

KVANT

Maj
2012 2

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 23. årgang

- SPONTANELEKTRIKA
- PÅ JAGT EFTER HIGGS-BOSONEN
- JAGTEN PÅ JORDLIGNENDE PLANETER MED MIKROLINSNING
- KVANTESPIL SOM DEMOKRATISERET FORSKNING
- KUGLEFORMEDE STJERNEHOBE
- NOGET OM ELLIPSEN
- KAPILLARBØLGER
- KVANT-NYHEDER

Løssalgspris: 50 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
Natalia Golubeva,
Aarhus Universitet
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Ørsted Lab, Københavns Universitet
Svend Erik Rugh

Korrektur

Torben Westerberg

Foreningsrepræsentanter

Torben Lund Skovhus (SNU),
Teknologisk Institut

Abonnementspris : 180 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: 2200. Tryk: HCB Tryk ApS, Brønderslev. ISSN 0905-8893

Produktionsplan

Nr. 3-12 udkommer ca. 1. oktober
Nr. 4-12 udkommer ca. 15. december
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Kvant og Knudepunktet	
<i>Michael Quaade</i>	3
På jagt efter Higgs-bosonen	
<i>Stefania Xella</i>	4
Spontanelektrika, eller faste stoffer overrasker stadig	
<i>David Field</i>	9
Aktuelle bøger	
<i>Finn Berg Rasmussen og Michael Cramer Andersen</i>	15
KVANT-nyheder	
<i>Sven Munk</i>	16
Stjernehimlen	
<i>Michael Cramer Andersen</i>	18
Kugleformede stjernehober	
<i>Michael Quaade</i>	19
Kapillarbølger – breddeopgave 49 med didaktisk kommentar	
<i>Jens Højgaard Jensen</i>	20
Jagten på Jordlignende planeter med gravitationel mikrolinsning	
<i>Kennet Bomann West Harpsøe</i>	22
Demokratiseret forskning og spilbaseret undervisning	
<i>Sidse D. Hansen, Rikke Magnussen og Jacob Friis Sherson</i>	26
Foreningsnyt – foredrag i efteråret	31
Noget om ellipsen	
<i>Mogens Esrom Larsen</i>	32
Søges: SUSY-partikler og mørkt stof	
<i>Michael Cramer Andersen</i>	Bagsiden



Billedet på forsiden viser Den kugleformede stjernehober Messier 9 i stjernebilledet *Ophiucus* optaget med Hubble Rumteleskopet. Messier 9 indeholder over en kvart million stjerner og er omkring 25.000 lysår væk. Læs mere om kuglehober i artiklen af Michael Quaade inde i bladet. Foto: NASA og ESA.

KVANT udsendes gratis til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), samt DTU Fotonik, DTU Fysik og DTU Nanotech.

Kvant og Knudepunktet

Af Michael Quaade, formand for Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab er én af de fire foreninger, der er sammen om at udgive Kvant. I mere end 20 år har vi også udgivet medlemsbladet *Knudepunktet* med foreningsstof og amatørastronomiske artikler. Fremover vil vi ikke længere udgive *Knudepunktet*, men i stedet bringe alt materiale fra Astronomisk Selskab i Kvant.

Grunden til, at vi i 1990 besluttede at udgive et blad var, at vi alligevel udsendte indkaldelse til generalforsamlingen og andet materiale til medlemmerne flere gange om året. Samlede vi det i et blad kunne vi dels – dengang – få portostøtte og dels få en platform, hvor vi kunne bringe artikler af medlemmerne om amatørastronomiske emner. Det gav god mening fordi vi kunne spare en del porto og der var rigeligt stof til at fylde et blad fire gange om året.

I dag er situationen helt anderledes. Der findes ikke længere en portostøtteordning, som er økonomisk fordelagtig for et blad med så lille et oplag som *Knudepunktet*. Samtidigt er mængden af amatørastronomisk stof markant mindre end tidligere. De elektroniske medier har overtaget størsteparten af amatørastronomers indbyrdes kommunikation. Vore dages amatørastroforum har i høj grad egne websider og skriver på astroforum.dk og andre internetfora.

De sidste par år har vi kun udgivet tre numre af *Knudepunktet* om året og meget af indholdet har været lister over bestyrelsesmedlemmer og andet mere eller mindre trivielt stof. Samtidigt har vi i Astronomisk Selskabs bestyrelse diskuteret om det ikke ville være bedre, at samle vores udsendelse af materiale til medlemmerne i ét blad i stedet for to. Meget af det materiale, der hidtil har været bragt i *Knudepunktet*, fortjener også den større udbredelse, som det vil få i Kvant, hvor oplaget er fire gange så stort.

Denne idé har vi præsenteret for foreningens medlemmer og haft på dagsordenen ved de sidste to generalforsamlinger i 2011 og 2012. Sidste år holdt vi en vejledende afstemning og besluttede, at vi ville holde en endelig afstemning ved generalforsamlingen i år. Sidste år var der 79% af de fremmødte, der støttede forslaget og i år blev det enstemmigt vedtaget.

Astronomisk Selskab har allerede en mailingliste, så det bør være en simpel sag, at udsende alt andet end Kvant som email. Det kræver naturligvis, at samtlige

– eller i alt fald næsten alle – medlemmer er tilknyttet foreningens mailingliste. Derfor er det rimeligt, at forlange af medlemmerne, at de efterkommer denne simple instruks:

1. De, der allerede har en emailadresse, som er på foreningens mailingliste behøver ikke at foretage sig noget.
2. De, der har en emailadresse, som *ikke* er med på foreningens mailingliste bør snarest henvende sig til deres forening og sørge for at deres adresse kommer med på mailinglisten. Det gøres ved henvendelse til Michael Quaade, mq@astronomisk.dk eller telefon 4032 3553.
3. De, der ikke har en emailadresse bør snarest få oprettet en og herefter følge instruktionen under punkt 2.

Der vil formodentlig også fremover være enkelte, der ikke har mulighed for at modtage foreningsmeddelelser via email, men de kan efter aftale få materialet pr. brev eller ved foredragsarrangementer el.lign.

Det er naturligvis ikke alt indholdet i *Knudepunktet*, der skal overføres til Kvant. Meget af det stof, der – i alt fald i de sidste år – har været bragt i *Knudepunktet* har haft karakter af fyldstof, der kun er kommet med på grund af mangel på mere relevant materiale. Fremover vil lister over bestyrelsesmedlemmer, formandens årlige beretning, referatet fra generalforsamlingen mv. blive bragt på Astronomisk Selskabs webside astronomisk.dk og/eller blive udsendt på foreningens mailingliste. Steen Lærke, der hidtil har været redaktør af *Knudepunktet*, vil fremover indgå i Kvants redaktion og tage sig af materiale fra Astronomisk Selskab. Send fremover materialet til astro@kvant.dk og se eventuelt forfattervejledning på kvant.dk

Knudepunktet nr. 1 for 2012, som medlemmerne af Astronomisk Selskab allerede har fået, er altså blevet det sidste, der udkommer. Jeg håber, at både medlemmerne af AS og af de andre udgiverforeninger vil blive glade for Kvant med lidt mere astronomisk stof.

På jagt efter Higgs-bosonen

Af Stefania Xella, Niels Bohr Institutet

Higgs-bosonen er den eneste partikel forudsagt af partikelfysikkens Standardmodel, som ikke er blevet observeret eksperimentelt endnu. Det er essentielt at afgøre, hvorvidt den findes eller ej. At finde Higgs-bosonen er derfor et af de vigtigste mål for eksperimenterne ATLAS og CMS ved Large Hadron Collider (LHC) ved CERN nær Geneve.

Partikelfysikerne tror, at Universet kan beskrives ud fra dets mindste bestanddele. Når vi ved, hvilke typer af fundamentale partikler der findes, og hvilke fundamentale kræfter de kan føle, så kan vi bygge en teori, der giver os mulighed for at forstå udviklingen af Universet, fra inflationen til planetdannelse.

Standardmodellen er i virkeligheden kun det første kapitel i bogen om teorien om alting, da det giver os mulighed for at forklare fænomener i den verden, vi observerer hver dag. Men den verden udgør kun 5 % af Universet, den del vi kan iagttage gennem elektromagnetisk stråling. Standardmodellen fortæller os intet om det mørke stof, eller hvorfor Universet udvider sig som det gør. Så bogen er langt fra færdig. Ikke desto mindre er det første kapitel nok den vigtigste del af en bog, da det giver os mulighed for at beslutte, om vi skal fortsætte med at læse eller gå videre til en anden. På samme måde, hvis Standardmodellen er korrekt helt til den sidste forudsigelse, nemlig Higgs-bosonen¹, så er vores tilgang til forståelsen af naturen formentlig korrekt, og vi er overbeviste om, at vi er på rette vej.

