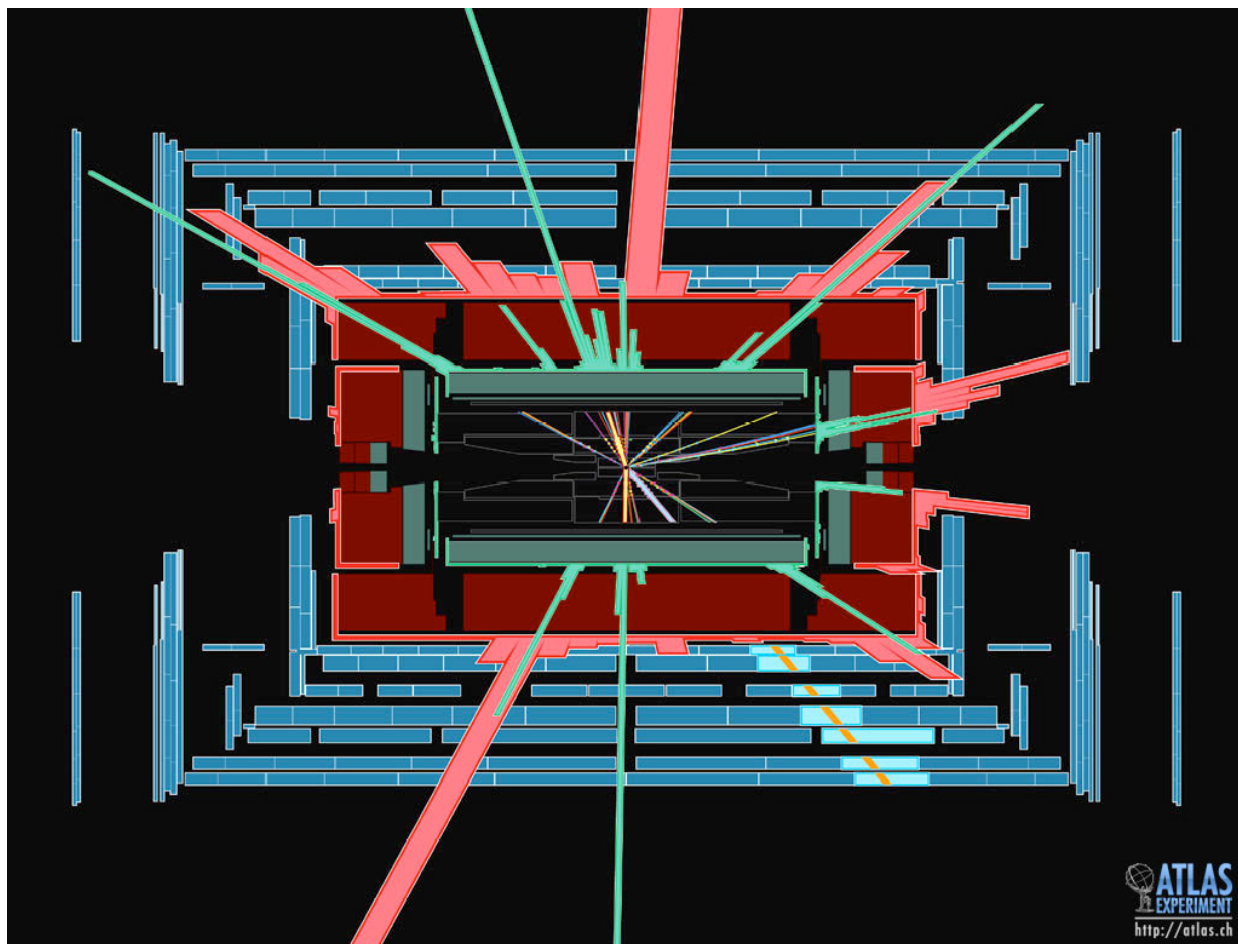
En mulighed for at opdage ekstra dimensioner er at opdage en graviton som forsvinder ud af vores 4 dimensioner. Da energi og bevægelsesmængde er bevaret i en kollision, så forventer vi, at partikler vil blive udsendt i alle retninger som et slags fyrværkeri. Et tydeligt tegn på ekstra dimensioner vil derfor være en kollision, hvor alle partikler kun udsendes i én bestemt retning, da det indikerer at en usynlig partikel må være udsendt i modsat retning. Denne partikel kan være en graviton som undslipper ud i de ekstra dimensioner. Desværre er gravitonen ikke den eneste usynlige partikel. Neutrinoer vekselvirker kun meget svagt med almindeligt stof og kan derfor nemt bevæge sig igennem hele den enorme detektor uden at blive opdaget. Men typisk vil massen og energien af gravitonen være meget stor, og vi forventer derfor at se et overskud af kollisioner, hvor der mangler meget energi i forhold til vores kendskab fra Standardmodellen.

