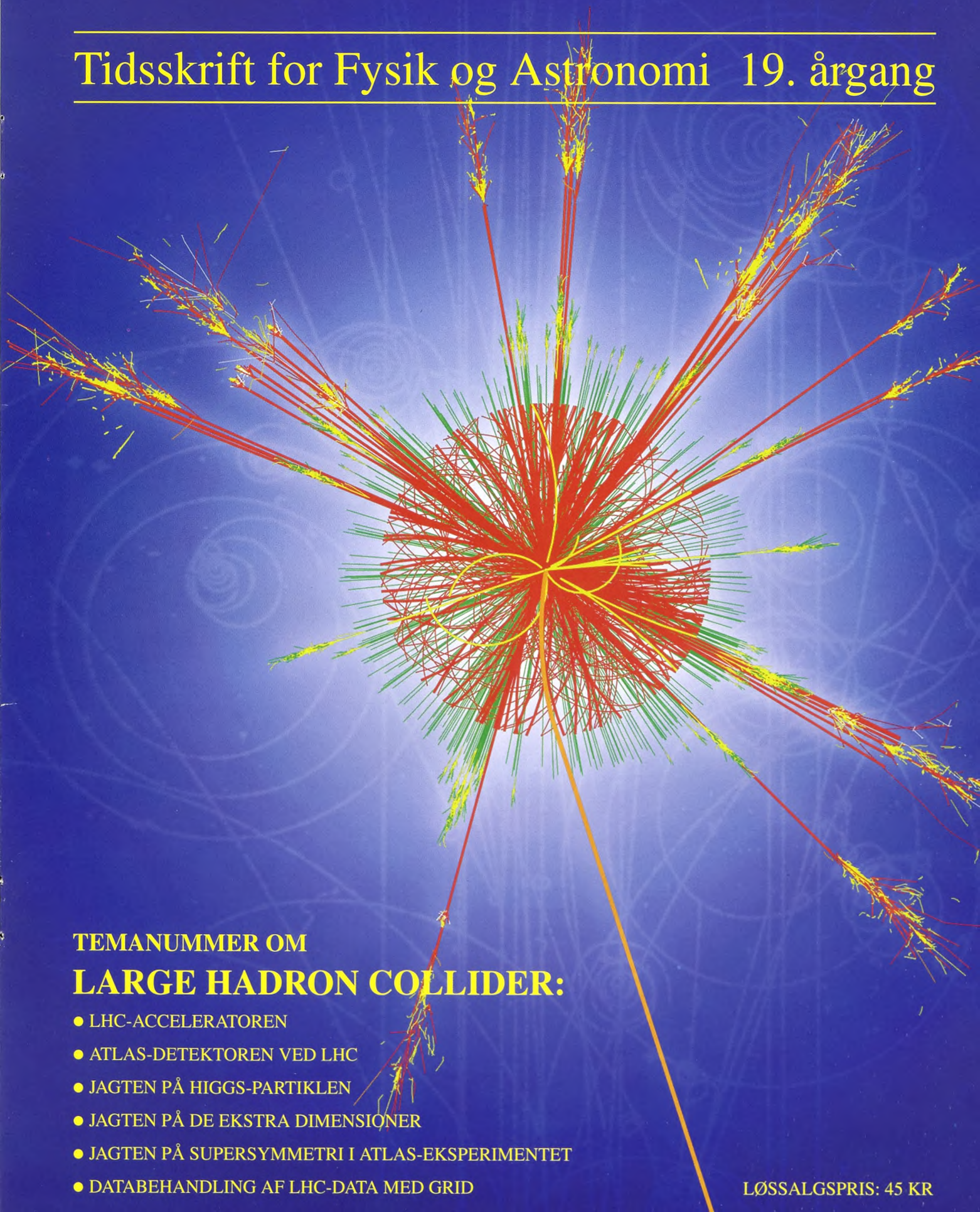


KVANT

September 3
2008

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 19. årgang



TEMANUMMER OM LARGE HADRON COLLIDER:

- LHC-ACCELERATOREN
- ATLAS-DETEKTOREN VED LHC
- JAGTEN PÅ HIGGS-PARTIKLEN
- JAGTEN PÅ DE EKSTRA DIMENSIONER
- JAGTEN PÅ SUPERSYMMETRI I ATLAS-EKSPERIMENTET
- DATABEHANDLING AF LHC-DATA MED GRID

LØSSALGSPRIS: 45 KR

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af

Astronomisk Selskab,
Dansk Fysisk Selskab,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærens Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.)
Christianshavns Gymnasium
Torsten Freltoft, Sophion Bioscience A/S
Thomas R. N. Jansson (webredaktør)
Mogens Esrom Larsen,
Matematisk Institut, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør)
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
Danmarks Rumcenter, DTU
Finn Berg Rasmussen, Ørsted Lab, KU
Svend E. Rugh

Abonnementspris : 165 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 3000. Tryk: Brunder Tryk ApS, Brønderslev. ISSN 0905-8893



Produktionsplan

Nr. 4-08 udkommer ca. 15. december
Nr. 1-09 udkommer ca. 15. marts
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Åbningen af LHC den 10. september 2008

Jørn Dines Hansen og Michael Cramer Andersen 3

LHC-acceleratoren

Mogens Dam 4

ATLAS-detektoren ved LHC

Esben Bryndt Klinkby 8

Standardmodellens partikler og kræfter

Esben Bryndt Klinkby 11

Jagten på Higgs-partiklen ved LHC

Katrine Facius og Stefania Xella 13

Aktuelle bøger

Thomas R. N. Jansson, Sven Munk og Michael Cramer Andersen 16

Annonce 17

Stjernehimlen

Michael Cramer Andersen 18

KVANT-nyheder

John Rosendal Nielsen og Sven Munk 20

Ohms lov – breddeopgave 32 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 22

Jagten på de ekstra dimensioner

Jørgen Beck Hansen 24

Jagten på supersymmetri i ATLAS-eksperimentet

Rasmus Mackeprang 29

Databehandling af LHC-data med GRID

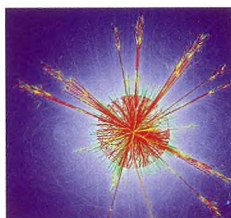
Frederik Orelana 32

Annonce 34

Foreningsnyt – foredrag i efteråret 35

Galaksehobes kollision afslører mørkt stof

John Rosendal Nielsen Bagsiden



Billedet på forsiden viser en simulering af en begivenhed, registreret med ATLAS-detektoren, hvor et mikroskopisk sort hul dannes i en kollision mellem to protoner. I baggrunden kan man ane et boblekammerbillede, som tidligere blev anvendt hyppigt til at analysere partikelkollisioner (begge billeder fra CERN).

KVANT udsendes gratis til fysiklærerne ved alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra fysikinstitutterne på Danmarks Tekniske Universitet samt Københavns, Syddanske, Aalborg og Aarhus Universiteter.

Åbningen af LHC den 10. september 2008

Af Jørn Dines Hansen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og Michael Cramer Andersen, KVANT.

Opstart af LHC

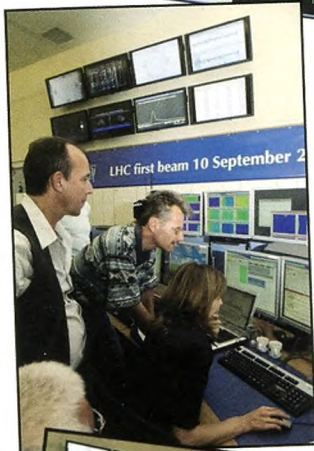
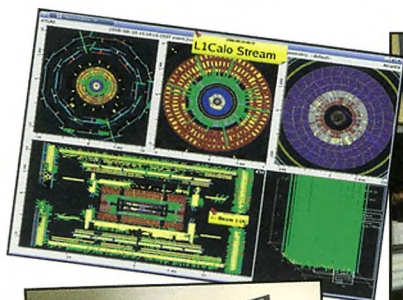
Så kom den endelig – dagen hvor de første protoner skulle sendes hele vejen rundt i CERNs nye accelerator “Large Hadron Collider”, eller LHC. Onsdag den 10. september var teknikere og fysikere klar ved kontrolskærmene sammen med journalister fra hele verden.

Den danske leder af den gruppe som laver ATLAS-eksperimentet, Jørn Dines Hansen fra Niels Bohr Institutet, oplevede dagen således:

“Det var en spændende dag, som jeg tilbragte dels i den store globe, dels i main auditorium – hvor billede og lyd var bedre – og i ATLAS-kontrolrummet. Alle steder var fyldt til bristepunktet. Især i de to sidste var man spændt og derfor var klapsalverne store, hver gang man gjorde fremskridt, dvs. hver gang man klarede at komme gennem en sektor, hvoraf der er otte i alt. Man

havde forventet at den første stråle kom rundt første dag og næste dag den anden. Men det gik meget hurtigere. Allerede efter en time var første stråle kommet hele vejen rundt. Anden stråle blev klar på halvanden time om eftermiddagen. Da alt gik så hurtigt håber vi på at resten også vil gå hurtigere. Det tyder på at LHC er velforstået allerede og at man ved, hvordan den skal korrigeres. Nu håber vi på kollisioner allerede om en uge. Energien bliver den energi, som partiklerne har, når de bliver skudt ind i LHC dvs. omkring 900 GeV eller halvt så meget som ved Tevatronen. Vi afsluttede dagen med champagne foran CERN's restaurant.”

I dette temanummer om partikelfysik ved LHC fortæller forskere fra Niels Bohr Institutet og CERN om forskellige aspekter af forskningen ved den nye accelerator.



LHCs projektleder Lyn Evans og CERNs generaldirektør Robert Aymar



Det store CERN-kontrolrum var fyldt til bristepunktet med fysikere og journalister



De danske fysikere fra ATLAS- og ALICE-eksperimenterne og et par journalister fra DR fejrer begivenheden. Foto: Lis Hansen.



Jubel i ATLAS-kontrolrummet

Billedkredit: CERN.

LHC-acceleratoren

Af Mogens Dam, Gruppen for eksperimentel højenergifysik, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Efter en 15 år lang design- og konstruktionsperiode står LHC-acceleratoren dette efterår endelig over for sin "jomfrurejse". I artiklen gennemgås argumenterne, der ledte frem til LHC, og acceleratorens vigtigste egenskaber.

Historisk perspektiv

De første tanker omkring en *Large Hadron Collider* (LHC) ved CERN – det europæiske forskningslaboratorium for partikelfysik ved Geneve – daterer helt tilbage til slutningen af 1970'erne. På det tidspunkt leverede CERN's SPS-accelerator protoner med energier på op til 300 GeV. I begyndelsen af 1980'erne udvidede man SPS'en, så man i samme strålerør kunne accelerere protoner og anti-protoner i modsat omløbsretning. Ved at bringe protoner og anti-protoner til kollision opnåede man en langt højere effektiv kollisionsenergi, hvilket i 1983 ledte til den eksperimentelle eftervisning af vektorbosonerne, Z^0 og $W^\pm$. Fra dens formulering i slutningen af 1960'erne havde teorien, som siden blev kendt under betegnelsen *Standardmodellen*, vundet større og større anerkendelse. Eftervisningen af $W^\pm$ - og Z^0 -bosonerne var en stor succes for Standardmodellen, som ikke alene havde forudsagt deres eksistens, men også havde givet korrekte forudsigelser om deres masser.

Hovedformålet med CERN's næste store acceleratorprojekt, *Large Electron Positron collider* (LEP), var en præcis udmåling af egenskaberne af Z^0 og $W^\pm$. I modsætning til SPS, kolliderede LEP ikke protoner mod anti-protoner, men derimod elektroner mod positroner. Dette har den fordel, at idet elektroner og positroner er elementære partikler, vil disse ved kollision annihilere totalt, hvorved den fulde kollisionsenergi står til rådighed til produktion af nye partikler. En stråleenergi på 46 GeV var derfor tilstrækkelig for produktion af Z^0 (hvileenergi 91 GeV), mens W -bosoner (hvileenergi 80 GeV), som må skabes parvist, produceredes for stråleenergier over 80 GeV.

Det vel nok vigtigste resultat fra LEP (1989–2000) er, at de stofflige elementarpartikler optræder i Naturen i præcis tre *generationer*. Derudover har LEP bidraget til meget præcise test af Standardmodellen. Standardmodellen har forholdsvis få frie parametre og forudsiger præcise relationer mellem forskellige målbare størrelser. Ingen signifikante afvigelser fra modellens forudsigelser blev observeret ved LEP, og også senere målinger har bekræftet modellens indre konsistens. Centralt i Standardmodellen står *Higgs-mekanismen*, som forklarer, hvordan elementarpartikler får masse. Uden Higgs-mekanismen er kun masseløse partikler tilladte. Udover at generere masser forudsiger Higgs-mekanismen eksistensen af en ny partikel, den såkaldte *Higgs-boson*. I sig selv giver Standardmodellen ingen forudsigelse for Higgs-bosonens masse,

men LEP var i stand til at sætte en nedre grænse på 114,1 GeV/ c^2 ved at kigge efter direkte tegn efter Higgs-bosonen. Derudover kan man med udgangspunkt i de præcise LEP-data benytte Standardmodellen til at give en indirekte forudsigelse af Higgs-massen. Man får herved en øvre grænse på knap 200 GeV/ c^2 .

Et vigtigt mål for LHC-programmet er eftervisningen af Higgs-bosonens eksistens. Hvis det virkelig skulle lykkes at finde en Higgs-boson med en masse i overensstemmelse med LEP-grænsen, ville det være en umådelig succes for Standardmodellen. Imidlertid lader Standardmodellen mange grundlæggende spørgsmål åbne, og der er god grund til at søge videre efter en underliggende mekanisme, der kan give dybere indsigt. Ét af disse grundlæggende spørgsmål er, *hvorfor* naturen har valgt det således, at de stofflige elementarpartikler optræder i præcis tre generationer. For et muligt svar må man kigge hinsides Standardmodellen efter såkaldt *ny fysik*.

LHC-projektet

LHC-projektet blev officielt godkendt i 1994 som CERN's næste skridt i udforskningen af naturens mindste bestanddele. Med projektet ønskede man at tage et skridt på omkring en størrelsesorden op ad energiskalaen. Acceleratoren, som skulle kolliderer protoner mod protoner, skulle konstrueres i LEP-tunnellen, og dermed have en omkreds på 27 km. Stråleenergien skulle være 7000 GeV.

Med LHC vender CERN tilbage fra at kolliderer elektroner og positroner til at kolliderer protoner. Grænsen for hvor højt man kunne nå i energi med en cirkulær elektron-accelerator var simplethen nået med LEP. For at holde en partikel-stråle i en cirkulær bane må strålen afbøjes ved hjælp af et magnetfelt. Herved udsendes såkaldt *synkrotronstråling*. Energita-bet herved er proportional med $(E/m)^4/\rho^2$, hvor E og m er partiklens energi og masse, og ρ er banens krumningsradius. I LEP's sidste fase ved en stråleenergi på 100 GeV betød dette et energitab på 2,8% per omgang (96 mikrosekunder) – et energitab, der måtte kompenseres ved fortsat acceleration af strålerne. Ved at gå over til protoner forøges m med en faktor 1836, hvorved synkrotronstrålingen i praksis elimineres.

Ved skiftet til protoner opstår der imidlertid et andet problem. En proton er ikke en elementarpartikel, men et sammensat system bestående af *kvarker* og *gluoner*. Energien, der er til rådighed til produktion af nye partikler, er dermed ikke givet ved de to kolliderende

protoners fulde energi, men kun ved den brøkdel, der bæres af de to bestanddele, som faktisk kolliderer. Og hvor meget energi bærer så hver af protonens elementære bestanddele? Det kan man ikke svare præcist på, idet der løbende sker en udveksling af energi mellem bestanddelene. Yderligere er antallet af bestanddele ifølge kvantemekanikken ikke veldefineret. Bestanddelenes energi er dermed givet ved en sandsynlighedsfordeling. Hvis vi som en tommelfingerregel går ud fra, at hver af bestanddelene bærer omtrent en tiendedel af protonenergien, ser vi, at vi med en stråleenergi på 7000 GeV får dækket området op til omkring 1000 GeV i eftersøgningen efter ny fysik.