Hvilken rolle spiller Higgs-bosonen i Standardmodellen?

Higgs-bosonens eksistens besvarer spørgsmålet om, hvordan fundamentale partikler som elektroner får deres masse eller vægt. Da alle kræfter er båret af fundamentale partikler, og forskellige kraftpartikler har forskellige masser (f.eks. er fotoner masseløse, og W-bosoner er ikke), så bruger vi også Higgs-bosonen til at forklare, hvorfor fundamentale kræfter er forskellige.

I de tidligste stadier af sit liv er Universet som en dråbe fyldt med ekstremt energirige partikler, som bevæger sig med lysets hastighed, og de er derfor masseløse. Universet udvider sig og bliver derved koldere og koldere. På tidspunktet $t = 0,0000001$ sekund efter Big Bang, sker en speciel faseovergang pludseligt. Et af de felter Universet er fyldt med kondenserer, på samme måde som vand, der langsomt afkøles og omdannes til is. Feltet kaldes Higgs-feltet, fra navnet på den teoretiske fysiker, som først forudsagde dets eksistens. Tilknyttet Higgs-feltet er også en partikel, Higgs-bosonen.

Denne faseovergang af Higgs-feltet har en interessant effekt på de forskellige partikler. Nogle partikler,

såsom fotonen, går gennem Higgs-feltet som om intet var sket. Nogle andre, som W-bosonen eller top-kvarken, bremses væsentligt eller holder næsten op med at bevæge sig. Bevægelsesenergien af en partikel omdannes til en ny, kondenseret form for energi, som vi kalder masse, jo mere partiklen vekselvirker med Higgs-feltet. Som vi ved fra Einstein, kan energien omdannes til masse og vice versa. Higgs-feltet bevirker, at forskellige partikler deler disse to forskellige former for energi på forskellige måder.

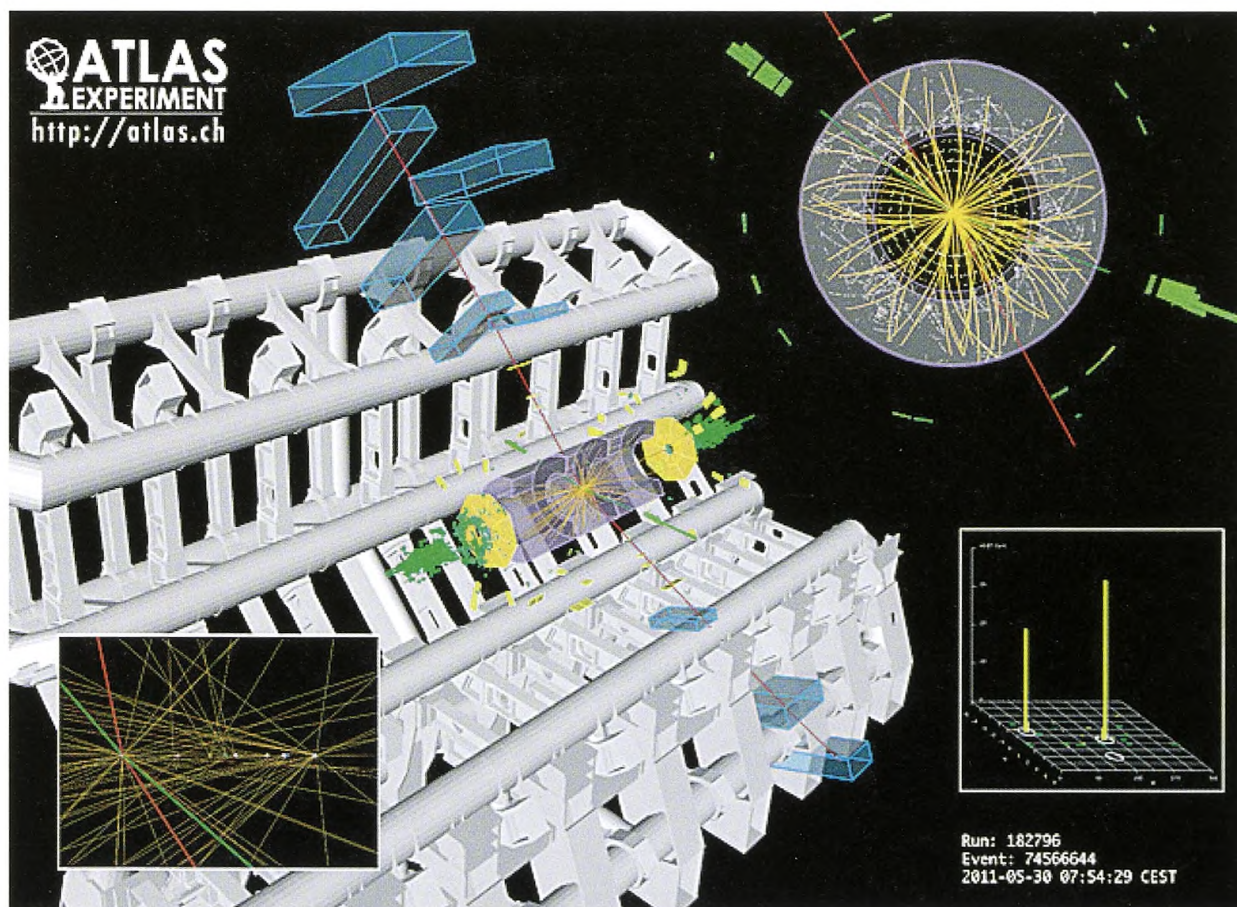
Hvis vi finder Higgs-boson ved LHC, så kan vi påstå, at vi forstår, hvad betydningen er af massen af en fundamental partikel, og desuden forstår vi, hvorfor de svage og elektromagnetiske kræfter er forskellige. Det er endnu et skridt i retning af en teori om alting. Endvidere kan Higgs-bosonen blive det første bevis for, at partikler med spin 0 spiller en vigtig rolle ved at beskrive grundlæggende fysik på mikroskopisk skala, og det kunne lede til en forklaring på andre uforklarede fænomener i astrofysik, nemlig inflation og mørk energi.

I det følgende vil jeg opsummere, hvor vi står i dag i søgningen efter Higgs-bosonen ved LHC. Jeg vil starte med en kort forklaring af, hvordan vi eksperimentalister præsenterer vores resultater af Higgs-eftersøgningen. Vores sprog kan til tider være vanskeligt at forstå. Som yderligere læsning om Higgs-bosonen og Standardmodellen vil jeg henvise til en tidligere beskrivelse af dette emne [3]. Se desuden en video om hvordan masse kan forklares med Higgs-mekanismen [4].

Hvordan udelukker eller beviser man Higgs-bosonens eksistens?

I december 2011 blev LHC resultaterne på eftersøgningen af Higgs-bosonen for første gang vist offentligt på CERN. Denne begivenhed var i alle henseender en succes og en milepæl i moderne partikelfysik, med undtagelse af ét punkt: Det blev ikke forklaret tydeligt nok til offentligheden, hvad resultatet egentlig peger på. Blev Higgs-bosonen fundet? Eller ikke? Jeg vil nu forsøge at forklare, hvordan man skal fortolke de annoncerede resultater. Et eksempel på en begivenhed, som med stor sandsynlighed er en kandidat til Higgs-bosonen, ses i figur 1. Men som det vil fremgå, er én begivenhed ikke nok til at man kan påstå, at man har opdaget Higgs-bosonen.

¹I partikelfysikken opererer man med to typer partikler, der har forskelligt spin. De fundamentale *fermioner* (kvarker og leptoner) har halvtalligt spin og opbygger alt stof. Derudover findes der *bosoner* med heltalligt spin, som bl.a. beskriver de fundamentale vekselvirkninger på kvanteniveau. I denne sidste gruppe hører Higgs-bosonen desuden til.



Figur 1. Visualisering af en begivenhed, målt med ATLAS-eksperimentet ved Large Hadron Collider, hvor protoner er kollideret ved høj energi og med stor sandsynlighed har produceret en Higgs-boson. Denne Higgs-kandidat er henfaldet til fire partikler: En myon og en antimyon (røde linjer) og en elektron og en positron (deres energi er registreret i kalorimetre, vist som grønne søjler i diagrammet øverst til højre).