Et sort hul? Ja tak!

Et af de vel nok mest spektakulære tegn på eksistensen af ekstra dimensioner er muligheden for at producere mikroskopiske sorte huller ved LHC.

Ifølge generel relativitetsteori så vil et sort hul blive skabt, hvis et massivt objekt bliver sammenpresset på et meget lille område. Den præcise mening af "meget lille" er givet ved den såkaldte Schwarzschild-radius. Denne radius afhænger, foruden af objektets masse, også af egenskaberne ved mulige skjulte ekstra dimensioner, da disse ændrer Planck-skalaen og dermed gravitationskonstanten. I nogle af modellerne for ekstra dimensioner kan Schwarzschild-radien bliver betydeligt større og det bliver så meget nemmere at lave et sort hul. Under disse forudsætninger kan der måske skabes sorte huller i kollisioner af protoner ved LHC. For når to protoner kolliderer i LHC vil der være en lille chance for, at et par af protonernes bestanddele (kvarker) vil ramme hinanden næsten perfekt med meget høj energi. Dermed vil der opstå en voldsom koncentration af energi på et minimalt område således, at systemet vil kollapse og blive til et sort hul.

Hvor mange sorte huller forventer vi at kunne skabe ved LHC? Svaret afhænger lidt af modellerne for de ekstra dimensioner, men for M_{ED} på ca. 1000 GeV/c² viser nogle af modellerne at der kan blive produceret omkring 1 sort hul per sekund!



Figur 6. En simuleret kollision mellem to protoner, der skaber et mikroskopisk sort hul og hvor henfaldsprodukterne ses i ATLAS-detektoren ved LHC. Det sorte område i midten viser den inderste spor-detektor (kraftigt forstørret). De to kraftigere gule linjer angiver to elektroner med høj energi. Det grønne område repræsenterer det elektromagnetiske kalorimeter og de tilhørende grønne søjler viser, hvor meget energi der kommer ud i en given retning. Tilsvarende markerer det røde område det hadroniske kalorimeter og de røde søjler viser hvor meget energi der er afsat i dette. Yderst ses muon-detektoren (blå) og passagen af en enkelt muon er indikeret med lyseblåt for illustrationens skyld.

Schwarzschild-radius for sorte huller

Schwarzschild radien for et massivt objekt med massen m er defineret som den størrelse objektet skal komprimeres til for, at man skal bevæge sig med lysets hastighed for at kunne undslippe dets tyngdefelt. Den er givet ved

$$r_S = \frac{2G_N m}{c^2},$$

hvor $G_N = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Et sort hul opstår således når et objekt sammentrykkes til en størrelse som er mindre end dets Schwarzschild radius. Jordens Schwarzschild-radius er på ca. 9 mm.