Luminositet

En af de største eksperimentelle udfordringer ved at kolliderer protoner ved høj energi er det meget ufordelagtige forhold mellem sandsynligheden for at producere en interessant begivenhed (indeholdende fx. en $W^\pm$, en Z^0 , eller måske endda en Higgs-boson!) og den totale sandsynlighed for at de to protoner vekselvirker med hinanden. Ved LHC ligger dette forhold på mellem 10^{-7} (for $W^\pm$) og 10^{-11} (for Higgs). Hvis det overhovedet skal give mening at kigge efter Higgs-partiklen, må vi kræve, at der produceres noget i retning af én i timen. Man ser da hurtigt, at acceleratoren må kunne levere omtrent 10^9 proton-proton-vekselvirkninger per sekund. Raten af begivenheder udregnes som produktet af et *tværsnit*, som er en egenskab knyttet til den betragtede proces, og intensiteten, hvormed de to stråler rammer hinanden—den såkaldte *luminositet*. Totaltværsnittet for proton-proton-vekselvirkninger ved LHC er knap 100 mb, hvor 1 mb er 10^{-27} cm^2 . Der kræves dermed en luminositet på $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, som da også er designværdien for LHC.

Netop hensynet til den høje luminositet var afgørende for, at man valgte at kolliderer protoner mod protoner frem for protoner mod anti-protoner. Anti-protoner kunne simplethen ikke produceres i tilstrækkelig høj rate. Strålerne i en partikelaccelerator er ikke kontinuerte strømme af partikler. Derimod er partiklerne samlet i diskrete bundter af nogle få centimeters længde. For at maksimere luminositeten har man tre parametre at spille på:

- forøgelse af antallet af partikelbundter,
- forøgelse af antallet af partikler per bundt, og
- formindskelse af strålernes tværsnitareal i kollisionspunktet.

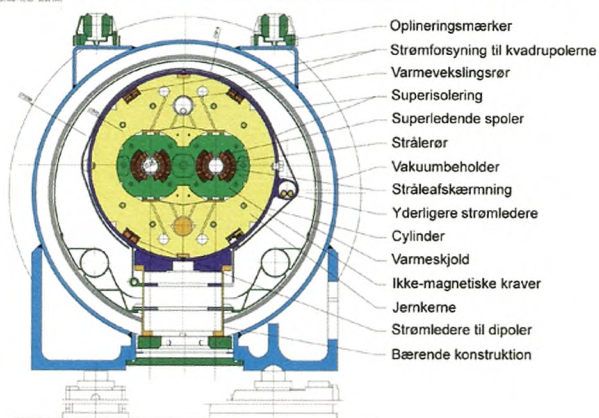
For LHC vil der være godt 10^{11} protoner i hver af de 2808 bundter, der roterer i hver retning. Bundterne er adskilt fra hinanden med kun 25 ns, hvilket stiller ekstreme krav til de eksperimentelle opstillinger. Strålerne er 16 mikrometer i diameter ved kollisionspunkterne.

Magnetsystem og køling

I LHC accelereres partikler med samme elektriske ladning i modsat omløbsretning. For at holde strålerne i deres baner, har man da, i modsætning til SPS og LEP, brug for to dipol-systemer med omvendt polaritet.

Et tværsnit af en dipol-magnet er vist i figur 1. I én kompakt struktur huses to strålerør med tilhørende elektriske vindinger til at danne det magnetiske felt. Kun ved de fire eksperimentelle områder føres de to strålerør sammen, så strålerne kan kolliderere.

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



Figur 1. Tværsnit af en dipolmagnet.

Stråleenergien på 7000 GeV begrænses af, hvor kraftigt et magnetfelt man kan opretholde i dipol-magneterne. Det kraftige felt på 8,3 Tesla leveres af ialt 1232 *superledende* dipol-magneter. Yderligere 392 kvadrupol-magneter sørger for fokusering af strålerne. Alle magneter er dobbeltløbende.



Figur 2. En 15 m lang, 27 tons tung dipol-magnet sænkes ned gennem en af adgangsskakterne til LHC-tunnelen 100 m nede.



Figur 3. Dipol-magneter på plads i tunnelen.

Hjertet i de superledende magneter er 6 mikrometer tynde tråde af en niobium-titanium-legering, som er superledende ved temperaturer under 10 K. Ved sådanne lave temperaturer vil altså en elektrisk strøm kunne løbe i trådene uden modstand. Sammen med kobber er 6000 sådanne tråde samlet til 1 mm tykke ledere, hvoraf der er anvendt ialt over 250.000 km til fremstillingen af LHC-magneterne. Den typiske strømstyrke i hver af de 1 mm tykke ledere er 800 A.

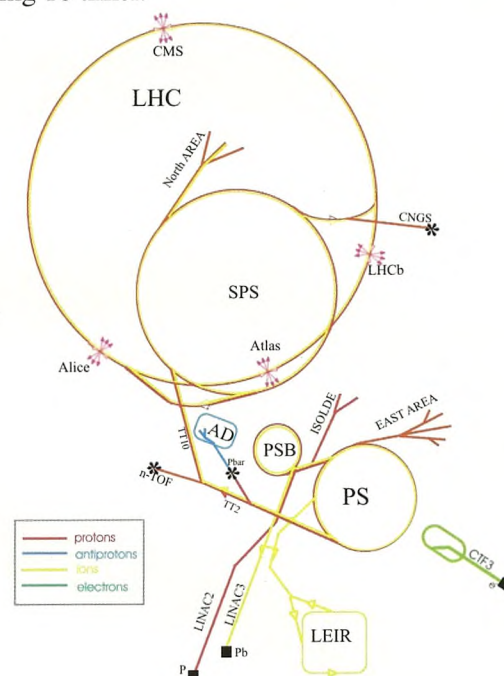
For at køre LHC er det nødvendigt at køle magneterne ned til under den kritiske temperatur, hvor de bliver superledende. Nedkølingen foregår ved hjælp af flydende helium. I princippet havde det været tilstrækkeligt at køle ned til 4,5 K, hvor helium bliver flydende, men i praksis har man valgt at køle helt ned til 1,8 K, som ligger under temperaturen, hvor helium bliver *superflydende*. Udover at have en forsvindende viskositet, har superflydende helium den egenskab, at den har en uendelig stor varmeledningsevne. Den er dermed den perfekte væske i LHC's gigantiske køleanlæg. Ialt holdes 40.000 tons materiale nedkølet til 1,8 K ved anvendelse af 96 tons helium.

Acceleratorkomplekset

Inden protonerne bringes til kollision i LHC har de allerede en lang rejse bag sig i CERN's acceleratorkompleks (figur 4).

Først skabes de nøgne protoner ved at skrabe elektronerne af en brintgas i en såkaldt *duoplasmatron*. Via en lineær accelerator (Linac 2) accelereres protonerne op til 0,05 GeV, før de føres til PSB, hvor de accelereres

op til 1,4 GeV. Derefter går turen via CERN's 40 år gamle PS, hvor de accelereres op til 28 GeV, til SPS, hvor de accelereres op til 450 GeV. Ved at vælge én af to ekstraktionslinjer fra SPS ledes protonerne enten i positiv eller negativ omløbsretning i LHC, hvor de endeligt accelereres op til kollisionsenergien på 7000 GeV. Accelerationssekvensen tager omkring 20 min, og når strålerne er på plads, forventes deres levetid at være omkring 10 timer.



Figur 4. CERN's acceleratorkompleks.



Figur 5. Luftfoto af CERN-området med LHC- og SPS-acceleratorerne indtegnet. Bemærk lufthavnen i højre side af billedet. Det primære CERN-område er det trekantede, tæt bebyggede område lige neden for SPS-ringen.

Eksperimenter

LHC er udstyret med fire eksperimentelle områder, hvor strålerne bringes til kollision. Ved hvert område er der konstrueret store eksperimentelle opstillinger i et samarbejde mellem hundredevis af fysikere fra både europæiske og oversøiske universiteter.

To af eksperimenterne, ATLAS og CMS, er såkaldte *general purpose experiments*, som har til opgave at kigge bredt efter alle typer af kendt såvel som ukendt fysik. En del af Standardmodellens parametre vil kunne bestemmes med forøget præcision, men måske mest spændende er eftersøgningen efter ny fysik.

Det tredje eksperiment, LHCb, er specialiseret til at studere fysikken af en af de tunge kvarker, *beauty-kvarken*. Herved søger man specielt at forøge vores viden om en lille asymmetri mellem stof og anti-stof, der er observeret i naturen. Denne asymmetri kan have været aktiv i Universets tidligste fase og være bestemmende for, at der i Universet næsten udelukkende findes stof og næsten intet anti-stof.

Det fjerde eksperiment, ALICE, udnytter at LHC udover proton-proton-sammenstød, også kan producere sammenstød mellem to bly-ioner. Ved sådanne sammenstød skabes ekstremt høje energitætheder, hvorved man vil være i stand til at studere stof under forhold, der ligner dem, der var rådende kort efter Big Bang.

To forskningsgrupper ved Niels Bohr Institutet deltager i henholdsvis ALICE- og ATLAS-eksperimenterne.

LHC-programmet

I LHC-programmet skelner man mellem to driftsperioder, som hver strækker sig over en periode på tre år. I første periode planlægges det at køre LHC med en luminositet på omkring en tiendedel af designværdien. Der produceres herved 10^8 proton-proton-vekselvirkninger per sekund, tilsvarende godt to vekselvirkninger for hver gang to partikelbundter mødes (hver 25 ns). I anden periode vil man gå over til at køre acceleratoren ved så høj en luminositet som overhovedet muligt. Der er to årsager til dette todelte program. For det første er LHC et meget kompliceret apparat, som det vil tage tid at lære at kende og drive optimalt. Men mindst lige så vigtigt er hensynet til eksperimenterne. Ved høj luminositet med omkring 25 vekselvirkninger per 25 ns, vil det eksperimentelle apparatur til en vis grad gå i mætning, hvorfor den eksperimentelle opløsning forventes at være dårligere. Programmet kan sammenfattes således, at man i første periode ønsker at køre eksperimenterne med optimal følsomhed, hvorved man kan foretage målinger med højeste præcision. Dernæst skrues man fuldt op for luminositeten for at udnytte LHC's potential fuldstændigt i eftersøgningen af ny fysik.

LHC står over for at starte op dette efterår. Skønt alle dipol-magneter før installeringen var testet til 8,3 T, har det vist sig, at nogle få har brug for en ekstra såkaldt "training cycle" for igen at kunne klare den

høje strømstyrke, uden at de superledende egenskaber bryder ned. Man har valgt at udsætte denne træning til vinterperioden, hvor LHC alligevel vil være lukket ned, og kører derfor i år med en lidt reduceret feltstyrke og en tilsvarende reduceret stråleenergi på 5000 GeV. Det er endnu uvist, hvor meget luminositet LHC vil levere dette efterår, men eksperimenterne håber på i det mindste, at få nok data til at kunne studere detektorernes opførsel under realistiske betingelser. Fra foråret 2009 regner man med at starte op ved design-energien på 7000 GeV og i løbet af året at nå op på den planlagte luminositet tilsvarende den første treårsperiode.

Efter 15 års forberedelse er fysikresultater fra LHC endelig inden for rækkevidde. Hvis naturen viser sig fra sin venlige side, vil vi måske allerede inden for det kommende år se de første tegn på ny fysik fra LHC.



Mogens Dam arbejdede indtil sidste år med det danske bidrag til ATLAS' spordetektor, TRT. Har det seneste år arbejdet på udvikling af algoritmer til den såkaldte triggerering, altså online udvælgelse af interessante begivenheder.

PFEIFFER  **VACUUM**

**NY Turbopumpe
HiPace™**



Ring for yderligere information

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk

ATLAS-detektoren ved LHC

Af Esben Bryndt Klinkby, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

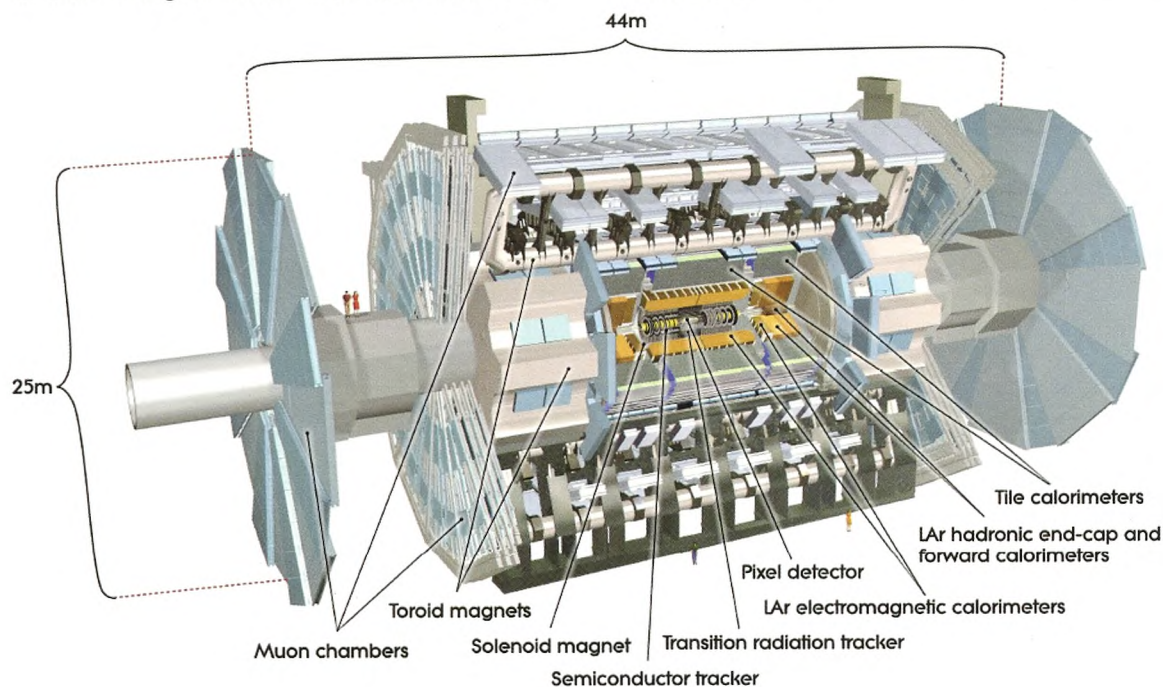
I disse dage accelereres de første protoner i Large Hadron Collider (LHC) ved det europæiske forskningscenter CERN ved Geneve. Som beskrevet i den første artikel i dette blad er LHC en cirkulær accelerator med en omkreds på 27 km placeret i en tunnel 100 m under Jordens overflade. Acceleratoren er i stand til at forsyne protoner med en rekordhøj energi på 7 TeV (teraelektronvolt = 10^{12} eV) inden de to modsat rettede stråler bringes til kollision på udvalgte positioner langs ringen. Omkring disse punkter er der bygget detektorer, hvis formål er at måle hvad der skete under kollisionen – denne artikel handler om ét af disse eksperimenter: ATLAS eksperimentet [1].

ATLAS detektoren

LHC-acceleratoren indeholder to strålerør hvori protoner accelereres og fastholdes i kredsløb ved hjælp et kraftigt magnetfelt på cirka 8 T. Ved kollisionspunkterne bringes protonerne så tæt på hinanden at de kan vekselvirke via den stærke kernekraft hvorved dele af protonernes kinetiske energi omdannes og skaber nye partikler via Einsteins berømte formel: $E = mc^2$. Grunden til at ikke al energien ($7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$) er til rådighed til at danne nye partikler er, at vekselvirkningen kun involverer to kvarker - de resterende fortsætter langs stråleretningen. En uheldig følge heraf er, at den totale energi (og dermed impuls) i kollisionen ikke er kendt. I det transversale plan, kan impulsbevarelsen imidlertid udnyttes idet de indkomne protoner vides at bevæge sig udelukkende i den longitudinale retning, dvs impuls i den transversale retning før kollisionen er forsvindende. Ved ydermere at sørge for at detektoren indeslutter kollisionspunktet på nær strålerøret således at alle de skabte partiklers impuls/energi måles, kan impulsbevarelsen benyttes i den transversale plan. Det betyder at selv i begivenheder hvor der dannes en

svagtvekselvirkende neutrino eller en anden *usynlig* partikel, kan impulsen af denne beregnes som den *manglende impuls* ved at udnytte impulsbevarelse, samt det faktum at alle andre partiklers impuls bestemmes via eksplicitte målinger af de spor som partikler afsætter i ATLAS detektoren.