Det er først og fremmest vigtigt at bemærke, at partikelfysikere bruge det *statistiske* sprog til at udtale sig om naturen. Når vi har en vis mængde data og vi kender vores eksperimentelle usikkerheder, så udtrykker vi vores resultater i forhold til sandsynligheden for, at det vi ser er en opdagelse af et nyt fænomen. Ellers udtrykker vi om vi kan udelukke dette fænomen med 95 % sikkerhed.

Tag eksemplet med at finde Higgs-boson. Ved at udelukke dens eksistens med 95 % sikkerhed mener vi, at hvis vi laver 100 eksperimenter for at finde den, så kunne 5 af dem vise et resultat der viser at Higgs-boson eksisterer, mens de andre 95 eksperimenter viser at Higgs-bosonen ikke eksisterer. Vi definerer altså en sådan "grad af sandsynlighed" for at udelukke dens eksistens. Det er her vi trækker grænsen for at sige, hvorvidt en partikels eksistens er udelukket eller ej.

Man ser altid udsving i data, der kan ligne interessant fysik, især på et tidligt stadium af et eksperiment, hvor vi endnu kun har samlet en lille mængde data, og alligevel er vi meget ivrige efter at konkludere noget ud fra den smule data, om vores foretrukne teoretiske forudsigelse (f.eks massen af Higgs-bosonen). For at undgå at overfortolke disse effekter, er vi ret konserva-

tive, når vi ser afvigelser fra Standardmodellen. Hvad vi kræver for at tale om en *opdagelse* er, at vi er 99,9999 % sikre på, at "partiklen" ikke er et udsving af standardfænomener der snyder os. Det er hvad vi kalder en "5 sigma effekt", eller en opdagelse.

Når datamængden stiger og vores forståelse af vores eksperimentelle usikkerheder forbedres, bliver vi mindre og mindre tilbøjelige til at misfortolke data.

Dette ligner faktisk meget processen med valg af en præsident, hvor man på et tidligt tidspunkt i valgprocessen får tidlige indikationer af, hvem vinderen bliver, baseret på en lille delmængde af de samlede stemmer. Da dette kun udgør en delmængde af befolkningen, kan det endelige resultat afvige fra de tidlige forudsigelser, men som valget skrider frem, bliver resultaterne mere og mere klare.

Lad os nu se på figur 2, for at gå mere konkret til fortolkningen af resultaterne på Higgs-boson eftersøgningen. Standardmodellen kan ikke forudsige hvilken masse Higgs-bosonen har, men forudsiger i stedet dens tværsnit (dvs. sandsynligheden for at den bliver produceret i en kollision) når massen er kendt. ATLAS bruger plots som figur 2 til at udelukke områder, hvor Higgs-bosonen ikke er. Figur 2 indeholder ikke rigtige data.

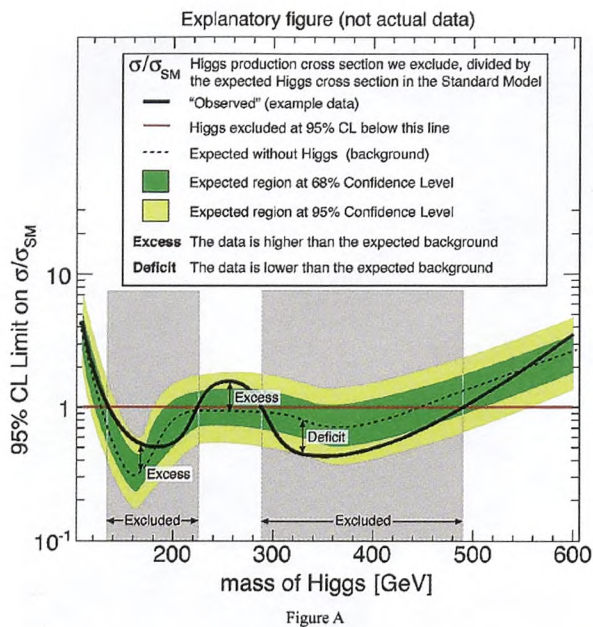


Figure 2. Figuren viser i princippet hvordan man udelukker hvilken masse Higgs-bosonen har. Dette er et hypotetisk datasæt, så figuren indeholder ikke rigtige LHC-data. Kilde: CERN.

Det er en figur af denne type, der viser hvor Higgs-bosonen *ikke* er. Vi kan stille mange spørgsmål, og det første spørgsmål, vi stiller er dette: Hvis Higgs-bosonen er beskrevet ved Standardmodellen, hvilke værdier kan dens masse ikke have? Lad os f.eks. spørge om Higgs-bosonen kan have massen 400 GeV?² Den stiplede linje på figur 2 ligger under 1, hvilket betyder, at vi har tilstrækkeligt med data til at udelukke, at Higgs-bosonen har en masse på 400 GeV. På y-aksen har vi produktionstværsnittet (divideret med den teoretiske forudsigelse fra Standardmodellen), så hvis Higgs-bosonen eksisterer og har en masse på 400 GeV, så er vi 95 % sikre på, at kurven fra virkelige data (fuldt optrukken linie) ikke ville falde til under 1.

Hvis den fuldt optrukne sorte kurve går under værdien på 1 (markeret med en rød linje) for en række af masseværdier, så ser vi altså fra vores data, at Higgs-bosonen ikke er produceret med det forventede tværsnit for disse masseværdier. Det betyder, at disse værdier af Higgs-bosonens masse er udelukket med 95 % sikkerhed. I dette eksempel, ville to regioner udelukkes med 95 % sikkerhed: ca. 135-225 GeV og 290-490 GeV.

Nu da vi ved, hvor Higgs-boson ikke kan være, så kan vi prøve at udforske masseværdier som stadig er tilladte. Vi inkluderer derfor de grønne og gule bånd i figur 2. Hvis der kun findes standardfysik (og ingen Higgs-boson), og vi kender vores eksperimentelle usikkerheder, så forventer vi, at den fuldt optrukne linje og den stiplede linje vil ligge tæt på hinanden.

I området mellem 225 og 290 GeV, ser vi, at den faste "data"-linje ligger højere end "forventet uden en Higgs-boson"-linjen. Der sker muligvis noget sjovt der,

²I partikelfysik benyttes ofte energienheden GeV = gigaelektronvolt, der svarer til $1,602 \cdot 10^{-10}$ J. En partikels masse er ækvivalent til energien $E = mc^2$, fx er energien svarende til protonens masse 0,938 GeV.

³Luminositet måler den totale mængde af kollisioner fra LHC til eksperimenter. 1 fb^{-1} svarer til omkring den mængde af data, der blev indsamlet af ATLAS i én måned, ved udgangen af 2011.

muligvis er der flere observerede begivenheder end hvad vi forventede under antagelsen af, at der ingen Higgs-boson findes der. Da den sorte streg stadig er inden for det gule øvre bånd, så er chancerne for, at dette indikerer eksistensen af Higgs-boson stadig mindre end 95 %. Det kunne være en indikation af, at en Higgs-boson findes med denne masse, eller det kunne være et tegn på, at der er baggrundsprocesser, der havde en statistisk fluctuation, eller at der er systematiske fejl, der ikke er tilstrækkeligt godt forstået. Derfor venter vi med at hoppe op og ned, indtil denne chance bliver 99,9999 %.

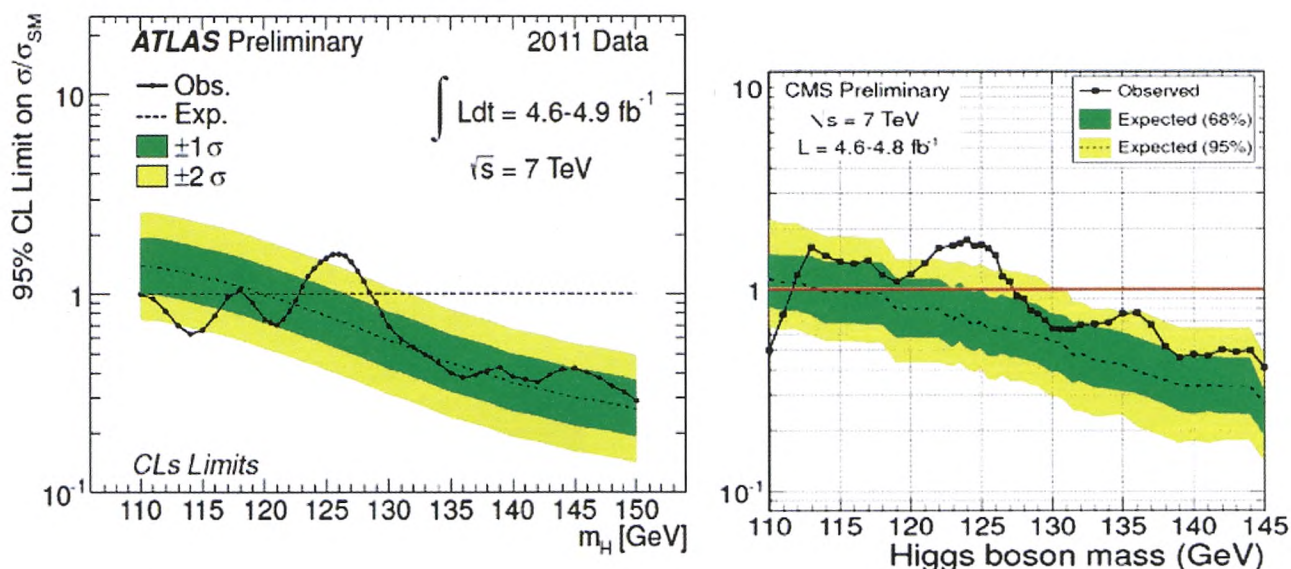
Status for den eksperimentelle søgen efter Higgs-boson