Umiddelbart kunne man tro, at skabelsen af et sort hul vil betyde enden for vores mulighed for at opdage ekstra dimensioner, da vi per definition ikke kan se hvad der sker indeni det sorte hul. Men heldigvis har mikroskopiske sorte huller en lille masse og er derfor ekstremt ustabile. Intensiteten af Hawking-strålingen, den kvantemekaniske proces som beskriver hvorledes sorte huller kan udsende partikler, afhænger dramatisk af massen på det sorte hul. Jo mindre masse det sorte hul har des mere energi bliver der udsendt. For mikroskopiske sorte huller produceret ved LHC betyder det, at de henfalder næsten ligeså hurtigt som de bliver skabt – typisk hurtigere end en billiontedel af en billiontedel af et sekund (10^{-25} s). Henfaldet af et sort hul vil dog efterlade et meget karakteristisk fingeraftryk af partikler i en detektor, i form af en meget symmetrisk eksplosion til en række partikler med høj energi, herunder sågar Higgs-partikler – hvis de altså eksisterer. Ved at studere antallet af sorte huller der produceres, samt bestemme hvor mange og hvilke partikler, der skabes i deres henfald, kan vi lære noget om antallet og størrelserne af de ekstra dimensioner. Et eksempel på udfaldet af en kollision, hvori der skabes et mikroskopisk sort hul kan ses på figur 6.

Menneskeskabte mikroskopiske sorte huller?

Skal vi bekymre os om dem? Kunne disse mikroskopiske sorte huller pludselig begynde at vokse for til sidst at opluge hele Jorden? Tanker som disse har fornylig skabt en del overskrifter i hjemlige og udenlandske medier og har naturligvis afstedkommet et sagsanlæg i USA [1].

Men der er absolut ingen grund til nogen som helst bekymring, for sagen er, i al sin enkelthed, at Jorden allerede er og, igennem milliarder af år, har været genstand for kollisioner mellem partikler fra rummet med ekstrem høj energi og atomer i Jordens atmosfære. Det er den såkaldte kosmiske stråling [2], der hovedsagligt består af protoner, som er blevet accelereret til voldsomme hastigheder på deres vej igennem Universet. Energien i disse kollisioner kan være enorm – mere end 1000 gange større end energien i en kollision ved LHC. Og nok sker der mange tusinde sådanne kollisioner med

meget høj energi om året, men de er spredt ud over hele Jordens overflade, hvorfor vi ikke endnu har kunnet be- eller afkræfte eksistensen af mikroskopiske sorte huller ved at studere disse med detektorer anbragt nogle få steder på Jorden. Så i virkeligheden er spørgsmålet snarere om vi overhovedet vil kunne producere og detektere sorte huller, for i dag er der intet bevis for nødvendigheden af ekstra dimensioner, og selv hvis de findes, kan deres form og størrelse betyde, at sorte huller ikke vil blive skabt i tilstrækkeligt antal til, at vi kan finde dem. På en måde skal vi være umådeligt heldige for, at alle disse betingelser bliver opfyldt, men gevinsten vil tilsvarende være formidabel: Det helt tydelige og spektakulære bevis på eksistensen af ekstra dimensioner!

Og nok giver LHC os ikke svaret på alting (heldigvis) men den vil kaste lys over en stor og vigtig del af en verden som i dag er ukendt.

There is a single light of science, and to brighten it anywhere is to brighten it everywhere.

Isaac Asimov

Litteratur

- [1] LHC Safety Assessment Group, Review of the Safety of LHC Collisions (arXiv:0806.3414v1)
- [2] Tema artikler om kosmisk stråling, Kvant nr. 4 fra 2007
- [3] For de nysgerrige: http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_physics



Jørgen Beck Hansen arbejder med eksperimentel partikelfysik på Niels Bohr Institutet og er tilknyttet ATLAS-eksperimentet på CERN – det europæiske center for partikelfysik.

LHC og partikelfysik på Internettet

- *NBI Science Explorer*, har små film om LHC, <http://www.nbi.ku.dk/scienceexplorer>
- *CERNs hjemmeside*, <http://www.cern.ch>
- *LHC Milestones* (LHC 1994-2008), <http://lhcmilestones.web.cern.ch>
- *The Particle Adventure*, kvarker for begyndere, <http://particleadventure.org>
- *LHC@home*, regn selv på LHC-data, <http://lhcatome.cern.ch>
- *Large Hadron Rap*, der er blevet et hit på www.YouTube.com, er skrevet og sunget af en videnskabsjournalist ved CERN.