ATLAS-detektoren er designet til at have bredest mulige anvendelsesmuligheder, dvs. at man ved ATLAS både forventer at have et godt redskab til at lede efter *ny fysik* – såsom Higgs og supersymmetri, der er beskrevet i andre artikler i dette blad – samt endvidere at være i stand til at måle kendte partikelegenskaber med større nøjagtighed. Det sidste er vigtigt idet vores nuværende forståelse af de fundamentale partikler og deres vekselvirkninger foreskriver at hvis vi kan måle visse parametre meget præcist, så kan vi udnytte dette til at forudsige størrelsen af andre parametre – for eksempel parametre der kendetegner ny fysik. Ved altså at foretage præcisionsmålinger af kendte partikelegenskaber kan vi dels lave et konsistentstjek af vores model og dels forudsige hvorledes ny fysik kunne se ud i detektoren.

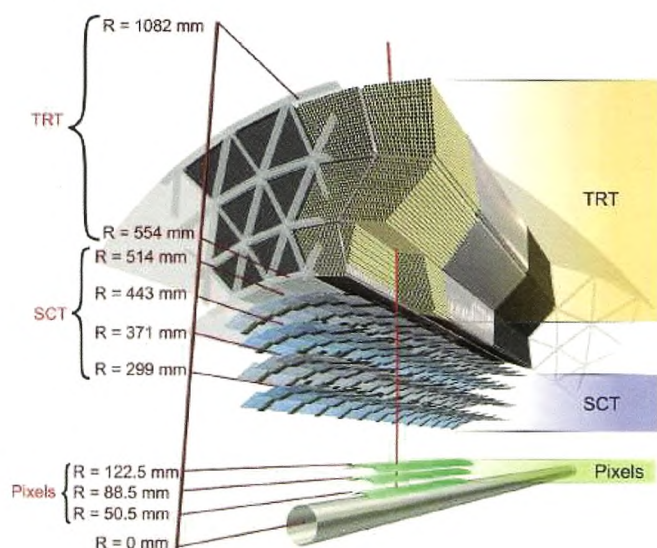


Figur 1. ATLAS-detektoren. Bemærk de enorme dimensioner illustreret ved menneskene på tegningen.

For bedst muligt at opfylde disse ambitioner er det nødvendigt at være i stand til at foretage præcisionsmålinger af:

- Elektroner og myoner.
- Fotoner (lys kvantum).
- Ikke vekselvirkende partikler som neutrinoer måles ud fra manglende impuls.
- Jets af partikler.

Det er nødvendigt at måle de mange forskellige størrelser i et miljø med 20 overlappende begivenheder, der i alt resulterer i ca. 2000 partikler skabt for hvert



Figur 2. Til venstre ses den centrale del af sporfindingsdetektoren, med de tre subdetektorer beskrevet i teksten. Til højre er illustreret hvorledes de forskellige partikler der kan dannes ved en kollision vekselvirker med ATLAS-detektoren.

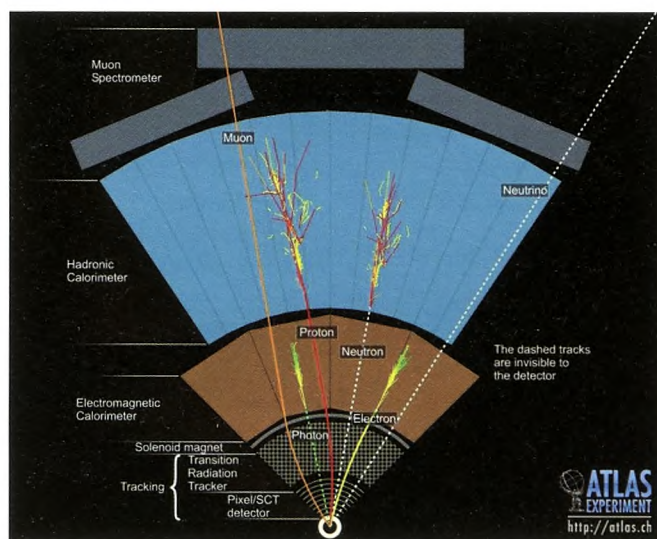
Nærmest kollisionspunktet er "Pixel-detektoren", der med sine 80 millioner målekanaler giver 3 målinger per spor hver med en præcision på 10 mikrometer $\times$ 115 mikrometer i henholdsvis den transversale og longitudinale retning. Detektoren er placeret blot få centimeter fra kollisionspunktet og er bygget af silicium der er i stand til fungere selv under de enorme strålingsrater den bliver udsat for.

Den næste subdetektor en partikel møder er Semi-Conductor Tracker (SCT). Denne detektor er ligeledes baseret på silicium og med sine 6 millioner udlæsningsstriber er den i stand til at bestemme to punkter pr spor med en opløsning på 17 mikrometer (580 mikrometer) i den transversale (longitudinale) retning. Grundet dels økonomi og dels hensynet til at bestemme partikeltypen er den sidste og største sporfindingsdetektor baseret på gas. Transition Radiation Tracker (TRT) består af cirka 400.000 stråfyldt med xenon og adskilt af radiatorer. Når ultrarelativistiske partikler passerer en radiator dannes *transition radiation* som følge af ændringer i det lokale dielektrikum. Denne stråling absorberes senere i xenonet hvor det giver anledning

25 ns. Den høje begivenhedsrate og partikeldensitet stiller høje krav til blandt andet elektronikkens hurtighed, robusthed samt sporfindingspræcisionen og har ført til designet af ATLAS-detektoren som er beskrevet nedenfor.

Sporfindingsdetektoren

For at kunne rekonstruere hvad der skete under en kollision er det blandt andet nødvendigt at måle sporene af de forskellige partikler i detektoren. Helt fundamentalt gøres dette ved at måle små energiafsætninger og sammensætte disse til spor. I ATLAS-detektoren (se figur 1) løses denne opgave af sporfindingsdetektoren, som i sig selv består af tre subdetektorer, arrangeret i en løgstruktur som illustreret i figur 2.



til kraftig ionisation der opsamles på en anode og derved giver et punkt på sporet. Siden produktionen af transition radiation afhænger af den indkomne partikels (Lorentz) gammafaktor ($\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$) kan målingerne bruges til at adskille de sjældne, men interessante elektroner fra den enorme baggrund af pioner siden deres masser og dermed typiske gammafaktorer er så forskellige. Selv pioner og andre tunge partikler som ikke, eller kun i ringe grad, giver anledning til transition radiation kan spores via TRT'en idet alle ladede partikler vil ionisere xenongassen i et vist omfang – blot ikke i nær samme grad som transition radiation fotoner.

Målingerne i de tre subdetektorer kombineres efterfølgende hvorved der dannes et spor. For at måle impulsen udnyttes det at hele sporfindingsdetektoren er indkapslet i en magnet, der har til hensigt at afbøje sporene hvorved deres impuls kan beregnes via afbøjningsradiussen. Fælles for de tre subdetektorer beskrevet her er, at partiklernes vekselvirkning med dem er baseret på elektromagnetismen. Dvs. at kun ladede partiklers spor kan måles.

Kalorimetre og myondetektor

Den næste detektor partiklerne møder på deres vej væk fra kollisionspunktet er det elektromagnetiske kalorimeter som har til formål at stoppe partikler og måle den totale afsatte energi. Herved måles energien ikke bare af de ladede partikler, men også neutrale partikler. I det elektromagnetiske kalorimeter bruges absorber plader af bly for at tvinge partiklerne til at vekselvirke. Herved dannes en byge af ladede sekundære partikler (se figur 2 t.h.) der efterfølgende ioniserer flydende argon og ionisationen driver, som følge af et kraftigt elektrisk felt, til en anode hvor et signal kan opsamles. Ved at bruge mange lag af skiftevis absorbere og detektorer kan partiklerne til sidst bremses helt og deres totale energi aflæses ud fra det totale signals størrelse.

Som navnet antyder er det elektromagnetiske kalorimeter især beregnet til energimålinger af partikler der virker via den elektromagnetiske vekselvirkning – dvs. leptoner, men også fotoner der via vekselvirkning med detektoren konverterer til elektroner. Man kan skelne en byge fra en elektron fra en fotonbyge idet sidstnævnte ikke har noget spor pegende imod sig. Hadroner, såsom protoner og neutroner lader sig kun i ringe omfang bremse og herved måle af det elektromagnetiske kalorimeter, og for at undgå at dele af bygen af sekundære partikler fortsætter bagud igennem detektoren hvorved energimålingen bliver upræcis, komplementeres det elektromagnetiske kalorimeter af et hadronisk kalorimeter. Princippet bag det hadroniske kalorimeter er den samme som for det elektromagnetiske: en sandwich af absorbere, her jern, og detektorelementer, her scintillatorer.

Idet partiklerne fra en kollision er meget energirige (ofte hundreder af GeV) er kalorimetrene nødt til at være meget dybe for at undgå at dele af bygen passerer helt igennem kalorimetrene. Dette er en af grundene til de enorme dimensioner af ATLAS-eksperimentet – se figur 1. De eneste partikler der ikke stoppes af kalorimetrene er myoner og så selvfølgelig neutrinoerne som slet ikke vekselvirker med detektoren. For at måle myonspor benyttes blandt andet TRT-lignende gasdetektorer, hvor det udnyttes at myoner er ladede og dermed ioniserende partikler. Siden myondetektorerne og dermed også resten af ATLAS-detektoren er indkapslet i en enorm magnet, kan myonernes impuls og dermed energi beregnes ud fra sporenes krumning i det kraftige magnetfelt (op til 4 T).

Databehandling

Andre artikler i dette blad beskriver forskellige interessante fysikscenarier som ATLAS-eksperimentet vil lede efter. Fælles for de mest interessante begivenheder hvor der f.eks. dannes en Higgs- eller en supersymmetrisk partikel er, at de teoretisk forudsiges at forekomme yderst sjældent, hvis de altså overhovedet forekommer. I typiske teoretiske modeller forudsiges at højst én begivenhed ud af en milliard indeholder ny fysik. Ydermere vil begivenheder som indeholder ny

fysik ligne begivenheder indeholdende velkendt fysik så meget, at det kun er muligt at skelne dem på et statistisk grundlag – altså hvor mange af en given type begivenheder forudsiger kendt fysik at vi skulle finde kontra hvor mange er rent faktisk observeret. For at kunne opdage ny fysik er det altså ikke blot nødvendigt at finde nålen i høstakken, men det er nødvendigt at gøre det mange gange. Af disse årsager er LHC designet til at lave hvad der svarer til en partikel-partikel kollision hvert nanosekund, og tilsvarende er ATLAS-detektoren designet til at kunne håndtere denne rate. Siden ATLAS-detektoren i alt har cirka 150 millioner måleenheder der læses ud ca. 40 millioner gange hvert sekund, 15 millioner sekunder hvert år, er det klart at selv med vore dages regnekraft og lagringsmedier er det ikke muligt at lagre eller behandle sådanne datasæt. For at afhjælpe dette problem benyttes en såkaldt *trigger* hvis formål er at frasortere uinteressante begivenheder allerede inden de lagres. Sorteringen er baseret på en række kriterier der groft sagt er et udtryk for hvorledes vi forestiller os at interessant fysik burde se ud i detektoren. Et eksempel kunne være hvis der er meget energi afsat i det elektromagnetiske kalorimeter hvilket kunne tyde på at en højenergetisk elektron eller foton er blevet skabt. En højenergetisk elektron kunne skyldes et henfald fra en supersymmetrisk partikel og tilsvarende kunne en højenergetisk foton stamme fra et henfald af en Higgs partikel. En sådan begivenhed er potentielt interessant og gemmes. Sorteringen forfines ved at inkludere målinger fra stadigt flere subdetektorer og til sidst er raten af interessante begivenheder reduceret til cirka 100Hz hvilket er tilstrækkelig lavt til at lagring og efterfølgende databehandling er mulig. Computerressourcerne der er nødvendige for at foretage lagring og databehandling, altså rekonstruktionen af spor osv baseret på de enkelte subdetektorers målinger, er dog stadig så omfattende, at man har måtte opgive at gøre det centralt på CERN. I stedet sendes dataene direkte fra detektoren til en række computercentre verden over, hvor databehandling og lagring finder sted. Efterfølgende kan fysikere over hele verden få adgang til data, lagret eksempelvis i København.

Forberedelser

Som det vel nok fremgår af afsnittene ovenfor er ATLAS-detektoren umådelig kompliceret og det er derfor af afgørende betydning at teste de forskellige detektordele, udlæsingen, databehandlingen osv. allerede inden LHC foretager de første kollisioner. Denne forberedelse har allerede foregået i flere år for eksempel ved at udsætte et udsnit af ATLAS detektoren for et såkaldt *testbeam*. Herved kan de enkelte detektordele testes under kontrollerede forhold, nemlig når de beskydes med kendte partikler med en kendt energi.

For også at teste den færdigbyggede detektor udnyttes det, at der selv i ATLAS-hulen mere end hundrede meter under jordens overflade findes kosmisk stråling – typisk myoner dannet i den øvre atmosfære. Ved at rekonstruere sporene fra sådanne myoner kan

man teste hvorvidt de forskellige detektordele er placeret korrekt i forhold til hinanden og om udlæsningen af de forskellige kanaler virker korrekt osv.

Både resultaterne fra testbeam i de enkelte detektordele, samt de kombinerede tests baseret på kosmisk stråling, har været yderst tilfredsstillende: ATLAS-detektoren ser ud til at fungere fuldt ud i overensstemmelse med specifikationerne. Til trods for års intense forberedelser er der dog ingen der med sikkerhed kan vide hvorledes detektoren kommer til at virke når den udsættes for de første proton-proton kollisioner. Inden vi finder ud af hvorvidt ATLAS-detektoren er i stand til at afvise naturen nogle af dens allerdybeste hemmeligheder, følger først nogle meget spændende måneder hvor partikelfysikere verden over arbejder på højtryk for at få detektoren til at virke optimalt – alt imens de holder vejret i spænding!

Litteratur

- [1] ATLAS: Detector and physics performance technical design report. Volume 1 CERN-LHCC-99-14
- [2] For mere information om partikelfysik på dansk: <http://www.nbi.dk/~klinkby/PartikelFysik.pdf>
- [3] Atlas hjemmeside: <http://atlas.ch/>



Esben Klinkby er ansat som forskningsassistent ved Niels Bohr Institutet og har netop forsvaret sin ph.d. som omhandler måling af W-bosonens masse samt simulering af TRT'en ved ATLAS-eksperimentet.

Standardmodellens partikler og kræfter

Af Esben Bryndt Klinkby, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Eksperimenter har vist at atomer i sig selv ikke er fundamentale, men består af elektroner, protoner og neutroner. Så vidt vides er elektronen fundamental, hvorimod protoner og neutroner er opbygget af kvarker. Udover de byggesten der er nødvendige for at opbygge atomer – og dermed alt stoffet omkring os – findes der også andre fundamentale partikler. Denne artikel opsummerer de fundamentale partikler vi kender til idag og kræfterne der virker imellem dem.

Byggestenene: Kvarker og leptoner

- **Kvarker:** kan kombineres til protoner, neutroner, pioner osv.
- **Leptoner:** er partikler såsom elektroner og neutrinoer. Leptoner indgår ikke i opbygningen af protoner og neutroner, og dermed ikke i opbygningen af kernestof.

Såvidt vides er både leptoner og kvarker fundamentale, hvilket vil sige at de ikke har nogen indre struktur.

Klassificering

Kvarker og leptoner klassificeres i tre familier ud fra deres ladning og masse:

Kvarker

Ladning/ e	1. familie	2. familie	3. familie
+2/3	Up (u) [1,5-3,0] MeV/c ²	Charm (c) [1,2-1,3] GeV/c ²	Top (t) [171-176] GeV/c ²
-1/3	Down (d) [3-7] MeV/c ²	Strange (s) [70-120] MeV/c ²	Bottom (b) [4,1-4,3] GeV/c ²

En elektronvolt, eV, er den energi en elektron opnår ved at gennemløbe et spændingsfald på 1V; 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Da masse ifølge Einstein kan skrives: $m = E/c^2$ bliver partikelfysikkens enhed for masse: eV/c². Bemærk de store forskelle i masserne: topkvarken er 100.000 gange tungere end up-kvarken.