Efter en ujævn start i 2008, har LHC leveret, hvad den har lovet og meget mere. På mødet i Chamonix i januar 2011 mellem acceleratorforskere og eksperimentaler ved LHC, blev en samlet luminositet³ på 1 fb^{-1} forudsagt for hele 2011. Den faktiske indsamlede luminositet viste sig at være 5 fb^{-1} pr. eksperiment ved udgangen af året. Dette betyder, at acceleratoren klarede sig fem gange bedre end nogen forventede.

Denne stigning i datamængde kom for en pris i form af øget "pile-up", hvilket betyder, at eksperimentalerne var nødt til at forholde sig til, at op til 20 samtidige proton-proton kollisioner overlapper og bliver registreret samtidig som et "event" eller et "sammenstød". Dette ses fx som kollisionspunkterne i figur 1, nederst til venstre, hvor kun en enkelt af kollisionerne resulterer i partiklerne, der kan stamme fra henfald af en Higgs-boson.

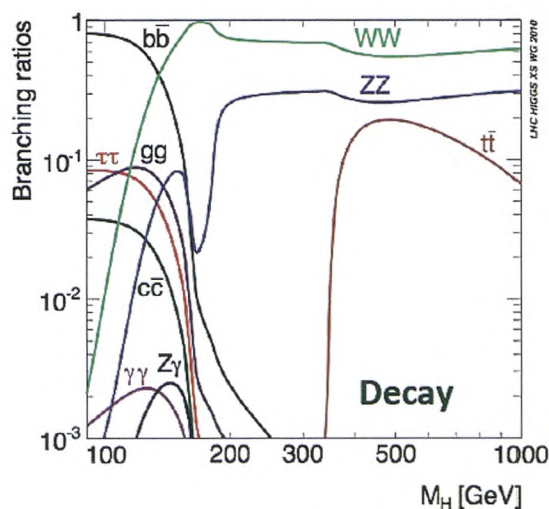
På trods af de forventede vanskeligheder med at observere ny fysik under disse vanskelige betingelser, holdt analysen trit med de indkomne data, og allerede ved udgangen af 2011 kunne en status for søgen efter Standardmodellens Higgs-boson præsenteres. Dette repræsenterede et stort fremskridt i forhold til den viden vi har samlet i tidligere eksperimenter i løbet af de sidste to årtier.

Det tog omkring 20 år for eksperimenterne ved LEP og Tevatron (tidligere acceleratorfaciliteter ved henholdsvis CERN og Fermilab) at komme til den samlede viden, at hvis Standardmodellens Higgs-boson eksisterer, skal dens masse være mellem 115 og 150 GeV eller over 175 GeV. I December 2011 præsenterede de to LHC-eksperimenter ATLAS og CMS deres resultater, og for første gang var Higgs-bosonens masse blevet indsnævret til et meget lille interval mellem 115 og 130 GeV med alle andre muligheder op til omkring 470 GeV udelukket med 95 % sikkerhed. Dette resultat er ved kun at bruge ATLAS alene – når man inkluderer resultaterne fra CMS forbedres disse grænser). Så nu ved vi, hvor Higgs-bosonen ikke er, hvis det er en Standardmodel-Higgs.



Figur 3. Den observerede (fuldt optrukne linje) og forventede (stiplet linje) 95 % CL øvre grænse fra ATLAS og CMS på produktionstværsnittet for en Standardmodel-Higgs-boson divideret med Standardmodellens forventning som en funktion af Higgs-massen i området 110-150 GeV. De stipede kurver viser den gennemsnitlige forventede grænse i fravær af et signal og de grønne og gule bånd indikerer tilsvarende 68 % og 95 % intervaller.

I hvert eksperiment skete noget sjovt ved ca. 126 GeV. Der var der et 3 sigma overskud af data, i forhold til hvad der forventes i fravær af en Higgs-boson. Dette overskud fandtes kun ved en masse omkring 126 GeV, og blev uafhængigt observeret af de to eksperimenter (126 i ATLAS og 125 i CMS). Men det var ikke et overskud på 5 sigma, og var derfor ikke stort nok til at blive kaldt “en opdagelse”. Vi havde altså ikke tilstrækkeligt med data til at påstå en opdagelse af en Standardmodel-Higgs.



Figur 4. Modelberegninger af, hvordan en Higgs-boson vil henfalde, afhængig af hvilken masse den har, hvis det er en Higgs-boson der tilhører Standardmodellen. Der er kun vist henfald til partikelpar fra Standardmodellen. Når massen er givet, er hyppighederne af henfaldskanalerne bestemt unikt.

Henfaldskanaler	Værdi af massen (GeV/c ²)
<i>Lav masse:</i>	
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110-150
$H \rightarrow ZZ \rightarrow lll$	110-600
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$	110-600
$H \rightarrow \tau\tau$	100-150
$H \rightarrow b\bar{b}$	110-130
<i>Høj masse:</i>	
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$	200-600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow llq\bar{q}$	200-600
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu q\bar{q}'$	300-600

Tabel 1. Tabel over mulige måder Higgs-bosonen kan henfalde. Symbolet “l” står for lepton, hvilket betyder, elektron eller muon (og anti-partikel), symbolet “q” står for quark, nemlig u, d, c, s, b (og anti-partikler). Henfaldskanaler er listet efter deres betydning (den reneste måde at observere et Higgs-signal står først) for at undersøge en given række masseverdier for Higgs-bosonen. Det er disse henfaldskanaler vi i øjeblikket undersøger ved ATLAS-eksperimentet. CMS-eksperimentet har en tilsvarende liste, som minder meget om denne.

Figur 4 viser Higgs-bosonens forskellige henfaldskanaler. De forskellige kurver viser hyppigheden af forskellige henfaldstyper afhængig af Higgs-bosonens masse. Det vil f.eks. være meget svært at se en Higgs-boson henfalde til en b-kvark og anti-b-kvark (den sorte kurve falder markant), hvis Higgs-massen er over ca. 300 GeV. I dette tilfælde må man støtte sig til henfald til enten WW, ZZ eller tt, der alle er hyppigere, for at afgøre, om det er en Standardmodel-Higgs eller ej.

Hvis Higgs-bosonen eksisterer, og har en masse svarende til 126 GeV, forventes det, at 2011-kørslen vil

indeholde ca. 200 begivenheder med henfald af $H \rightarrow WW$, ca. 70 begivenheder med $H \rightarrow \gamma\gamma$ og ca. 3 begivenheder med $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, der alle bidrager til det lille overskud vist i figur 3.

Higgs-bosonen har en meget kort levetid og henfalder til andre partikler, som derefter påvises ved ATLAS og CMS eksperimenter. Henfald til fotoner eller Z-bosoner er lettere at se, og derfor er disse to henfaldskanaler rangeret først i tabel 1. Men hvis Higgs-bosonen eksisterer, og netop er som forudsagt af Standardmodellen, så bør vi se resultater heraf i alle de henfaldskanaler, der er anført i tabel 1, før eller senere. Bemærk, at de mulige henfald af Higgs-bosonen er forskellige for forskellige værdier af massen (se figur 4).

Det tog kun LHC et år at producere data nok til at overskygge alle tidligere resultater på dette forskningsområde. Og det var en stor succes for LHC-projektet.