Leptoner

Ladning/ e	1. familie	2. familie	3. familie
-1	Elektron (e) 0,51 MeV/c ²	Myon (μ) 106 MeV/c ²	Tau (τ) 1,8 GeV/c ²
0	Elektron-neutrino (ν _e) < 2 eV/c ²	Myon-neutrino (ν _μ) < 2 eV/c ²	Tau-neutrino (ν _τ) < 2 eV/c ²

Bemærk også her de store forskelle i masserne: En τ-partikel vejer 3500 gange mere end en elektron. 2. og 3. familie er kopier af den 1. familie og afviger primært fra denne ved deres højere masse. Grunden til at vi i naturen næsten udelukkende finder partikler fra første familie, skyldes et vigtigt begreb i partikelfysikken, nemlig stabilitet. For partikler fra 2. og 3. familie eller sammensætninger af sådanne, er det

energimæssigt fordelagtigt at henfalde til partikler fra 1. familie, hvilket kan indses ud fra Einsteins masse-energi relation: $E = mc^2$. Tunge partikler er energirige, og kan derfor henfalde til lettere partikler, hvorimod det modsatte generelt ikke finder sted i naturen. Protoner, som med kvarknotation skrives (uud) og elektroner er simpelthen stabile fordi de er de letteste af deres slags, og de har altså ikke noget at henfalde til, fordi visse fysiske love forhindrer dem i at henfalde til ren energi. Derfor består verden omkring os af protoner, neutroner (der er stabile når de befinder sig i en atomkerne) og elektroner og ikke af deres tungere *fætre*.

Antipartikler

Alle partiklerne i ovenstående tabeller har en antipartikel med den samme masse, men modsat elektrisk ladning. For eksempel findes en anti-up-kvark ($\bar{u}$) med ladning $-2/3|e|$ og en anti-elektron (e^+ kaldet positron) med ladning $+1|e|$.

Naturens fundamentale kræfter

Hvis verden havde bestået af stofflige partikler og intet andet, ville det være et kedeligt sted: Ingen partikel ville kunne påvirke nogen anden partikel! Heldigvis er verden ikke sådan: partikler kan vekselvirke

med hinanden, og på fundamentalt niveau fortolkes vekselvirkninger i forstanden: Udveksling af andre partikler – de såkaldte kraftoverførere eller bosoner. At noget begrebsmæssigt så svært tilgængeligt som kræfter kan beskrives ved noget så håndgribeligt som partikler kræver nok lidt tilvænning. Det er ikke desto mindre en særdeles attraktiv egenskab ved partikelfysikkens verdensbillede. For at forstå hvordan noget, der virker over afstand, kan beskrives ved hjælp af overførsel af en partikel, kan man tænke på følgende eksempel fra vores makroskopiske verden:



Figur 1. Kraftbærende 'partikler'.

Ved at kaste bolden til hinanden skubbes bådene fra hinanden på samme måde som hvis der havde været fysisk kontakt imellem dem eller mellem personerne på bådene. At man således kan opnå en frastødende kraft ved at udveksle en partikel er derfor forståeligt, hvorimod analogien bliver lidt mere søgt for en tiltrækkende kraft (boomerang).

Vekselvirkning	Kraftoverførere	Masse [GeV/c ²]	Styrke (i forhold til den stærke kernekraft)	Rækkevidde [m]
Tyngdekraft	Graviton	0	10^{-39}	∞
Svag kernekraft	Z, W [±]	91/80	10^{-6}	10^{-18}
Elektromagnetisme	Foton (γ)	0	10^{-2}	∞
Stærk kernekraft	Gluon (g)	0	1	10^{-15}

De fire kræfter

Så vidt vides findes fire fundamentale kræfter i naturen: tyngdekraften, den svage kernekraft, elektromagnetismen og den stærke kernekraft. Alle disse beskrives i partikelfysikken ved hjælp af udveksling af en kraftoverførende partikel, som er specifik for den enkelte kraft (se tabellen ovenfor).

Bemærk at den elektromagnetiske kraft formidles ved hjælp af fotoner. Kraftoverførerne for den svage kernekraft er Z, W[±] bosonerne, hvorimod 8 forskellige gluoner bærer den stærke kernekraft. Tyngdekraftens bærer hedder gravitonen, men den er endnu ikke observeret eksperimentelt, så man ved strengt taget ikke om den findes.

Litteratur

- [1] For mere information om partikelfysik på dansk:
<http://www.nbi.dk/~klinkby/PartikelFysik.pdf>



Esben Klinkby er ansat som forskningsassistent ved Niels Bohr Institutet og har netop forsvaret sin ph.d. som omhandler måling af W-bosonens masse samt simulering af TRT'en ved ATLAS-eksperimentet.

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.

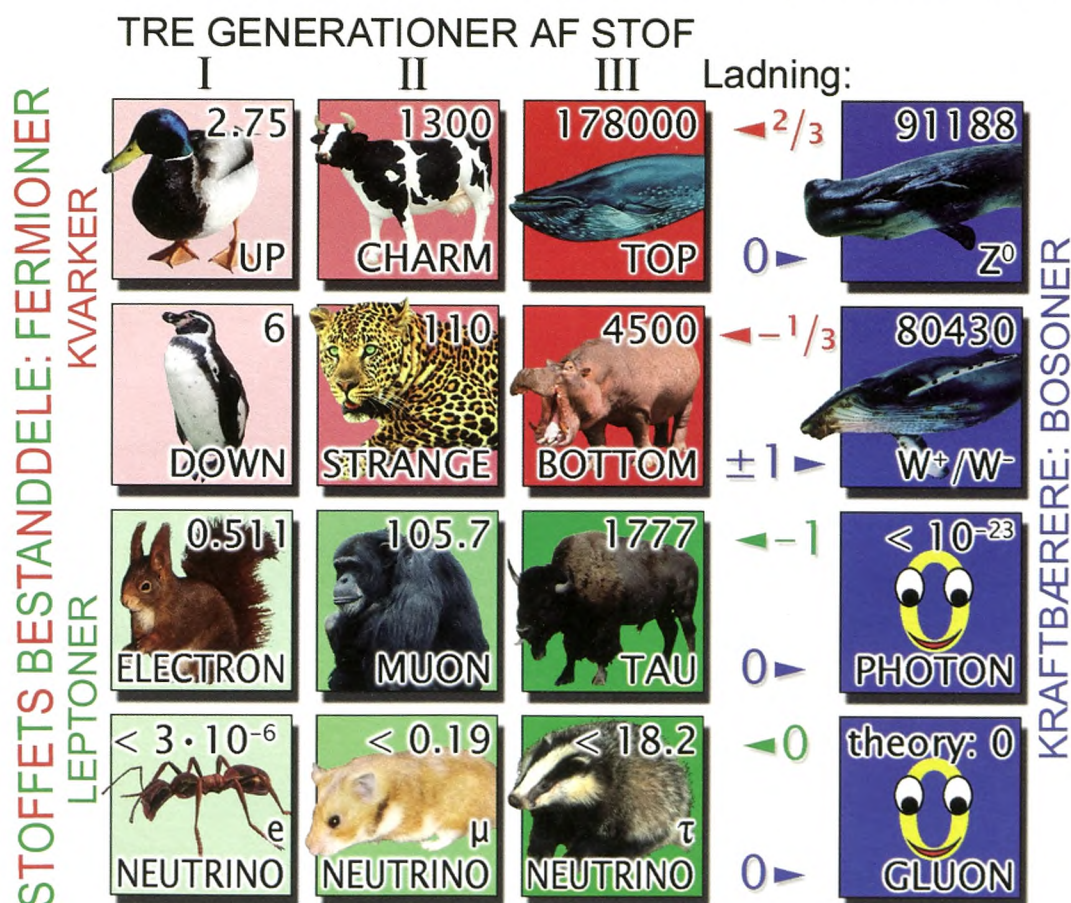
Den manglende brik i teorien

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 stofflige 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 elektroner 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

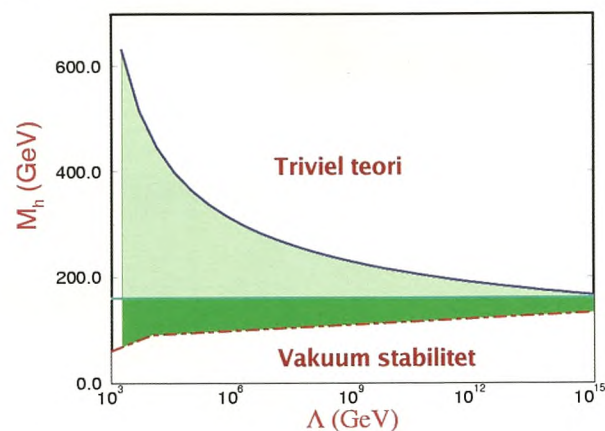
om den der sker når vand, der ved høje temperaturer er en gas, bliver til is ved nedkøling. I den nye vakuumtilstand var Higgs-feltets forventningsværdi ikke nul mere, og partiklerne fik de masser som vi kender i dag via vekselvirkninger med dette baggrundsfelt.

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).

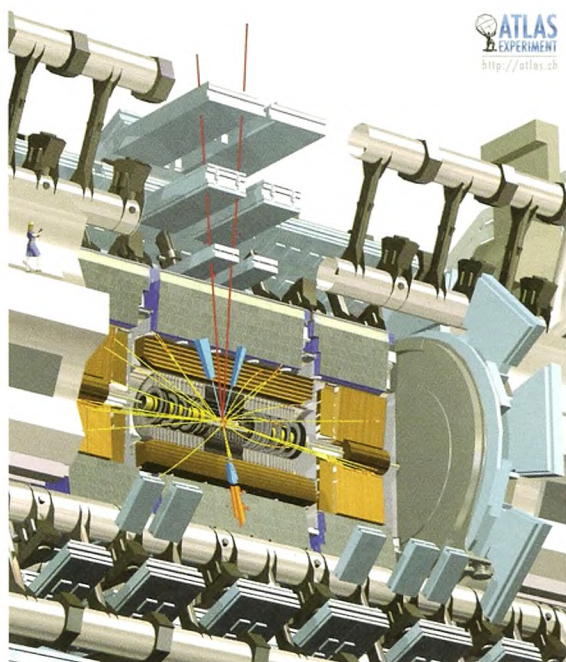


Figur 2. Teoretiske og eksperimentelle grænser for Higgs-partiklens masse M_h , som funktion af Λ , der er den øvre energi-grænse for Standardmodellens gyldighed. Den blå linie er en øvre teoretisk grænse for M_h , da en Higgs-masse over dette vil medføre en såkaldt *triviel* teori. Den røde stiplede 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.



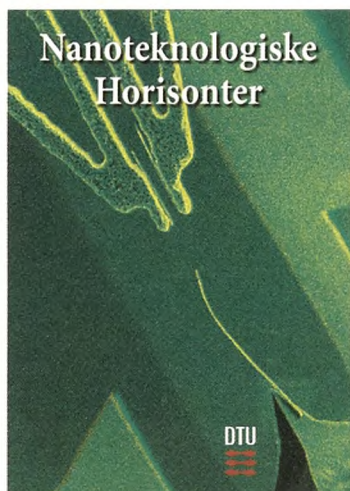
Katrine Facius er ph.d.-studerende i gruppen for eksperimentel partikelfysik ved Niels Bohr Institutet, hvor hun er involveret i forberedelsen af det hidtil største jordske acceleratoreksperiment LHC ved CERN ved Geneve.

Aktuelle bøger

Af Thomas R. N. Jansson, Sven Munk og Michael Cramer Andersen.

Nanoteknologi til gymnasiet

Redigeret af: Anne Hansen, Carsten Broder Hansen og Lone Djernis Olsen. Danmarks Tekniske Universitet 2008. "Nanoteknologiske Horisonter", 226 sider. Kan bestilles gratis, så længe lager haves, mod betaling af forsendelse. <http://www.nano.dtu.dk/Laerebog.aspx>.



"Nanoteknologiske Horisonter" henvender sig til elever og lærere ved gymnasieuddannelserne og alle andre, der er interesserede i at vide mere om nanoteknologi.

NanoDTUs egne forskere har skrevet bogen i samarbejde med videnskabsjournalister og med råd og vejledning fra gymnasielærere og fagkonsulenter fra Undervisningsministeriet. Bogen indeholder 13 kapitler, der beskriver et bredt udsnit af nanoteknologisk forskning og anvendelser. Blandt emnerne kan nævnes: Nanoskopi, Katalyse, Energiceller, Nanomekanik, Nanoelektronik og Nanofotonik. Kapitlerne kan læses uafhængigt af hinanden og udvælges enkeltvis i forbindelse med pensum eller valgfrit stof på A- og B-niveau i de naturvidenskabelige fag.

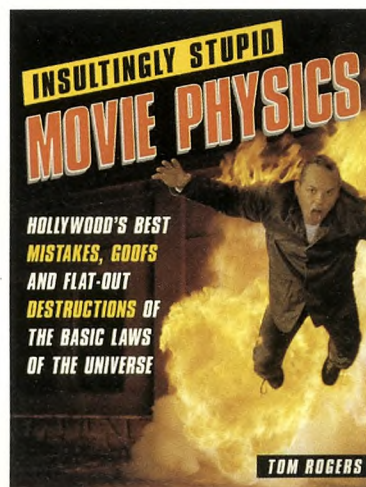
Gode informative billeder og klar tekst gør sit til, at man som læser føler sig oplyst om nogle nanoteknologiens mange muligheder. Der er kommet meget med i bogen, og nogle steder har man måske presset lidt for meget ned på de godt 200 sider, så figurene er blevet meget små. Selv om niveauet måske også rammer lidt for højt, skal bogen hilses velkommen. Der kan sagtens vælges dele fra bogen til interessante undervisningsforløb.

Bogen kan bestilles gratis så længe lager haves eller hentes elektronisk på NanoDTUs hjemmeside, hvor der også findes supplerende undervisningsmateriale.

Michael Cramer Andersen og Sven Munk

Insultingly stupid movie physics

Af: Tom Rogers. Sourcebooks Hysteria, 2007, 336 sider. \$15 på www.amazon.com eksklusiv fragt.



Som det allerede er kort beskrevet i Kvant nr. 1, 2007 har Tom Rogers m.fl. drevet en hjemmeside på nettet under titlen "Insultingly Stupid Movie Physics" (ISMP), hvor film blive anmeldt alt efter, hvor korrekt de portrætterer fysiske fænomener. Jeg har været en stor fan af siden i lang tid og har glædet mig til at læse den nyligt udkomne bog, der er kulminationen på 7 års anmeldelser. www.intuitor.com/moviephysics/

Bogen er inddelt i 19 kapitler, hver dedikeret til typiske fysiske problemer, som f.eks. 'Newtons første lov', 'bevarelse af masse og energi' og 'skaleringsproblemer'. I hvert kapitel gennemgår Rogers typiske fejl og mangler i filmenes forståelse af fysikken. Det er ofte ret underholdende at læse bogens back-of-the-envelope gennemgang af populære film. F.eks. bliver filmen "Skat, børnene er skrumpet" taget under kærlig behandling: Hvordan kan børnene skrumpes 100 gange, uden af det får voldsomme konsekvenser. Hvis massen af børnene er bevaret stiger densiteten med en faktor 1.000.000, hvilket blandt andet ville give problemer med trykket af deres nu meget små fødder – de ville synke direkte ned i Jorden. Hvis børnenes densitet derimod blev bevaret, skulle formindskelsesmaskinen fjerne 99.9999% af børnenes masse, hvilket man kun kan håbe på ikke går ud over deres intellekt eller andre kropsfunktioner.

I den første del af bogen kommer Tom Rogers ind på problemet, at selv om instruktører ofte gerne vil vise korrekt fysik, så er Hollywood meget konservativ, og hvis først en film har brugt effekter med fysik, der tydeligvis er fra en anden verden, så sker det ofte i efterfølgende film, at samme fejltagelser bliver gentaget, da såvel filmmagerne som publikum forventer

dette. På den måde er det nu blevet accepteret, at rumskibe larmer i vakuum, og at impulsen af en pistolkugle er nok til at sende en voksen mand flyvende gennem luften. Overraskelsen var derfor stor, da jeg kunne læse at filmen "The Core", som ISMP anmeldte som verdens fysisk set dårligste film, havde haft to ph.d.'er i planetfysik ansat som konsulenter. Dette viser, at instruktøren tydeligvis har haft interesse i korrekt fysik, men åbenlyst ikke brugte denne viden i filmen. Man kan godt argumentere for at instruktører ikke behøver at være interesseret i fysiske principper, men kan nøjes med at fokusere på den gode historie. Bogen anmelder derfor heller ikke film, hvor det bærende element er at fysikkens love brydes, som f.eks. "Spiderman" eller "Tilbage til fremtiden". Problemet er derfor ikke i film der afbilder en magisk virkelighed, men derimod i den konsensus der er kommet i filmindustrien om en alternativ fysik med pistolkugler med ufysiske impulser m.m. Hvis en film om fodbold afbildede fodboldbanen som trekantet med 30 cm høje mål i hvert hjørne ville ingen filmgængere tage den seriøst, men hvis angrebsfly som dem i "Pearl Harbor" kaster bomber lodret ned på trods af, at de bevæger sig vandret med 350 km/t, er der sjældent andre end fysikere, der ryster på hovedet.