Der kommer hele tiden flere data ind. Da december 2011 resultaterne blev opdateret for Moriond 2012 Vinterkonferencen [5], se figur 3, lykkedes det ATLAS-gruppen, at indsnævre vinduet af mulige masseværdier for Higgs-bosonen endnu mere til 120-130 GeV eller over 540 GeV. Igen, når man inkluderer CMS-resultaterne, skærpes disse grænser endnu mere, og en kombination af disse resultater forventes inden sommeren 2012.

I marts 2012 (kun et par måneder efter udgangen af 2011-kørslen) havde både ATLAS og CMS analyseret den fulde datamængde indsamlet i 2011, og havde også givet resultater i mange henfaldskanaler, se tabel 1 og figur 4.

Når man betragter området mellem 120 og 130 GeV, se figur 3, observerer man et overskud eller "excess" omkring 126 GeV i begge eksperimenter. Når man analyserer dette interessante område i større detalje, peger data med en 2,5 sigma effekt mod, at der findes en Standardmodel-Higgs-boson med masse omkring 126 GeV i ATLAS-eksperimentet (og tilsvarende værdi fra CMS eksperimentet).

Det ser umiddelbart lidt underligt ud. Vi havde en 3 sigma effekt, og med lidt mere data og flere henfaldskanaler, blev det til kun 2,5 sigma. Det er vanskeligt at udtale sig klart om, hvad der sker her. Nogle af henfaldskanalerne var de samme (Higgs-bosonen, der henfalder til fotoner og Z-bosoner), og disse kanaler har en øget signifikans nu, men den nyeste analyse inkluderer flere nye kanaler, og da nogle af disse kanaler ikke ser et overskud, ja, så bliver kombinationen af signifikansen reduceret til 2,5 sigma.

Kapitlet om Standardmodellen er endnu ikke afsluttet, og vi er stadig ikke sikre på om Higgs-boson eksisterer. 2012 kørslerne er netop begyndt, og de forventes at forøge datamængden fra 2011 med en faktor 3 eller 4. Mere data bør være i stand til at bringe et svar. Det er derfor, vi fysikere anser året 2012 som Higgs-året.

Litteratur

- [1] LHC, <http://lh-machine-outreach.web.cern.ch/lh-machine-outreach>
- [2] ATLAS, <http://atlas.ch>
- [3] Katrine Facius og Stefania Xella (2008), Jagten på Higgs-partiklen ved LHC, KVANT nr. 3, september 2008.
- [4] Video der forklarer Higgs-mekanismen, <http://www.atlas.ch/multimedia/#origin-of-mass>
- [5] Moriond 2012, <http://discoverycenter.nbi.ku.dk/news/2012/moriond>.



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.

PFEIFFER  **VACUUM**

Totalleverandør

Mød den stærkeste leverandør af kvalitets vacuumkomponenter fra markedets førende producenter på DFS' årsmøde på Nyborg Strand juni 2012.

PFEIFFER-adixen-TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Spontelektrika, eller faste stoffer overrasker stadig

Af David Field i samarbejde med Oksana Plekan, Andrew Cassidy, Nikola Jones og Richard Balog, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Meget stærke elektriske felter kan opstå i film af tilsyneladende helt almindelige kemikalier såsom dinitrogenoxid og propan. Vi vil her beskrive, hvordan opdagelsen af dette uventede fænomen fandt sted, og hvordan vi forsøger at forstå egenskaberne ved denne nye klasse af spontant polariserede materialer.

Hvad er spontelektriske materialer?

Det er faktisk et godt spørgsmål, siden vi har følt os nødsaget til at opfinde begrebet. Begrebet 'spontelektrik' er blevet skabt til at beskrive en ny klasse af fysiske fænomener, der opstår i tynde film af bestemte materialer. I analogi til de kendte ferroelektriske materialer, har disse materialer fået navnet 'spontelektrika'. Ingen kendte basale begreber eller udtryk kan beskrive spontelektrikas særegne og bemærkelsesværdige egenskaber, og det er disse egenskaber, eller i hvert fald de af dem, som vi hidtil har opdaget, der vil blive præsenteret i denne artikel.

Den mest slående egenskab ved spontelektrika er følgende: I film bestående af ganske almindelige molekyler såsom dinitrogenoxid, toluen, propan og mange andre (se boks 1), kan der opstå elektriske felter med en styrke på over 10^8 V/m. Disse felter opstår spontant uden nogen ekstern påvirkning ved dannelsen af filmene. Filmene frembringes i laboratoriet ved at lade gasmolekyler kondensere på en kold overflade lag for lag.

Boks 1. Spontanelektrika.

De 12 stoffer, som forskerholdet foreløbig har identificeret som værende i stand til spontant at skabe elektriske felter, er: Methyformat, ethylformat, de tre freoner 11, 12 og 13 (CF_3Cl , CF_2Cl_2 , CFCl_3), propan, isopentan, dinitrogenoxid, isopren, toluen, kloroform og dihydrofuran.

Det, der skete i vores laboratorium, var følgende: Vi havde ved synkrotronstrålingsacceleratoren ASTRID i Aarhus designet og bygget et instrument, der kunne detektere potentialændringer i størrelsesordenen af millivolt (mV) mellem overfladerne af film. Eksperimentet bliver beskrevet i detaljer nedenfor. Det vigtigste at bemærke er, at vi var på jagt efter meget små ændringer på bare få mV i overfladepotentialer. Vi havde faktisk netop afsluttet et studium af transmission og indfangning af lavenergielektroner med en energi på få meV, også kaldet kolde elektroner, i vandis, hvor vi havde observeret ændringer i overfladespændingen på omkring -5 mV. Vi ville derefter studere et andet fundamentalt molekyle, og valget faldt på dinitrogenoxid N_2O , der også er kendt som lattergas eller kvælstofforilte. Fo-

restil jer derfor vores store overraskelse, da vi rettede strålen af kolde elektroner mod en guldoverflade belagt med omkring 50 lag af N_2O ved en temperatur på 40 kelvin (K) og i stedet for at måle overfladespændinger på få mV målte spændinger på flere volt. Derudover var overfladespændingen positiv i stedet for negativ! Vores første tanke var, at vores instrument var gået i stykker, fx at der var en kortslutning et sted i systemet. Vi havde jo trods alt ikke observeret noget lignende for vandis, og vi havde heller ingen grund til at forvente en sådan opførsel. Desuden havde forskere verden over i over 50 år studeret tynde film uden at få mistanke om, at sådan et fænomen kunne eksistere. Hvordan kunne de alle have overset det? Vi begyndte straks på nogle grundige, systematiske undersøgelser og opdagede, at vi rent faktisk havde opdaget noget nyt, som havde potentiale for at blive meget spændende. Mellem oversiden og undersiden af dinitrogenoxidfilm opstod der høje, positive spændingsforskelle, som vi senere målte til op til 38 V, som var det højeste, vi turde gå op til uden at ødelægge vores følsomme elektronik.

Hvordan detekterer man den spontelektriske effekt?

Den spontelektriske effekt i film kommer til udtryk i form af en spændingsforskel mellem de to overflader af filmen, og spændingen fremkommer spontant. Den eksperimentelle udfordring er at måle denne spænding uden at perturbere den væsentligt ved målingen. Det elektriske felt i filmen er da givet ved den målte spænding delt med filmens tykkelse. Når man for eksempel måler en spændingsforskel på 11 V hen over en film bestående af 300 monolag af N_2O deponeret ved 38 kelvin, vil man med en afstand mellem lagene på 0,32 nm få et elektrisk felt på $1,15 \cdot 10^8$ V/m.

For at måle overfladespændinger med høj præcision uden at forstyrre dem, benytter vi en stråle af fotoelektroner produceret ved hjælp af synkrotronstrålingen fra ASTRID. Opfindelsen af denne type fotoioniserings-elektronkilde, der benytter sig af synkrotronstråling, er ældre, end jeg har lyst til at huske [1, 2], og den har sidenhen været en flittig arbejdshest i studier af spredning af kolde elektroner på gasser [3]. Mekanismen bag kilden bygger på tuning af synkrotronstrålingen ved høj opløsning ind på fotoionisationsgrænsen for argon, som ligger ved 15,75 eV. De resulterende fotoelektroner dannes i et meget afgrænset område svarende til udstrækningen af synkrotronstrålen, og de har en

Elektronerne dannes ved et potential, som er defineret som nulpunkt for potentialet, og filmens underside holdes ligeså på potential nul. Elektronerne burde derfor lige akkurat være i stand til at nå hen til den spontelektriske overflade, hvis denne også var ved potentialet nul. Hvis overfladen derimod på grund af den spontelektriske effekt har et potential på fx +5 V, er det nødvendigt at introducere en bias på -5 V ved overfladen for at elektronerne netop lige kan nå hen til den. Instrumentet måler altså den bias, der skal til for at detektere en målbar strøm (1-2 fA, hvor 1 fA = én femtoampere er 10^{-15} ampere), og værdien af denne bias svarer dermed til potentialet på overfladen af filmen, når man ser bort fra små korrektioner. Biasen bestemmes ved at tilslutning af et meget

Dette bringer os tilbage til spørgsmålet stillet i starten. Forskere verden over har studeret tynde film i over 50 år uden at have mistanke om den spontelektiske effekt. Hvordan kunne de alle have overset denne? Svaret er følgende: i alle tilfælde, hvor effekten kunne have været tilstede, har elektrondoserne været mindst to til tre størrelsesordener højere end dem, vi har brugt. For eksempel har Leon Sanche i mange år i sit laboratorium udført relaterede forsøg, men med typiske strømstyrker på nanoampere [5]. Vi har yderligere demonstreret ved hjælp af en mere konventionel elektronkilde, at vi efter at detektere det spontelektiske potential på den normale måde efterfølgende kan destruere det fuldstændigt ved at bruge kraftigere strømme af størrelsesordenen picoampere [6].

Spontelektrik repræsenterer et nyt fænomen i faststof-fysiken, og mange spørgsmål presser sig på, nøjagtig ligesom dengang, da rochellesalt (kaliumnatriumtartrat) blev undersøgt, og begrebet 'ferroelektrik' først kom til verden. Først og fremmest, hvad er egenskaberne ved de vekselvirkninger, der giver anledning til de stærke elektriske felter i materialerne, og hvordan kan disse vekselvirkninger studeres eksperimentalt? For det andet

kunne man spørge, hvilke klasser af materialer, der kan være spontelektriske? For det tredje, hvor fundamentale er spontelektriske fænomener? For det fjerde, er den spontelektriske effekt stabil? Og så videre...!

I vores simple eksperimenter kan vi kun variere temperaturen af substratet, som materialet bliver deponeret på, temperaturen efter deponeringen, tykkelsen af det dannede lag samt egenskaberne ved substratet. Hvordan kan vi fortsætte herfra? Vi benytter den sædvanlige taktik med at opstille en hypotese for derefter at teste denne. Vi kan altså bestræbe os på at bevise, at hypotesen ikke er forkert. Vores hypotese er, at den netto makroskopiske polarisation, som vi observerer i form af et elektrisk felt i de spontelektriske film, skyldes en delvis ensretning af dipolerne inde i filmen.

Vi fremtryller altså et ret kontraintuitivt billede af dipolære molekyler, der falder ud af gasfasen og kondenserer i konfigurationer, hvor de positive ender af dipolerne gennemsnitligt set ikke har den store modvilje mod at sidde tæt på andre positive ender. Man ville naturligvis forvente, at de positive ender ville blive tiltrukket af de negative ender og dermed gennemsnitligt set befinde sig tættere på disse. Ikke desto mindre er denne kontraintuitive konfiguration essentiel for at skabe den orden i systemet, der leder til ensretning af dipolerne.

På nuværende tidspunkt vil vi introducere begrebet graden af dipolensretning. Hvis vi betragter en enkel dipol i det faste stof, vil denne dipol pege i en bestemt retning. Vi definerer graden af dipolensretning som gennemsnittet af den komponent af dipolen, som peger i samme retning som det målte elektriske felt (z-retningen), delt med det totale dipolmoment af molekylet. Denne definition er dog problematisk. For står dipolen og blaffer i vinden, så at sige, eller er dens retning fikseret? Hvis det første er tilfældet, skal vi tage gennemsnittet for en vilkårlig dipol over et langt tidsrum, mens hvis det andet er tilfældet, vil det være korrekt at midle over et stort antal dipoler, der hver især har en fast retning. Vi ved endnu ikke, om det rigtige svar er at tage et gennemsnit over tiden eller over rummet. Derfor vælger vi i øjeblikket ikke at skelne mellem disse to gennemsnit. Det er ikke fordi, vi er ligeglade, men simpelthen fordi vi ikke ved det på nuværende tidspunkt. For at finde svaret er der planlagt eksperimenter, der benytter røntgenkrystallografi- og neutronspreddningsteknikker.

Under alle omstændigheder, hvis dipoler er ordnede til en vis grad, vil de skabe en makroskopisk polarisering og et dertilhørende elektrisk felt. Her slutter historien dog ikke. En afgørende pointe er, at det elektriske felt, der forårsages af ordningen af dipolerne, vil skabe et felt, der igen vil medvirke til at ensrette dipolerne. Der er altså en positiv feedback-mekanisme i systemet: jo mere ensretning, jo stærkere felt, jo mere ensretning, osv.. Et karakteristisk træk ved sådanne feedback-systemer er, at små naturlige fluktuationer spontant kan skabe orden i et oprindeligt uordnet system. Et velkendt eksempel på dette fænomen er gaslaseren. I en gaslaser bliver en udladning uden nogen orden forvandlet til

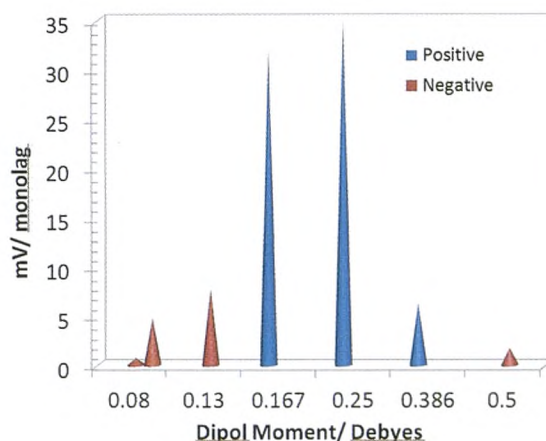
et system med stærk orden gennem feedback i form af stimuleret emission i en optisk kavitet. På samme måde kan et uordnet system her opnå makroskopisk orden, ved at dipoler taler sammen og vekselvirker over, effektivt set, uendeligt lange afstande gennem et selvgenereret elektrisk felt. Dette må være forklaringen på, hvorfor film uden videre kan blive spontelektriske.

I forbindelse med spontelektrikas basale fysik skal det nævnes, at faste stoffer, der polariserer spontant, har været kendt i mange år. Der eksisterer mange klasser af organiske og inorganiske ferroelektriske materialer, som har været studeret i stor detalje, og som udviser spontan polarisation ved hjælp af dipolensretning [9]. Spontan polarisation i alle andre materialer end spontelektrika opstår imidlertid som en bivirkning af molekylernes dipolære opførsel (se fx [10]). I kontrast hertil er den spontelektriske effekt fundamentalt afhængig af, at molekylerne i materialet er dipolære: hele showet er dikteret af dipol-dipol-vekselvirkninger, og at det resulterende elektriske felt vekselvirker med dipolerne.

Vi kan ud fra ovennævnte kvalitative ideer bygge en simpel teori, som bliver beskrevet nedenfor, og som kan bruges til at teste vores hypotese omkring dipolensretning. Først skal vi dog bruge flere data. Det eneste, I har læst indtil videre, er, at der kan opstå kraftige elektriske felter i lattergasfilm.

Egenskaber af spontelektrika

Hvis vi igen ser på boks 1, er det klart, at det er et meget bredt udvalg af materialer, der besidder spontelektriske egenskaber. Dog udviser hvert materiale en karakteristisk opførsel med hensyn til effektens styrke, afhængigheden af deponeringstemperaturen og Curie-temperaturen (se nedenfor).



Figur 2. Styrken af det elektriske felt udtrykt ved hjælp af ændringen i overfladepotentialet i mV ved tilføjelse af et enkelt monolag deponeret på amorf guld ved en temperatur på 40 kelvin. 0,08 Debye refererer til propan, 0,13 til isopentan, 0,167 til N₂O, 0,25 til isopren, 0,386 til toluen og 0,5 til freon 11.