Bogen er bedst netop når forfatteren gennemgår eksempler på dårlig fysik fra film på samme måde som den oprindelige hjemmeside. Det er også vellykket, når forfatteren samler materialet fra hjemmesiden og deler anmeldelserne af film op i emner, hvilket gør bogen god til undervisningsbrug, men samtidig gør dette fra tid til anden bogen knap så fængende, da hver film er spredt over mange kapitler. Hvert kapitel slutter af med en oversigtsboks som skal understrege de netop gennemgåede hovedpointer, men det virker, som om lige præcis disse oversigtsbokse er lavet med venstre hånd, da en del af dem er ret intetsigende. Som et eksempel deklarerer en oversigtsboks, at følgende skal undgås i film: "Using an obvious stupid movie physics cliché", hvilket virker ret indlysende. På trods af, at bogen på den måde af og til bærer præg af at være en hjemmeside, der er blevet presset ned i bogform, er den alt i alt underholdende og anbefalelsesværdig, især hvis man ikke tidligere har læst anmeldelserne på hjemmesiden.

Thomas R. N. Jansson

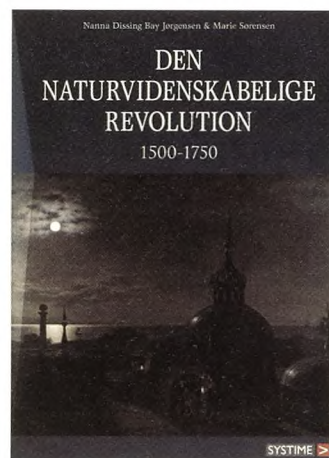
Den naturvidenskabelige revolution

Forfattere: Marie Sørensen og Nanna Dissing Bay Jørgensen. Systime 2008. "Den naturvidenskabelige revolution 1500-1750", 150 sider, 140 kr. excl. moms. <http://www.systime.dk>.

Denne bog behandler i fem kapitler de vigtigste personer i "Den naturvidenskabelige revolution", der foregik i Europa i 1500-1750. Personerne er velkendte – Kopernikus, Tycho Brahe, Kepler, Galilei og Newton. Allesammen leverede de vigtige bidrag til fysik og astronomi.

Personerne bliver beskrevet biografisk og de sættes ind i den historiske periode som de var børn af. Der er

glimrende afsnit om personernes metoder og videnskabelige opdagelser, og der er uddrag af originaltekster (i dansk oversættelse) fra nogle af personernes værker.



Bogen giver således et frisk overblik over nogle af de vigtigste begivenheder i den europæiske videnskabs-historie, og hvordan naturvidenskaben opstod. Denne bog vil sikkert være inspirerende læsning for gymnasieelever, f.eks. i forbindelse med tværfaglige forløb i fysik og historie. Der er også lidt matematik med i bogen (Kepler, Galilei og Newtons love), men det er ikke bogens stærkeste side. Til gengæld er bogen vel illustreret.

Michael Cramer Andersen

Børnebog om stjerner og planeter

Af: Inge Duelund Nielsen, Anja C. Andersen og Lilian Brøgger. DR 2008, 48 sider, 199,95 kr. <http://www.dr.dk/netbutik>.



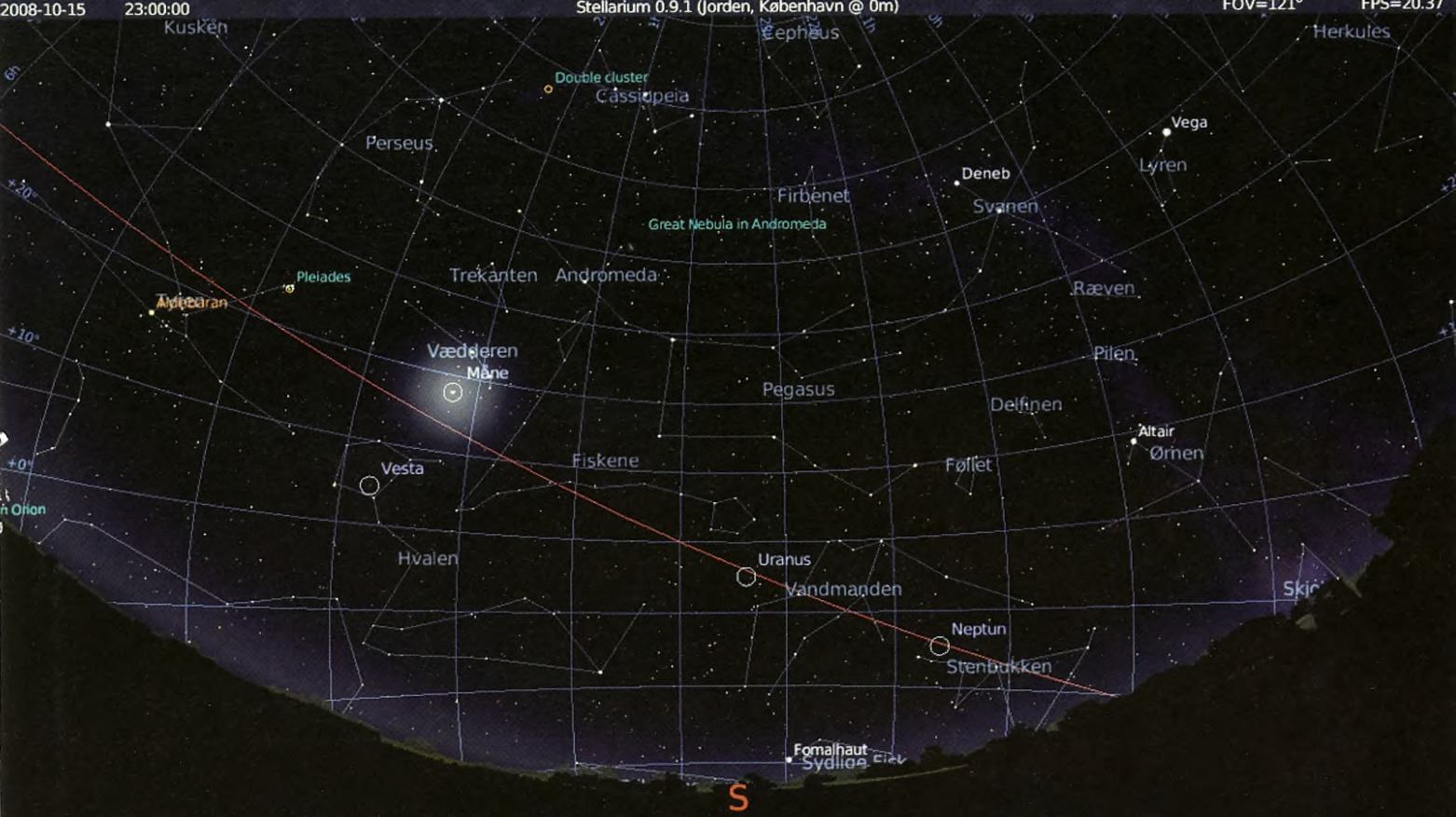
Denne bog henvender sig til 'børn i alle aldre' – nok primært de 6-10 årige. Astrofysikeren Anja C. Andersen har sammen med børnebogsforfatteren Inge Duelund Nielsen skrevet en sød historie om en pige der gerne vil gøre sin mor glad og derfor rejser ud i rummet for at finde en stjerne til moren. Det viser sig at være en svær opgave, men undervejs får man noget at vide om stjerner, planeter og galakser. Bogen er smukt illustreret med astronomiske billeder og figurer tegnet ovenpå af Lilian Brøgger.

Michael Cramer Andersen

CAND. SCIENT'ER FÅ FLERE FORDELE?

JA! Se hvordan på
www.candscient.nu

IDA er med flere end 67.000 medlemmer landets største interesseorganisation for tekniske og naturvidenskabelige kandidater. Flere og flere cand.scient.er har allerede opdaget, at de er bedst stillet i IDA. Udover økonomiske fordele som landets formentlig billigste og bedst dækkende forsikringer, får du som medlem adgang til mere end 700 arrangementer årligt, deltagelse i fagtekniske selskaber og meget mere. Brug 5 minutter på www.candscient.nu og læs om alle fordelene. **Velkommen som cand.scient. i IDA.**



Stjernehimlen mod syd den 15/10 kl. 23.00

Månens faser:

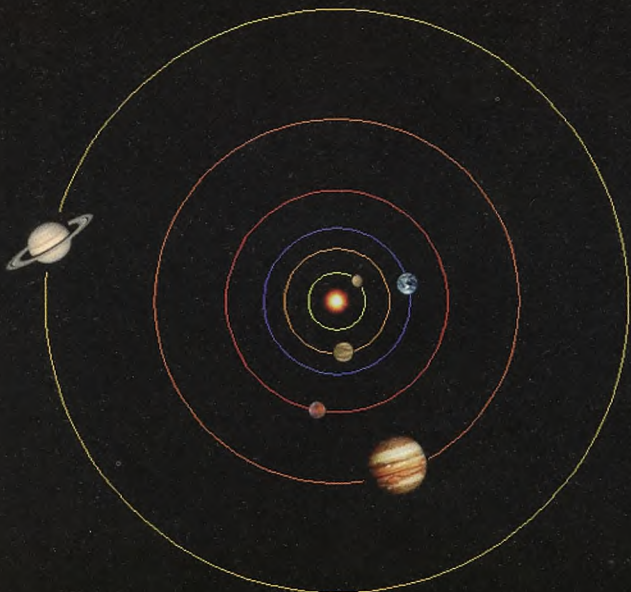


Astronomiske begivenheder:

- Årstider, formørkelser og meteorstorme.
- 22/9 Efterårsjævndøgn
- 21/10 Stjerneskedssværmen Orioniderne kulminerer
- 17/11 Stjerneskedssværmen Leoniderne kulminerer
- 13/12 Stjerneskedssværmen Geminiderne kulminerer
- 21/12 Vintersolhverv

Solsystemet ca. 15. oktober:

- Bevægelse mod uret. Kun planeter synlige med det blotte øje er vist.



Planeterne:

De indre planeter Merkur og Venus ses bedst enten ved solnedgang omkring største østlige elongation eller ved solopgang ved største vestlige elongation. Merkur kan være op til 28° og Venus op til 47° fra Solen. De ydre planeter ses bedst omkring opposition (når planeten står modsat Solen) og dårligst omkring konjunktion (planeten står bagved Solen).

Merkur: Foran Solen; konj. 6/10; vestl. elong. 22/10.
Venus: Aftenhimlen. Okkultation bag Månen 1/12.
Mars: Jomfruen, ikke synlig pga. konjunktion 5/12.
Jupiter: Skytten, lavt over horisonten.
Saturn: Løven, ikke synlig pga. konjunktion 4/9.
Uranus: Vandmanden, konjunktion 7/9.
Neptun: Stenbukken.

Venus okkulteres af Månen den 1. december:



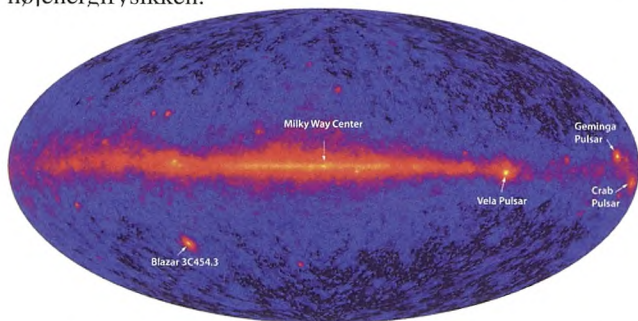
SSV

KVANT-nyheder

Af Sven Munk og John Rosendal Nielsen, KVANT.

Rumteleskopet Fermi ser dagens lys

ASTRONOMI. Den 11. juni i år opsendte NASA deres nye gammastrålingsobservatorium GLAST, der står for Gamma-ray Large Area Space Telescope. Teleskopet har i august måned lavet de første observationer, og i den anledning har NASA besluttet, at opkalde teleskopet efter fysikeren Enrico Fermi (1901-1954), som var pioner inden for højenergifysikken.



Rumteleskopet, der hedder Fermi Gamma-ray Space Telescope, har til formål at studere gammastråling, der er den mest energirige form for elektromagnetisk stråling vi kender. Gammastråling udsendes i forbindelse med fænomener som supernovaer og sorte huller. Til undersøgelserne har observatoriet to videnskabelige instrumenter: Large Area Telescope (LAT) og GLAST Burst Monitor (GBM). Som navnet antyder, kan data fra LAT producere kort over gammaområder på hele himlen, hvilket den allerede har fremstillet (se billedet). Denne kortlægning blev foretaget på kun 95 timer, hvilket skal ses i forhold til NASAs gamle gammaobservatorium, der brugte flere år på et tilsvarende kort.

GBM skal registrere de pludselige udbrud af gammastråling – kendt som gammaglimt, der opstår når massive stjerner dør i en supernova eller neutronstjerner bevæger sig i en spiralbane for til sidst at kolliderer. Fermi har efter den første måneds dataindsamling fundet 31 gammaglimt. Det tegner altså godt for teleskopet, som man forhåbentligt vil gøre mange interessante opdagelser med.

Kilder: www.tycho.dk/article/articleview/5083/, science.nasa.gov/headlines/y2008/26aug_firstlight.htm?list121333

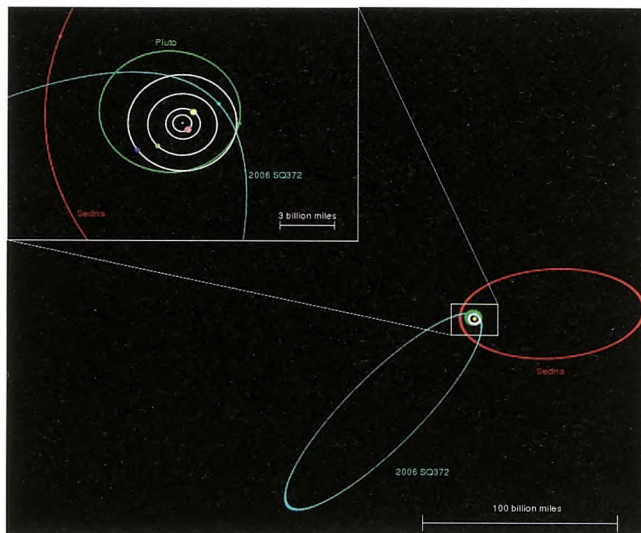
Gådefuldt objekt fundet i Solsystemet

ASTRONOMI. Astronomer har på baggrund af data fra det netop afsluttede kortlægningsprojekt "Sloan Digital Sky Survey" (SDSS) fundet et objekt, der kredser omkring Solen i en usædvanlig langstrakt elliptisk bane.

Objektet, der har fået katalogbetegnelsen 2006 SQ372, befinder sig for øjeblikket 3,2 mia. km fra Jorden, hvilket er tæt på afstanden til Neptuns bane. 2006 SQ372 vil ikke komme nærmere Solen, men vil igen bevæge sig ud af Solsystemet til den når sin maksimale afstand på 240 mia. km svarende til en afstand, der er 1.600 gange afstanden mellem Solen og Jorden. Dette mærkværdige objekt vil derefter ikke returnere til planeternes domæne i Solsystemet før om 22.500 år.

Man formoder, at 2006 SQ372 er en kometagtig klump af klippe og is, der er ca. 50-100 km stor. Isklumpen udvikler ikke en lang hale af gas og støv, som er karakteristisk for en

komet, idet den ikke kommer i nærheden af Solen. Det eneste objekt i Solsystemet, som vi kan sammenligne det med, er den meget større plutoide kandidat Sedna, der har en diameter på 1.600 km. Sednas bane er ikke nær så langstrakt, og den når kun ud på en afstand på 900 AE (1 AE = Afstanden mellem Solen og Jorden).



Det er oplagt at antage at 2006 SQ372 stammer fra Oort-skyen, der er opkaldt efter den hollandske astronom Jan Oort. Han foreslog i 1950'erne, at Solsystemet er omkranset af en stor sky af små dybfrosne klumper af is og sten. Problemet er, at selvom 2006 SQ372's maksimale afstand er enorm, vil den være 10 gange mindre end den teoretiske bestemte afstand til Oort-skyen. Det er muligt at det mærkværdige objekt er en del af en indre Oort-sky, som kan være opstået ved tyngdepåvirkning fra en stjerne, der på et tidligere tidspunkt har passeret forbi Solsystemet. Tilsvarende teorier har været foreslået til at forklare Sedna, der blev opdaget i 2004.