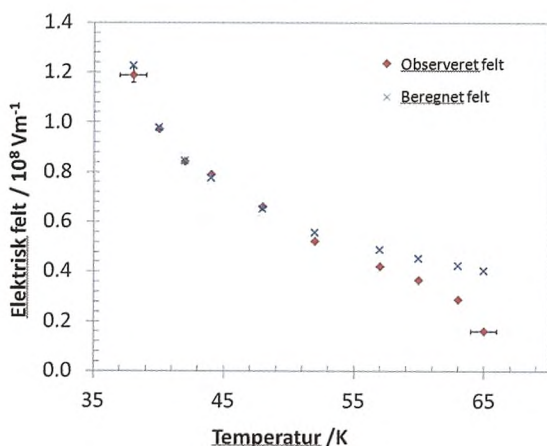
Styrken af effekten er vist for en række materialer i figur 2. Figuren viser også, at nogle materialer skaber en positiv spænding henover filmen, mens andre har et elektrisk felt, der peger i den modsatte retning svarende

til en negativ spænding. Der er på nuværende tidspunkt ingen tilfredsstillende forklaring på, hvorfor de enkelte systemer udviser positive eller negative spændinger. Fortegnet på spændingen kunne være relateret til bindingen af de første få monolag af materialet til guldsustratet. Det forbliver derfor endnu en interessant gåde i forbindelse med spontelektrika.

Boks 1 og figur 2 leder til endnu et spørgsmål. Er der visse materialer, som *ikke* er spontelektriske? Svaret er ja. Vandis er ikke spontelektrisk, i hvert fald ikke under de betingelser, hvor vi har studeret den [8]. En sandsynlig forklaring på dette er, at strukturen af amorf vandis er et stærkt tre-dimensionelt netværk, som er holdt sammen af hydrogenbindinger, mens bidraget fra vekselvirkninger mellem dipoler er relativt lille.

Det viser sig også, at film af karbonylsulfid (OCS) og methylklorid heller ikke er spontelektriske, når deponeret ved 40K. I disse systemer virker det til, at tendensen til at sidde hoved-til-hale, altså positiv ende mod negativ ende, er for stærk til at blive overvundet af fluktuationer og feedback-mekanismen beskrevet ovenfor.

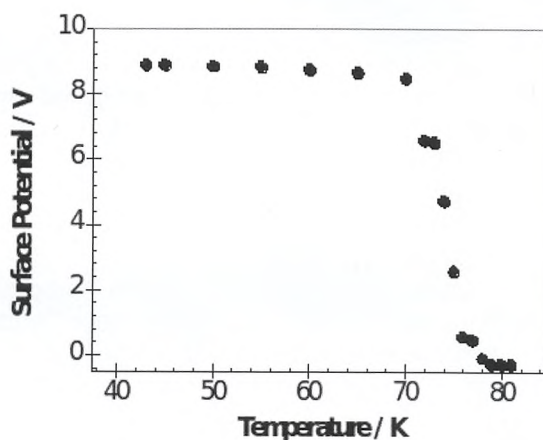
Vi har beskrevet, at spontelektrika opnår orden gennem dipol-dipol-vekselvirkninger med feedback medieret af det elektriske felt. Feedbacken bliver svækket af tilfældige termiske fluktuationer, som enten er fordelt i rummet eller associeret med en enkel dipol. Derfor, jo højere temperaturen er, jo mindre er graden af ensretning, og des mindre er det elektriske felt. Men holder denne konklusion? Ja, hvis vi med temperatur mener deponeringstemperaturen. Dette er vist i figur 3 for N_2O .



Figur 3. Observerede elektriske felter for N_2O (rød) og de beregnede værdier (blå) som funktion af temperaturen, som filmene blev deponeret ved. Parametrene, som hører til fittet, der giver de beregnede værdier, er $\langle E_{\text{sym}} \rangle = (5,4 \pm 0,2) \cdot 10^8 \text{ V/m}$, $\langle E_{\text{asym}} \rangle = (8,2 \pm 0,3) \cdot 10^8 \text{ V/m}$ og $\zeta = 44 \pm 3$ (se ligning (1)). For eksempel ved 40 kelvin er den symmetriske del af feltet $1,27 \cdot 10^9 \text{ V/m}$ (hele første led i ligning (1)), mens den asymmetriske del er $1,02 \cdot 10^8 \text{ V/m}$ (andet led i ligning (1)) og svarer til det observerede felt.

Hvis man imidlertid lægger et monolag ved 40 kelvin og derefter varmer det op, låser feedbacken i systemet tilsyneladende dipolerne på deres faste pladser, så det elektriske felt i systemet er uændret. Men ved

en karakteristisk temperatur vil overfladespændingen dog hastigt aftage ved en opvarmning på blot 1-2 kelvin, og den spontelektriske effekt vil forsvinde hvis temperaturen hæves bare nogle få Kelvin. I analogi med ferromagnetismen, svarer denne temperatur til Curie-punktet. Når temperaturen er under den ved Curie-punktet, er strukturen af ensrettede dipoler øjensynligt meget rigidt og forbliver på plads på trods af den betydelige elektromekaniske spænding, dette må forårsage. Dinitrogenoxid fordampes ved Curie-punktet, men en fuld demonstration af Curie-effekten kan ses i målingerne vist på figur 4 for isopren. Som man kan se, forbliver overfladepotentialet stort set konstant mellem 40 kelvin og 70 kelvin for derefter hurtigt at aftage til nul mellem 70 kelvin og 75 kelvin.



Figur 4. Variationen i overfladepotentialet for en isopren-film med 300 monolag deponeret ved 40 kelvin og derefter varmet op til 82 kelvin, der viser tilstedeværelsen af et Curie-punkt. Den eksperimentelle usikkerhed er 2-3 mV på potentialet og 1 kelvin på temperaturen.

Før vi går videre til at teste vores hypotese om dipolensretning kvantitativt, vil vi nævne en sidste egenskab ved spontelektrika. Effekten er uafhængig af det underliggende substrats natur. For at vise dette, blev en række heterostrukturer præpareret, hvor fx 50 monolag af xenon blev deponeret på guldoverfladen ved 58 kelvin. Derefter blev N_2O deponeret ovenpå ved samme temperatur. Der blev ikke observeret nogen målbar forskel i overfladepotentialet i forhold til rene N_2O -film deponeret ved 58 kelvin. Det vil sige, at substrater så forskellige som xenon og guld giver anledning til samme grad af dipolensretning. Konklusionen er klar: Vi har, som foreslået ovenfor, med en makroskopisk 'bulk'-effekt at gøre.

For at opsummere, har vi altså at gøre med et ikke-lokalt system med feedback, og al viden om begyndelsesbetingelser går tabt over korte afstande sammenlignet med den totale tykkelse af filmen. Systemet er ensartet stort set henover hele sin udstrækning og er fastlåst i en rigid konfiguration, som kun kan ødelægges af en kraftig perturbation såsom opvarmning til Curie-temperaturen.

En model for spontelektrika

Vi vil nu gerne undersøge *kvantitativt*, hvorvidt en model for dipolensretning kan forklare vores observationer. Modellen er semi-empirisk og ikke *ab initio*, og vil derfor indeholde fitteparametre. Vi koncentrerer os om at reproducere den observerede variation af det elektriske felt med temperaturen, som vist i figur 3.

Det grundlæggende koncept er en dipol, som kan defineres som værende repræsentativ for hele sættet af dipoler i det pågældende medium. Denne gennemsnitlige dipol kan, som beskrevet ovenover, betragtes som enten et gennemsnit over et langt tidsinterval for en vilkårlig dipol, eller som et rumligt gennemsnit over et stort antal dipoler. Den gennemsnitlige dipol sidder i et gennemsnitligt lokalt elektrisk felt, det såkaldte 'lokale elektriske felt ved atomet', som er beskrevet i mange lærebøger om faststoffysik. Der er indtil videre intet usædvanligt i modellen bortset fra, at vi nu deler det elektriske felt op i en del, som dækker over dipol-dipol-vekselvirkninger, og en del, som beskriver alle de andre mere komplicerede vekselvirkninger. Den sidste del skulle i princippet beskrives ved hjælp af detaljerede kvantemekaniske beregninger, men her parametriserer vi blot systemet.

Vi beskriver filmen som liggende i xy -planen, som der er azimutalsymmetri omkring. Derfor betragter vi kun z -komponenten, E_z , af det lokale elektriske felt vinkelret på planen. Komponent E_z af det lokale felt er givet ved $\langle E_{\text{sym}} \rangle (1 + \zeta m^2)$, hvor $\langle E_{\text{sym}} \rangle$ indeholder alle komplikationerne med de molekylære vekselvirkninger, og $\langle E_{\text{sym}} \rangle \zeta m^2$ repræsenterer dipol-dipol-vekselvirkningerne. Her er $m = \langle \mu_z \rangle / \mu$ graden af dipolensretning, hvor μ er det molekylære dipolmoment, og ζ er en parameter. De kantede parenteser $\langle \dots \rangle$ betegner middelværdier. $\langle E_{\text{sym}} \rangle$ er navngivet 'sym', fordi det er symmetrisk omkring $-z$ - og $+z$ -retningerne. For eksempel, hvis vi tager en xenonfilm, vil der være et lokalt felt ved hvert atom, men ingen *netto* felt i z -retningen, dvs. at den vil være upolariseret. I dette tilfælde er E_z blot lig med $\langle E_{\text{sym}} \rangle$, fordi der ikke er permanente dipoler i xenon.