2006 SQ372, Sedna og andre lignende objekter vil være utroligt interessante undersøge nærmere, da de vil være en vigtig kilde til vores viden om Solsystemets dannelse og udvikling.



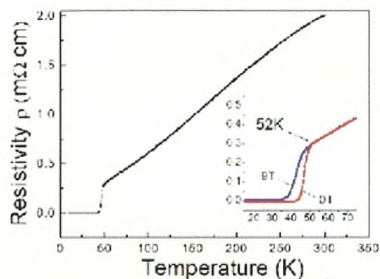
SDSS er et specielt multifilter 2,5 meter optisk teleskop, der desuden kan lave en spektroskopisk kortlægning. Teleskopet er placeret på terrassen på Apache Point Observatoriumet – vist på billedet ovenfor.

Kilder: www.tycho.dk/article/view/5066; www.videnskab.dk/content/dk/-naturvidenskab/enestaende_fund_i_solsystemet; www.sdss.org/news/releases/20080818.sq372_final.html

Ny superleder: $\text{Pr}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$

FASTSTOFFYSIK. Siden opdagelsen i 1986 af kobberoxid-superlederen har forskerne arbejdet ihærdigt på at finde andre højtemperatur-superledere. Først på året påviste japanske forskere, at $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ er superleder med en kritisk overgangstemperatur T_c ved 26 K. Strukturen i materialet beskrives som værende meget enklere end i kobberoxidmaterialet, hvorfor det tiltrak sig stor opmærksomhed. Noget andet, som er værd at notere, er, at jern indgår.

Inspireret af denne opdagelse lykkedes det ret hurtigt for kinesiske forskere at vise, at $\text{Pr}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ begynder at vise tegn på superledning ved 53 K.

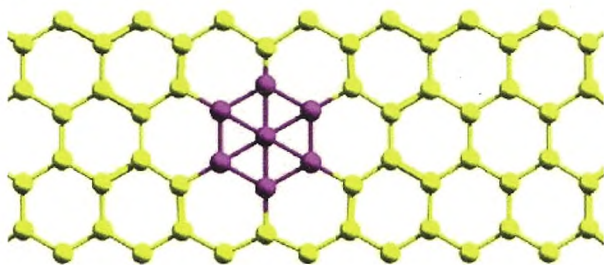


Der er således en del forskere, som har forventning til, at dette nye materiale kan blive en vigtig højtemperatursuperleder.

Kilder: arXiv.org: 0803.4283 – om $\text{Pr}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ arXiv.org: 0807.2009 – om $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$.

Bor i graphene er en elektrisk leder

NANOELEKTRONIK. Med henblik på at lave elektroniske nanoenheder baseret på graphene er nogle forskere kommet på den idé, at indlejre bor i graphene. Det skal ske i form små øer eller klynger af bor, som er elektrisk ledende. Ved at forbinde sådanne øer kan der laves elektriske ledere mellem forskellige enheder.



Billedet viser hvorledes en enhed bestående af 7 bor-atomer indlejres. Forskerne har vist at kul og bor er kompatible på nano-niveau. Metoden med at indlejre bor-klynger er kendt fra den siliciumbaserede halvlederindustri. Selvom arbejdet hovedsagelig er teoretisk, er forskerne optimistiske mht. den praktiske brug af metoden.

Kilde: arXiv.org/abs/0802.3195

Lysglimt på 80 attosekunder

ATOMFYSIK. Processer, som involverer elektroner i atomer, udspiller sig hyppigt i noget, der er mindre end et femtosekund. Forskeres ønske om at kunne iagttage sådanne fænomener har været drivkraften bag udviklingen af en teknik, som kan frembringe ekstremt kortvarige lyspulser. Nu er det lykkedes forskere fra "Advanced Light Source", Berkeley i samarbejde med "Max-Planck-Institut für Quantenoptik", Garching (DE) og Universitetet i München at passere grænsen 100 attosekunder.

Fremgangsmåden er den, at der sendes en laserpuls, med en bølgelængde på 720 nm og varighed på 3,3 fs, ind i en sky af neon-atomer, som ioniseres. Når elektronerne finder tilbage til atomerne, sker det med udsendelse af den ønskede kortvarige ultraviolette lyspuls. For at bestemme varigheden af den udsendte lysimpuls har forskerne udviklet en særlig måleteknik.

Ferenc Krausz fra "Munich-Centre for Advanced Photonics" (MAP) forventer, at det i løbet af nogle år vil være muligt at flytte grænsen ned til 20 attosekunder.

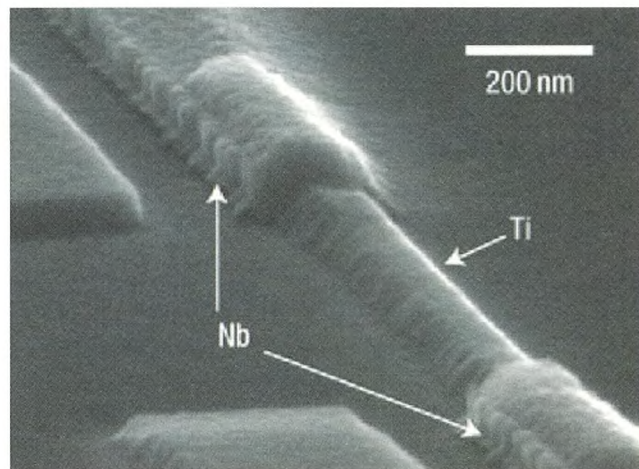
Kilde: *Science* bind 320, s. 1614, 2008.

THz for astrofysikere

RADIOASTRONOMI. Den del af det elektromagnetiske spektrum, hvor bølgelængden er under 1 mm, har stor interesse for bl.a. astrofysikere. Omkring halvdelen af den stråling, som findes i rummet, tilhører denne del af spektret. Dette betegnes som submillimeter eller THz-regionen. Da atmosfæren absorberer en stor del af denne stråling fra rummet må astronomiske observationer foregå over denne. Der stilles som bekendt store krav til det måleudstyr, som skal anbringes i satellitter.

En detektor, som kan registrere en enkelt THz-foton er netop blevet præsenteret. I beskrivelsen indgår begreber som: superledende nanobolometer med en varmekapacitet på 10^{-19} J/K og en minimal termisk ledningsevne til den termiske sink.

Selve detektorelementet består af en Ti-tråd (560 nm lang) forbundet med Nb i hver ende.



Gershenson, Rutgers University (USA), ser den nye detektor som et første skridt mod et "billeddannende" detektorarray bestående af 100×100 detektorer.

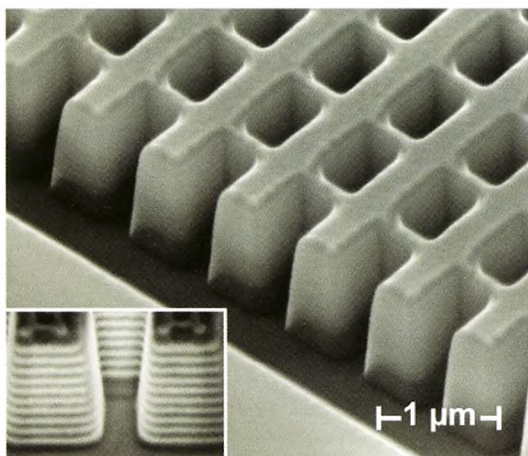
Kilde: Ultrasensitive hot-electron nanobolometer for terahertz astrophysics. Jian Weil m.fl. i *Nature Nanotechnology*, 3, 496-500 (2008), <http://news.rutgers.edu/medrel/2008/07/nano-sized-electroni-20080710>.

Negativt brydningsindeks

OPTIK. Tidligere forsøg på at lave brugbare metamaterialer til det optiske område er strandet på, at tabene var for store og geometrierne for grove. Et par forskere er dog på det seneste kommet med bud på hvordan tab kan gøres små.

Fra Californien kommer et par forslag, hvor metamaterialet [1] realiseres ved at anbringe talrige parallelle (60 nm diam.) sølvtråde indlejret i aluminiumoxid. Afstanden mellem trådene er mindre en lysbølgelængden, så "fladen" opfattes som homogen af strålingen. Med 660 nm polariseret lys påvises den usædvanlige brydning, når polarisationsretningen var sammenfaldende med sølvtrådenes orientering.

Det andet materiale [2] er formentlig baseret på det netop omtalte, men med en langt mere kompliceret geometri.

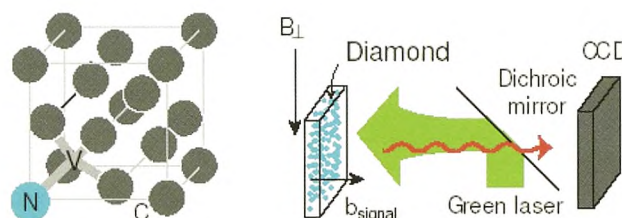


Med denne konstruktion er de optiske effekter gjort uafhængige af lysets polarisationsretning. Af dette materiale blev lavet et prisme med hældningsvinkel på 5 grader. Ved at ændre bølglængden af lystrålen fra $1,2 \mu\text{m}$ til $1,8 \mu\text{m}$ ændrede strålen retning. Omregnet til brydningsindeks er dette gået fra 0,6 til $-1,2$. Forskerne fremhæver selv det lille optiske tab, som sikkert kan mindskes yderligere.

Kilder: [1] Xiang Zhang, Univ. of Cal. (Berkeley), *Science* bind 321, s. 930; [2] *Nature* (doi: 10.1038/news.2008.1033).

Enkelt atom som magnetisk sensor

ATOMFYSIK. Et nyt koncept til detektering af svage magnetiske felter er udviklet. Forskerne kan foretage en kohærent kontrol af elektron-spin kvantebits i et fast stof, som i dette tilfælde er diamant. Sensoren baseres på nogle områder eller centre i diamanten, hvor kvælstof kan opholde sig, som opererer ved stuetemperatur. Da koncentrationen af sådanne centre kan være lav (f.eks. ét i et diamantkrystal på $10\text{-}50 \text{ nm}$) kan der opnås optisk kontakt med et enkelt elektronspin.



Som anvendelse for denne sensor nævnes detektering af spin-præcession i et enkelt atom. Desuden ser forskerne mulighed for at lave et system, som afbilder styrkefordelingen af et magnetisk felt. Her forventes en opløsning i intervallet mikrometer-millimeter med en følsomhed, der nærmer sig $10^{-15} \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Kilde: J.M. Taylor, M. D. Lukin m.fl., arXiv:0805.1367.

Ohms lov – breddeopgave 32 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC.

Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave fra RUC (nr. 32 i rækken her i KVANT):

32. Ohms lov

Hvad er modstanden for en elektrisk strøm fra indersiden til ydersiden af en hul metalkugle? Begrund svaret.

Løsning

Ifølge Ohms lov på differentiell form,

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \rho \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

gælder for den strømførende kugle:

$$E(r) = \rho \cdot j(r), \quad (2)$$

hvor $E(r)$ er størrelsen af det radialt rettede elektriske felt i afstanden r fra kuglens centrum, $j(r)$ er den

radialt rettede ladningsstrømtæthed i afstanden r , og ρ er metallets resistivitet.

Da der ikke hobes ladning op i metalkuglen må den elektriske strøm, I , være den samme igennem alle kuglens kugleskaller. Derfor er:

$$4\pi r^2 \cdot j(r) = I \quad (3)$$

for alle r .

Spændingsforskellen, U , imellem indersiden og ydersiden af kuglen er givet ved integralet af $E(r)$ fra indersiden til ydersiden. Ved at indsætte $j(r)$ fra (3) i (2) og udføre integrationen fås:

$$\begin{aligned} U &= \int_{r_i}^{r_y} E(r) \cdot dr \\ &= \int_{r_i}^{r_y} \frac{\rho \cdot I}{4\pi r^2} \cdot dr \\ &= \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_y} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

hvor r_i er indersidens radius og r_y er ydersidens radius. Af ligningen ses modstanden for en elektrisk strøm fra indersiden til ydersiden af metalkuglen derfor at være:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_y} \right) \quad (5)$$

Kommentar

Med et lidt mindre grundlæggende udgangspunkt fås en lidt nemmere løsning af opgaven ved at opfatte kuglen som en række infinitesimale modstande i serie. Da kugleskallen imellem r og $r + dr$ har tykkelsen dr og tværsnitsarealet $4\pi r^2$ er dens modstandsbidrag givet ved:

$$dR = \rho \cdot dr / (4\pi r^2) \quad (6)$$

Den samlede modstand fås da ved at integrere dR fra r_i til r_y .

Den anførte løsning er mere grundlæggende end denne udregning ved blandt andet at repetere sammenhængen imellem elektrisk felt og spændingsforskel. Men den giver mig også anledning til en didaktisk kommentar. For hvad er det egentlig opgaven handler om? Er det Ohms lov?

I folkeskolen præsenteres Ohms lov således:



Fig. 34. En ny og nyttig form for Ohms lov!

Læg mærke til skiltet til højre.

$$V = \Omega \cdot A$$

$$V = k\Omega \cdot mA$$

Figur 1. Advarselstavle med Ohms lov. Figuren er hentet fra "Fysik og kemi for 9. klasse. Grundbog", Andersen, I & Norbøll, K.W. (1979). P.Haase & Søn's Forlag, København, side 20.

Advarselstrekanten fungerer som hjælpemiddel til at løse opgaver, hvor enten strømstyrke, spænding eller modstand kan findes ved at holde hånden over den ukendte størrelse og således se, hvorvidt de to kendte størrelser enten skal multipliceres eller divideres for at finde den ukendte.

I gymnasiet præsenteres Ohms lov algebraisk:

$$U = R \cdot I, \quad (7)$$

idet der gås ud fra, at eleverne her – i modsætning til i folkeskolen – kan forstå at regne med bogstaver.

Medens Ohms lov på universitetet altså blandt andet dukker op som en identitet imellem to vektorfelter som angivet i ligning (1).

På alle tre niveauer er der i sammenhæng med arbejde med Ohms lov forskellige læringsmæssige udfordringer i at forstå begreberne strøm, spænding, modstand og deres indbyrdes forbundenhed. Med modstillingen af folkeskolens, gymnasiet og universitetets repræsentationer af Ohms lov har jeg imidlertid gerne villet illustrere, at de virkelig store forskelle imellem de læringsmæssige udfordringer i folkeskolens, gymnasiet og universitetets arbejde med f.eks. Ohms lov ligger i graden af matematisk abstraktion, der kræves bragt i spil. Denne artikels breddeopgave handler derfor dybest set ikke i særlig høj grad om Ohms lov. Den kunne f.eks. lige så godt have drejet sig om det matematisk set analoge problem om varmeledningen ud igennem en kugle på grund af en temperaturforskel imellem det indre og det ydre af kuglen. Og derfor handler opgaven her mere om at kunne håndtere matematik på et vist niveau og – ikke mindst – at kunne bringe den modelleringsmæssigt i spil, end den handler om Ohms lov. Arbejdet med Ohms lov er midlet, hvor det er matematisk modelleringskompetence, der er målet.

Og sådan burde det efter min mening også være i folkeskolen. Eksperimentelle øvelser med modstande er overkommelige og billige som udgangspunkter for at træne den symbolske beskrivelse af omvendte og ligefremme proportionaliteter ved hjælp bogstaver og bogstavregning. Og hvis dette undviges, som det jo er meningen med figur 1's tavler, kan jeg ikke se noget afgørende formål med at undervise i Ohms lov i folkeskolen. Jeg kan bedre se berettigelsen af manualagtige anvisninger som figurens i f.eks. uddannelsen af elektrikere, som skal arbejde specifikt med Ohms lov. Hvorimod folkeskoleundervisningen burde have et mere alment formål for øje.

Breddeopgave 33. Aircondition

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne eksamensopgave fra breddekurset på RUC (fra sommereksamen 2007, nr. 33 i rækken her i KVANT):

Et aircondition anlæg holder en rimelig temperatur indendørs i en bygning. Udendørstemperaturen svinger mellem en maksimumsværdi om dagen og en minimumsværdi om natten, som er lig indendørstemperaturen. Hvor stor er elregningen sammenlignet med elregningen, hvis udendørstemperaturen havde maksimumsværdien døgnet rundt? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.

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 i-hærdige 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,

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

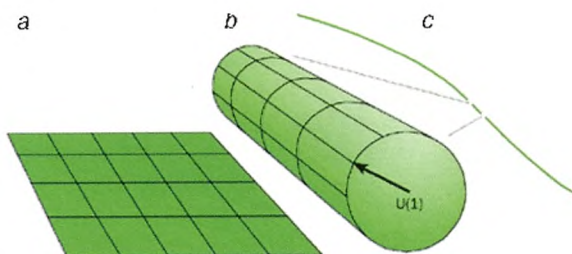
hvilket er omkring 10^{20} gange mindre end størrelsen af en proton.

Velkommen til de ekstra dimensioner

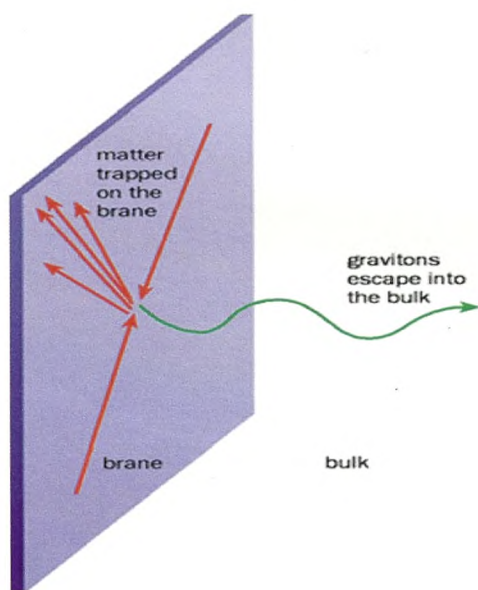
I mange år har strengteoriene antaget at der var 6 ekstra dimensioner ud over de 4 velkendte således, at tyngdekraften – sammen med de 3 andre kræfter – befandt sig i et 10 dimensionalt rum-tid kontinuum. Nu er vi alle bekendte med de sædvanlige 3 rumlige dimensioner: Højde, længde og dybde, og nok er 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").

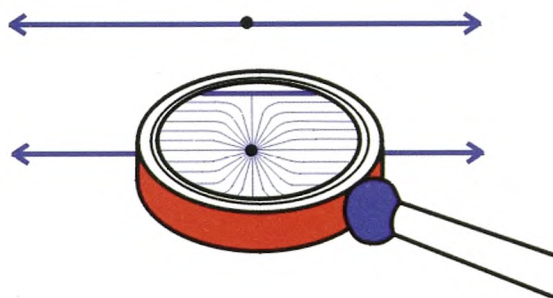
I 1998 ændrede denne opfattelse sig dramatisk da de 3 teoretikere, Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos og Gia Dvali, foreslog muligheden for at tyngdekraften var ene om at kunne bevæge sig i de ekstra dimensioner, mens alle andre partikler og kræfter var bundet til at bevæge sig i de sædvanlige 4 dimensioner. 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 præcis 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 forstørrede 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 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!

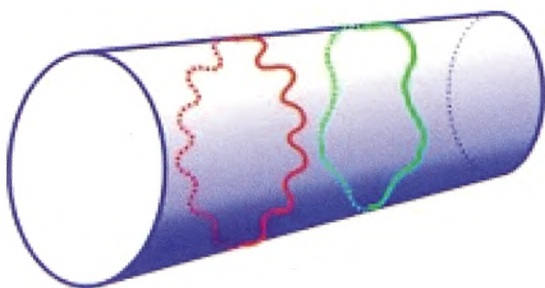
I dag findes der flere modeller med ekstra dimensioner, som man groft kan inddеле i tre forskellige grupper: Store ekstra dimensioner, Universelle ekstra dimensioner og "warped" (bøjede) ekstra dimensioner. Grupperingen afspejler de forskellige antagelser om, hvorledes partikler og kræfter kan bevæge 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

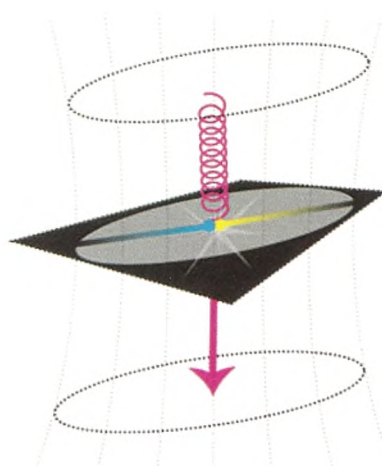
at have en mindre bevægelsesmængde – de ser ud som om de har fået ekstra masse. Partikler som kan bevæge sig i de ekstra dimensioner vil således kunne komme med en uendelig "stige" af mulige bevægelsesmængder, som i 4 dimensioner ser ud som kopier af samme partikel med forskellige masser! Disse såkaldte 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/c² 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 kollisionsenergier 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.

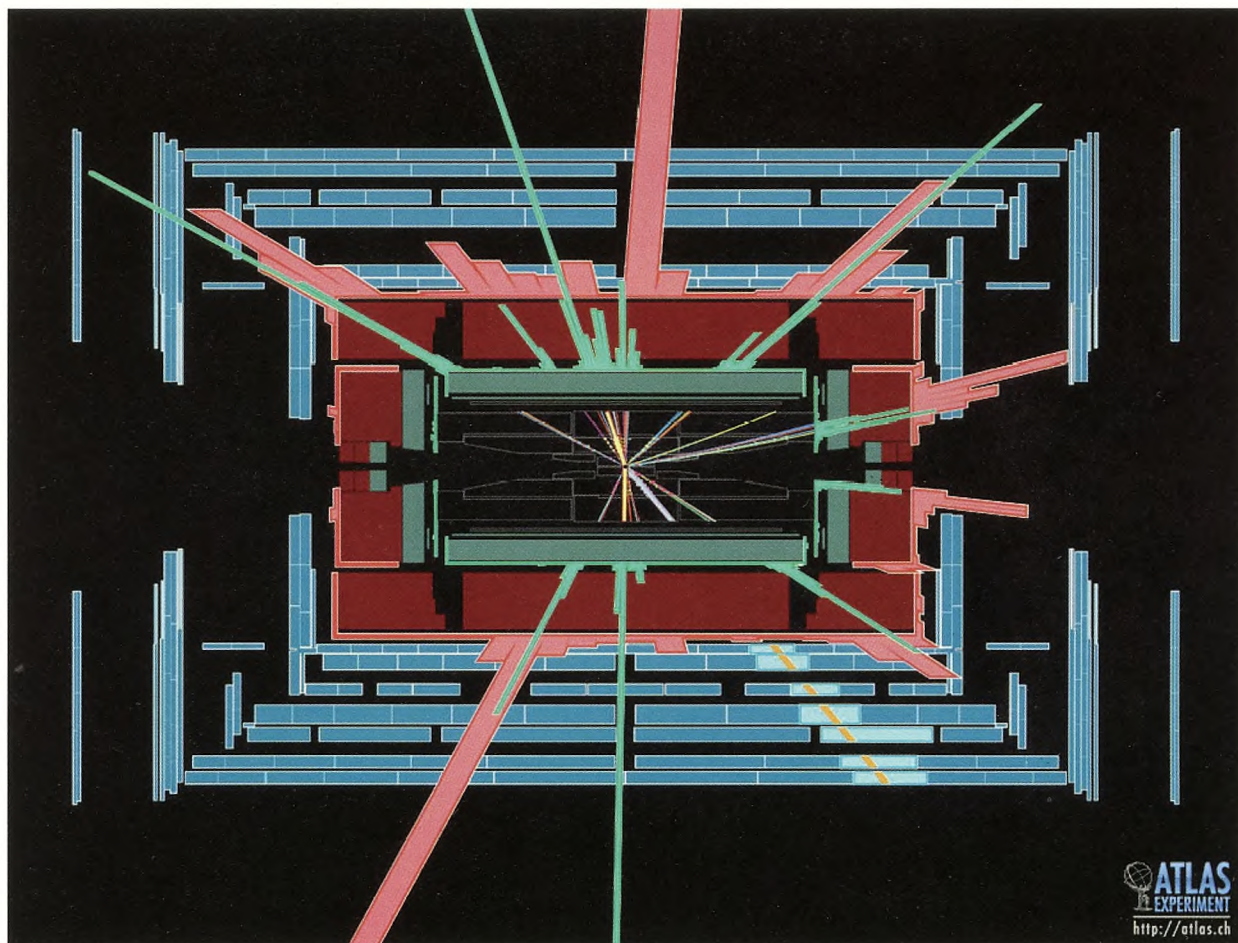
En mulighed for at opdage ekstra dimensioner er at opdage en graviton som forsvinder ud af vores 4 dimensioner. Da energi og bevægelsesmængde er bevaret i en kollision, så forventer vi, at partikler vil blive udsendt i alle retninger som et slags fyrværkeri. Et tydeligt tegn på ekstra dimensioner vil 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 lyseblå 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 inde i 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 opsluge 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.

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 *fotino* 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.

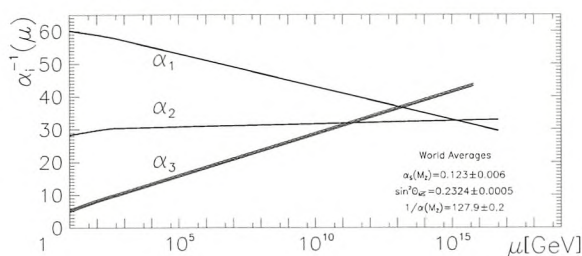


Figure 1. Styrken af de tre naturkræfter i Standardmodellen. De tre linjer repræsenterer (1 divideret med) de såkaldte koblingskonstanter ved forskellige energier. α_1 , α_2 og α_3 er følgelig α_{EM} , α_{Svag} og $\alpha_{Stærk}$.

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.

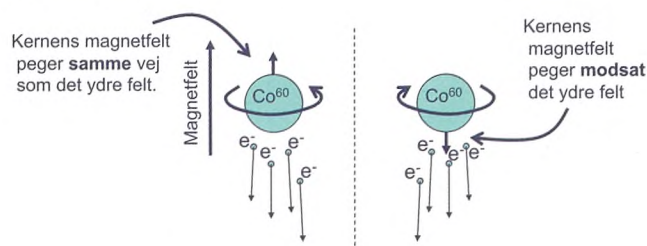


Figure 2. Paritetsbrud i den svage kernekraft. En prøve af Cobolt-60 kerner i et magnetfelt vil placere sig med deres spin parallelt med det ydre magnetfelt. Da Co-60 er radioaktiv vil prøven udsende elektroner. Dette vil ske i retningen *modsat spinnen*. Spejler vi situationen som vist, vil vi se Co-60 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.

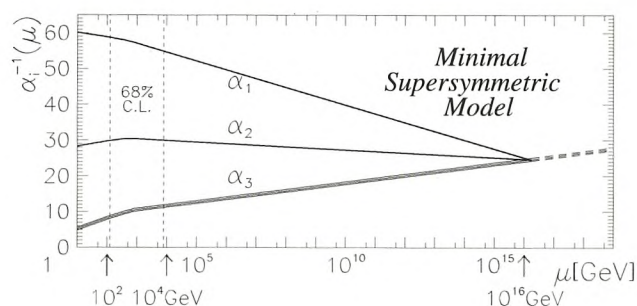
Alle disse nye partikler har navne baseret på dem vi kender fra Standardmodellen. Fermioners superpartnere er blot navngivet ved at sætte et "s" foran partikelnavnet (elektron $\rightarrow$ *selektron*, kvark $\rightarrow$ *skvark* ...), mens bosonernes partnere er navngivet ved at sætte endelsen "-ino" på. Således er *W*-partiklen parret med en *Wino*, mens fotonens superpartner er en *photino* og gluonens en *gluino*. Imidlertid vil de fysiske observerede partikler i nogle modeller være *superpositioner* af disse partnere, hvorfor man ofte taler om *gauginos* (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 gauginerne. Man inddeler derfor ofte blot de nye supersymmetriske fermioner i *charginos* (ladede) og *neutralinos* (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 hierarkiproblemet 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*.

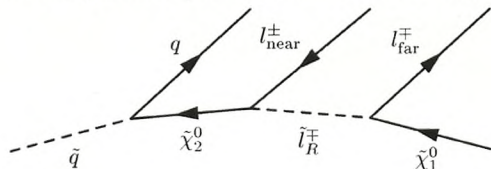
Der er da også tilsyneladende problemer med SUSY. Alle disse nye partikler åbner op for nye henfaldskanaler. Heriblandt kan også protonen lige pludselig henfalde, hvilket godt kan betegnes som et problem. Vi har endnu til gode at observere et protonhenfald til trods for at vi har bedrevet partikelfysik 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

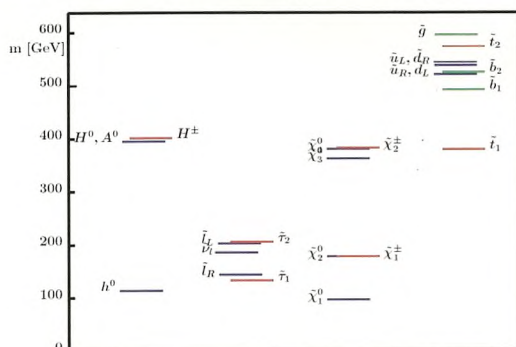
Hvis supersymmetri findes i naturen ved TeV-skalaen som beskrevet tidligere, burde supersymmetriske partikler kunne dannes i sammenstød ved LHC. Disse partikler vil henfalde i kaskader til den letteste supersymmetriske partikel (LSP) som illustreret i figur 4.



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:

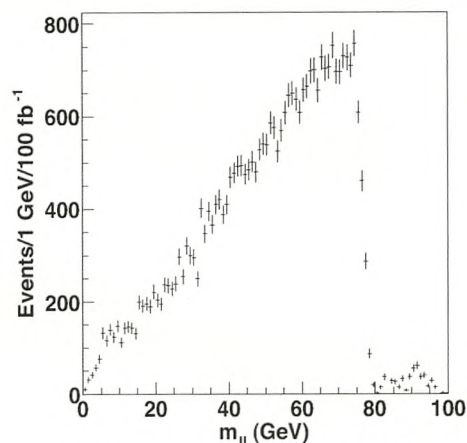
- Fire jets (en jet opstår når en kvark eller en gluon udsendes med stor energi)
- To leptoner af samme type (e/μ) men med modsat ladning
- Manglende transvers impuls

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:

$$(m_{ll}^2)_{max} = \frac{(m_{\tilde{\chi}_2^0}^2 - m_l^2)(m_l^2 - m_{\tilde{\chi}_1^0}^2)}{m_l^2} \quad (3)$$



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.

Databehandling af LHC-data med GRID

Af Frederik Orellana, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Behandlingen af data fra LHC kræver et verdensomspændende netværk af computere. I denne artikel gennemgås nogle af udfordringerne ved konstruktionen og brugen af dette.

Introduktion: partikelfysik og grid

Begrebet 'grid computing' hænger uløseligt sammen med partikelfysik og i særdeleshed med "Large Hadron Collider" (LHC) ved den Europæiske Organisation for Forskning i Kernefysik (CERN).

Da den konkrete planlægning af LHC-databehandlingen startede i slutningen af 1990'erne, var det klart for de fleste at der var brug for en radikalt anderledes infrastruktur end den der havde været anvendt i forbindelse med tidligere tiders CERN-eksperimenter. De mængder af data LHC vil levere er ganske enkelt langt større og der er langt flere forskere – fordelt over hele verden, der vil analysere dem.

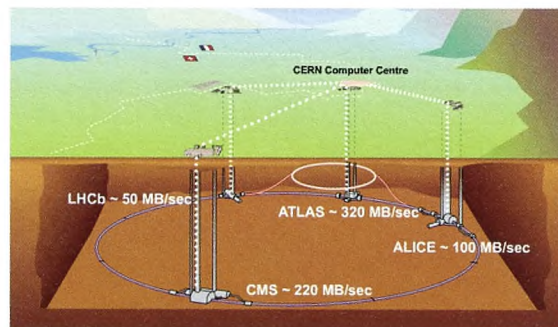
Samtidig var der på amerikanske og europæiske universiteter nye softwareprodukter under udvikling, som ville tillade etableringen af virtuelle arbejdsgrupper samt deling af computere og store mængder af data på tværs af organisations- og landegrænser [1].

Det blev besluttet at anvende disse softwareprodukter til etableringen af et verdensomspændende 'LHC-grid', som efter planen skulle give forskere fra alle CERN's medlemslande adgang til at analysere LHC-data direkte fra deres hjemmestitutter.

Inden vi vender os imod realiseringen af dette projekt, vil vi nu se på hvad det er for datamængder vi har med at gøre og hvor de kommer fra.

LHC data i tørre tal

Ved LHC vil man i efteråret 2008 begynde at sende protoner rundt i acceleratoren. Dette vil i starten blot være testkørsler med relativt få protoner ved 'lave' energier. Senere forventer man at nå op på 800 millioner proton-protonkollisioner per sekund ved energier på 14 TeV. For blot én af de 4 detektorer – ATLAS, vil det resultere i en datastrøm fra selve detektoren til det såkaldte begivenheds-filter på op imod 100 Gb/s. Så meget data er det umuligt at studere i detalje og filtrets opgave er at bruge nogle meget hurtige test til at frasortere 'uinteressante' begivenheder. Efter denne frasortering vil en datastrøm på 320 MB/s bevæge sig fra de underjordiske faciliteter til CERN's computercenter – det såkaldte Tier-0-center, hvor disse 'rå data' vil blive opbevaret permanent og viderebehandlet til såkaldte "Event Summary Data" (ESD) og "Analysis Object Data" (AOD). Dette er vist i figur 1. Flere informationer om LHC kan findes i [2].

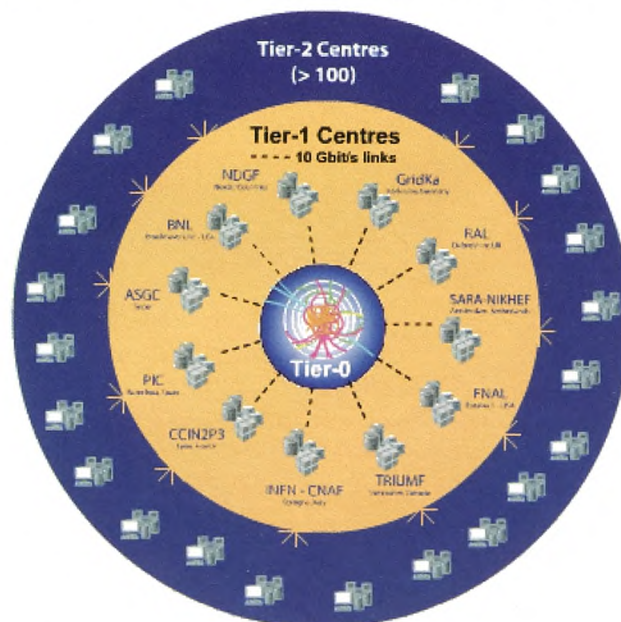


Figur 1. Dataenes vej fra detektorer til CERN's computer-center. Kilde: [3].

LHC-grid'et

Det nye, i forhold til tidligere CERN-eksperimenter, er ikke kun mængden af data, men også at alle rå data, ESD og AOD kontinuerligt vil blive kopieret væk fra CERN og ud til 10 såkaldte Tier-1-centre rundt omkring i verden hvor de vil blive viderebehandlet. Disse Tier-1-centre har hver en dedikeret netværksforbindelse på 10 gigabits per sekund til CERN's computercenter.

For ATLAS alene vil hvert Tier-1 center (se figur 2) modtage og opbevare 1/5 af de rå data samt al ESD. Dette svarer til ca. 8 TB per dag og ca. 2 PB per år!



Figur 2. Illustration af de forskellige niveauer i LHC-grid-arkitekturen. Kilde: [3].

Tier-2 centrene har til opgave at producere simulerede data, som kopieres 'op' til Tier-1 centrene. Derudover er det Tier-2-centrenes opgave at 'servicere' forskerne. Forskernes dataanalyse vil netop foregå under anvendelse af AOD data lagret på Tier-2 centrene og med Tier-2 centrene computerkraft. De over 150 Tier-2- centre er af vekslende sammensætning. Deres lagringskapacitet, computerkraft og båndbredde til CERN og Tier-1-centrene afhænger typisk af hvor megen vægt der bliver lagt på partikelfysik og grundforskning i de givne lande og regioner.

I og med at f.eks. en forsker i princippet kan køre beregninger på alle de computercentre der er sammenkoblede via dette netværk, kan LHCgrid'et i og for sig betragtes som én gigantisk computer med mere end 50.000 CPU'er og mere end 20 PB lagringskapacitet.

[illegible]

Det nordiske grid

Nordiske fysikinstitutter deltog fra LHC-grid'ets start i udviklingen af den software der anvendes til at sammenkoble computerklynger. I 2001 blev dette samarbejde formaliseret ved dannelsen af NorduGrid [6], et forskningsnetværk finansieret af Nordisk Ministerråd via Nordunet2-programmet. NorduGrid har siden udviklet sin egen selvstændige grid software, som anvendes af de nordiske institutioner der deltager i LHC-grid'et. I særdeleshed anvendes denne softwa-

Nordiske fysikinst

Nordiske fysikinstitutter deltog fra LHC-grid'ets start i udviklingen af den software der anvendes til at sammenkoble computerklynger. I 2001 blev dette samarbejde formaliseret ved dannelsen af NorduGrid [6] – et forskningsnetværk finansieret af Nordisk Ministerråd via Nordunet2-programmet. NorduGrid har siden udviklet sin egen selvstændige grid software, som anvendes af de nordiske institutioner der deltager i LHC-grid'et. I særdeleshed anvendes denne software

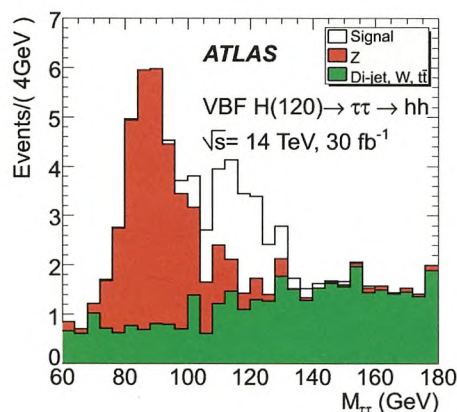
Fra produktion til analyse

For at forstå hvorfor analysen af LHC-data er imødeset med så stor spænding af fysikere verden over, vil vi tage en kort afstikker omkring teoretisk fysik.

Den metode der vil blive anvendt går i al sin enkelthed ud på følgende: Man starter med en teoretisk model for elementarpartikler, beregner hvad der i følge denne model vil ske når to protoner støder sammen med en hastighed på 99,9999991 % af lysets og beregner hvad det bør give af målinger ved ATLAS. Dernæst sammenligner man dette med hvad man rent faktisk har målt.

Figur 4 viser et plot af simulerede ATLAS-data. Det viser fordelingen af den såkaldte invariante masse per begivenhed. Da der er tale om simulerede data er det muligt at identificere begivenheder der skyldes andre processer end den man søger ($H \rightarrow \tau\tau$). Simuleringerne er kørt af ATLAS' produktionsgruppe på LHC-grid'et. Det vil kræve 3 års datatagning at samle nok data til at lave et tilsvarende plot med rigtige begivenheder. Et sådant plot vil så kunne bruges til at give et bud

på om Standardmodellens Higgs-partikel rent faktisk findes ved en given masse (120 GeV i dette tilfælde).



Figur 4. Et plot af den invariante masse – simulerede ATLAS-data. Kilde: ATLAS-gruppen ved Niels Bohr Institutet.

De fleste af de danske fysikere der beskæftiger sig med LHC-fysik er tilknyttet Niels Bohr Institutet. Her sidder også et lille hold af grid-udviklere. Det er én af grid-udviklernes fornemste opgaver at gøre brugen af den omfattende infrastruktur så enkel og effektiv som muligt, for således at give fysikerne de bedst mulige betingelser for at skabe videnskabelige gennembrud.

Den generelle danske grid-udvikling foregår både på Institut for E-Science og Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet, samt på Ålborg Universitet og hos NDGF i Kastrup.

Litteratur

- [1] I. Foster and C. Kesselman, "The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure" (1998), Morgan Kaufmann; 1st edition (November 1998), ISBN: 1558604758
- [2] Jos Engelen, "Physics at the LHC with ATLAS and CMS", Nuclear Physics B – Proceedings Supplements Volume 135, October 2004, Pages 3-8
- [3] LHC folier fra cern.ch/gridcafe – indeholder gode illustrationer og let forståelig tekst, se <http://gridcafe.web.cern.ch/gridcafe/animations/LHCdata/LHCdata.html>
- [4] G. Duckeck et al. (2005), "ATLAS computing: Technical design report", CERN-LHCC-2005-022, se <http://cdsweb.cern.ch/record/837738>
- [5] F. Carminati et al. (2005), "ALICE computing: Technical design report", CERN-LHCC-2005-018, se <http://cdsweb.cern.ch/record/832753>
- [6] The NorduGrid collaboration, "Nordugrid – the nordic testbed for wide area computing and data handling – final report", <http://www.nordugrid.org/documents/nordugrid-final.pdf>
- [7] NDGF web site, <http://www.ndgf.org/>



Frederik Orellana, har siden sine ph.d.-studier ved universitetet i Zürich beskæftiget sig med anvendelsen af computerteknologi i højenergifysik og beslægtede områder. Først ved CERN og universitet i Geneve og nu som postdoc ved Niels Bohr Institutet.

TOTAL SOLFORMØRKELSE I KINA

Viktors Farmor arrangerer to forskellige rejser til solformørkelsen i Kina
Den længste solformørkelse i dette århundrede

Begge rejser er kombineret med et program der præsenterer deltagerne for området omkring Shanghai.

Vores rejseleder assisteres af en astronomisk ekspert, som kan fortælle om hvad der sker under solformørkelsen og svare på spørgsmål.

Begge rejser begynder og slutter i Shanghai.

Vi bor fortrinsvis på 4- eller 5-stjernede hoteller.

Prisen er inklusive helpension og drikkepenge.

Solformørkelse ... med udvidet rundrejse

Vi har en heldags-udflugt til den hellige buddhistiske ø Putuoshan før solformørkelsen, hvor øboerne stadig lever som i 1800-tallets Kina. Vi rejser rundt i nogle af Kinas smukkeste landskaber samt de gamle landsbyer i Anhui-provinsen og den gamle fiskerby Tongli ved Yangtze-flodens delta.

17. til 31. juli 2009
Pris: 21.800 kr.

Ledere: Casper Tollerud og Mikael Svalgaard



Solformørkelse ... og Kina kort fortalt

Før og efter oplevelsen er der indlagt sightseeing og afslapning i byerne Shanghai, Tongli og Suzhou. I Suzhou oplever vi de smukke haver.

Vi sejler på Yangtze-floden og ser såvel moderne storbyer som landsbyer og oplever flotte shows og opvisninger.

18. til 27. juli 2009
Pris: 16.900 kr.

Ledere: Bozena Kaminska og Michael Cramer Andersen



Foreningsnyt – foredrag i efteråret

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Sep.				
8/9	19.15	“Jordskin: Se på månen og forstå vores klima”	<i>Peter Thejll</i>	AS (Kbh)
15/9	19.15	“Jordskin: Se på månen og forstå vores klima”	<i>Peter Thejll</i>	AS (Årh)
15/9	19.30	“Våbenbiologi: er truslen reel og kan der gøres noget ved det ?”	<i>John-Erik Stig Hansen</i>	SNU
29/9	19.15	“X-shooter: Deltagelse i bygningen af et instrument til VLT”	<i>Per Kjærgaard Rasmussen</i>	AS (Kbh)
Okt.				
6/10	19.15	“X-shooter: Deltagelse i bygningen af et instrument til VLT”	<i>Per Kjærgaard Rasmussen</i>	AS (Årh)
20/10	19.15	“SONG: Exo-planeter og stjernesvingninger”	<i>Frank Grundahl</i>	AS (Kbh)
27/10	19.15	“SONG: Exo-planeter og stjernesvingninger”	<i>Frank Grundahl</i>	AS (Årh)
Nov.				
3/11	19.15	“Fremtidens teleskoper”	<i>Hans Kjeldsen</i>	AS (Kbh)
17/11	19.15	“Fremtidens teleskoper”	<i>Hans Kjeldsen</i>	AS (Årh)
Dec				
1/12	19.15	“Det nordiske teleskop: Mellem Brorfelde og det globale observatorium”	<i>Johannes Andersen</i>	AS (Kbh)
8/12	19.15	“Det nordiske teleskop: Mellem Brorfelde og det globale observatorium”	<i>Johannes Andersen</i>	AS (Årh)

Foredragene afholdes på følgende adresser:

AS (Kbh): Auditoriet, Juliane Maries Vej 30, 2100 Kbh. Ø

AS (Årh): Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade, Bygn. 530, Aud. F, 8000 Århus C

SNU: UNI-C, Vermundsgade 5, 2100 København Ø, (www.naturvidenskab.net).

To ildsjæle revet bort

Ved en tragisk ulykke på en ekspedition til Grønland har Selskabet for Naturlærens Udbredelse mistet to mangeårige og særdeles aktive medlemmer. To ildsjæle er i bogstaveligste forstand revet bort.

Erik Schou Jensen var som flere gange før arrangør af en tur til Grønland med skibet M/S Kisaq, men da rejseselskabet var i land ved gletscheren Kangerluarsuk Sermia kom et jækelløb, der rev ham selv og Jørn Johs. Christiansen i vandet, hvor de begge druknede.

Erik Schou Jensen, 69 år gammel, var netop gået på pension fra sin stilling på Geologisk Museum, men havde forestillet sig at fortsætte sin aktive formidlingsvirksomhed, som jo blandt andet netop omfattede sådanne ture til Grønland og andre steder med spændende geologiske forekomster, samt sin aktivitet som medlem af direktionen for Selskabet for Naturlærens Udbredelse.

Han var kendt som en fremragende geolog, med en stor styrke netop indenfor formidling han holdt spændende og inspirerende foredrag både i Folkeuniversitetsregi og mange andre steder, han stod i mange år for Geologisk Museums udstillingsvirksomhed, som han i sjælden grad formåede at forny, og han var meget aktiv

i kontakten til folkeskolen og gymnasierne.

For sin store formidlingsindsats blev han i august 2004 tildelt H.C. Ørsted Medaljen i bronze, og han fik i 1997 tildelt “Geografiprisen 1997”.

Lektor Jørn Johs. Christiansen, 73 år gammel, var kemiker og overtog for 20 år siden hvervet som sekretær for Selskabet for Naturlærens Udbredelse – han havde da i mange år været lektor i kemi ved Danmarks Lærerhøjskole, senere overgik han til ansættelse som lektor i kemi og fysik i gymnasieskolen.

Da bladet KVANT blev skabt som en fælles udgivelse fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse og Dansk Fysisk Selskab, blev Jørn Johs. Christiansen medlem af redaktionskomiten – et hverv han samvittighedsfuldt passede gennem mange år.

Han var selv efter at være gået på pension fortsat aktiv som sekretær for SNU, og stod i alle sammenhænge altid parat til at give en hjælpende hånd, når der var brug for det – og det var der selvfølgelig i flere sammenhænge med arrangementerne i SNU, som baserer sig på frivillig indsats fra behjertede medlemmer.

Vi vil savne dem begge meget i SNU – æret være deres minde.

Dorte Olesen
Præsident for SNU.

Galaksehobes kollision afslører mørkt stof

NASA/ESA's Hubble rumteleskop og NASA's Chandra Røntgenteleskop har fundet et vigtigt bevis for, at der findes mørkt stof i Universet. Dette er lykkedes ved at observere en galaksehob ved navn MACSJ0025.5-1222, der er dannet ved en kollision af to galaksehobe.

Ved denne gigantiske kollision bliver det mørke stof adskilt fra det normale stof, idet mørkt stof ikke vekselvirker med deres omgivelser på nær gennem tyngdekraften. Det normale stof i de to tidligere hobe er blevet opbremset, mens det mørke stof er fortsat uhindret igennem hobene og derfor findes i udkanten

af den samlede hob.

Tyngdekraften fra det mørke stof påvirker omgivelserne ved at krumme rumtiden, hvilket ændrer lysets bane fra bagvedliggende lyskilder – f.eks. galakser – ligesom lysets gang igennem en linse. Hubble har benyttet denne gravitationelle linse til at bestemme fordelingen af det mørke stof i hoben. Chandra har bestemt fordelingen af varm gas, ved at måle røntgenstrålingen fra den varme gas. Observationerne viser at galaksehobene er meget tungere end deres indhold af lysende stof (stjerner og varm gas). Men de giver ingen løsning på spørgsmålet om det mørke stofs natur.



Kollision mellem to galaksehobe optaget med Hubble Rumteleskopet (NASA/ESA). Ovenpå billedet er vist fordelingen af mørkt stof (blåt) fundet ved gravitationel linsning. Imellem galaksehobene er der efterladt en sky af varm gas (lyserødt), optaget med Chandra-Røntgensatellitten (NASA).