For at danne et netto-felt som gennemtrænger hele mediet, hvilket er, hvad vi observerer, skal vi bryde symmetrien mellem $+z$ - og $-z$ -retningerne. Så vi introducerer en parameter $\langle E_{\text{asym}} \rangle$, som bryder symmetrien i z -retningen, men ikke i xy -planen. E_z er nu givet ved

$$E_z = \langle E_{\text{sym}} \rangle (1 + \zeta m^2) - \langle E_{\text{asym}} \rangle m. \quad (1)$$

Vi kan se, at det symmetriske og det asymmetriske led er adskilt af et minus. Det er fordi, at det symmetriske led involverer vekselvirkninger, som forsøger at holde de positive dipoler tæt på de negative, mens det andet led bidrager, når ender med ens fortegn er tæt på hinanden.

Vores mål er at reproducere variationen af m med temperaturen, men vi har endnu ikke introduceret en temperatur i modellen. Det gør vi ved at bruge almindelig termodynamik til at estimere graden af ensretning af en gruppe dipoler i et elektrisk felt. Den elektriske

energi er $E_z \langle \mu_z \rangle$, mens den termiske energi er $k_B T$, hvor k_B er Boltzmanns konstant, og T er temperaturen. Det blev vist af Langevin i 1905, at

$$m = \coth(E_z \mu / k_B T) - (k_B T / E_z \mu). \quad (2)$$

Hvis vi nu indsætter udtrykket for E_z , ligning (1), ind i denne ligning, får vi et dejligt, uløseligt problem. Graden af dipolensretning afhænger af sig selv inde i en hyperbolsk cotangens-funktion. Så man vælger at lede efter selvkonsistens mellem de to sider af den fremkomne ligning ved at iterere sig frem til m som funktion af T , mens man bruger $\langle E_{\text{sym}} \rangle$, $\langle E_{\text{asym}} \rangle$ og ζ som justerbare parametre.

Vi mangler dog stadig noget. Vi har målt det elektriske felt som vist i figur 3, mens teorien forudsiger graden af dipolensretning m . Det observerede elektriske felt, E_{obs} , kan dog bruges til at beregne m . Elektrostatik fortæller os, at $m = \langle \mu_z \rangle / \mu = \epsilon_0 E_{\text{obs}} \Omega / \mu$, hvor ϵ_0 er den elektriske permittivitet i vakuum, og Ω er volumet af molekylet (fx $3,779 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$ for N_2O). Det observerede felt kan også skrives som $E_{\text{obs}} = \langle E_{\text{asym}} \rangle m$. Bemærk at værdierne for $\langle \mu_z \rangle / \mu$ er ret lave, typisk ikke højere end 10-15 % og ofte betragteligt lavere. Man bør derfor forestille sig, at dipolerne kun har en svag tendens til gennemsnitligt set at pege i z -retningen. Det er altså ikke sådan, at dipolerne står på rad og række som Den Kongelige Livgarde.

Det skal også tilføjes, at dipolmomentet μ repræsenterer det totale dipolmoment for et molekyle i et fast stof. Når molekylerne er tæt på hinanden, kan de polarisere hinanden, og værdien af μ er derfor væsentligt mindre end den tilsvarende værdi af dipolmomentet for molekyler i gasser. For N_2O er gasfasedipolmomentet 0,166 Debye (eller $5,54 \cdot 10^{-31} \text{ C m}$), mens dipolmomentet for dinitrogenoxid på fast form kan estimeres til at være 0,0785 Debye.

De blå krydser i figur 3 viser resultatet af et fit, som er fremkommet ved at bruge data mellem 38 kelvin og 57 kelvin. Datapunkter ved højere temperaturer er blevet udeladt, fordi disse er tæt på fordampningstemperaturen for N_2O , hvor fluktuationerne i den gennemsnitlige værdi for dipolensretningen er så store, at det ikke længere giver så meget mening at betragte middelværdier.

Vi har på nuværende tidspunkt data, en teori, og vi kan reproducere et afgørende aspekt ved disse data ved hjælp af dipolensretningsmodellen. Vi konkluderer derfor forsigtigt, at modellen ikke er fuldstændig ukorrekt.

En anvendelse af spontelektrika: kvantebrønde

Nogle læsere har formentlig stiftet bekendtskab med kvantemekanik på et tidspunkt i deres liv. Disse kan muligvis huske 'elektron i en kasse'-problemet. Her er kassen et potential, en såkaldt kvantebrønd. Denne afgrænser elektronen til et lille område på få nanometer i en dimension med det resultat, at elektronens energiniveauer er kvantiserede. Sådanne nanobrønde kan for eksempel bruges til at lave faststoflasere som dem i laserpointere.

Idéen er, at det skulle være muligt at skræddersy et vilkårligt sæt af potentialer ved at deponere film på toppen af hinanden og derved kombinere film til at danne en heterostruktur. Man kunne derfor naivt forestille sig, at man kunne skabe en kvantebrønd ved at sammensætte film, der har et positivt overfladepotential, med dem, der har et negativt overfladepotential. Overraskende nok ser denne enkle opskrift til at virke som forudset. En film af N_2O med 33 monolag og en tykkelse på ca. 10 nm deponeret ved 40 kelvin resulterer i et overfladepotential på 800 mV. Lag af isopentan blev derefter gradvist deponeret på toppen af N_2O , og potentialets gradvise reduktion til nul kunne følges. Overfladepotentialet blev nul efter addition af 183 monolag isopentan, et tal som kunne forudsiges direkte ud fra egenskaberne af de enkelte isopentanlag. Dette resultat understreger vores tidligere bemærkninger omkring effektens uafhængighed af det underliggende substrat. Vi havde altså skabt en trekantet, asymmetrisk brønd med en dybde på 800 mV. Det skal bemærkes, at N_2O /isopentan-systemet er ikke det eneste, der udviser sådan en opførsel. Vi har for nylig skabt otte lag af N_2O/CF_2Cl_2 , der former en lille kæde af fire kvantebrønde. Den praktiske anvendelse af sådanne kvantebrønde er dog endnu uvist.

Spontelektrikas fremtid

Fremtiden er todelt. For det første er der den nye fysik. For det andet er der anvendelserne af de nye, usædvanlige egenskaber, som er blevet opdaget.

Den nye fysik vil involvere forståelsen af den fysiske natur af filmene: står dipolerne og 'blaffer i vinden', eller er de hver især frosset fast i et næsten, men ikke helt, tilfældigt gitter? Det kunne også være oplysende af udføre molekylær-dynamik-simuleringer af kondenseringsprocessen. Hvilken slags dans udfører det dipolære molekyle, mens det lander på en fast overflade bestående af de selvsamme molekyler? Kan man 'se' dipolensretning ske helt nede på det molekylære niveau? Man kunne også håbe på at observere dette eksperimentelt med et atomic-force-mikroskop, som i princippet tillader at visualisere, hvordan lagene akkumulerer molekyle for molekyle.

Anvendelserne forbliver endnu ude i fremtiden. Mulighederne er dog mange, siden spontelektrika repræsenterer formationen af spontant polariserede tynde film med en relativ uniform tykkelse ved hjælp af simpel dampdeponering. Spontelektrika kan muligvis resultere i nye elektronlitografiteknikker og forbedrede skærme, der benytter felleffektristorer. Man kan også forestille sig, at spontelektriske materialer kunne bruges til at lave mere effektive fotovoltaiske celler med højere spænding, og anvendes mere generelt i nano-xerografi.

Spontelektrika kan i princippet bane vej for en helt ny type teknologi.

I øjeblikket fortsætter eksperimenterne med det eksperimentelle system med kolde elektroner (figur 1) for at fastlægge spontelektrikas egenskaber. Hver gang vi kaster os ud i en ny serie undersøgelser, dukker der kvalitativt nye resultater op. Vi er derfor stadig i en periode, hvor vi afdækker de nye, grundlæggende egenskaber ved spontelektrika.

Tak til

Vi er taknemmelige for H.C. Fogedbys og A. Svanes hjælp med at formulere den teori, der er blevet præsenteret. Artiklen er oversat fra engelsk af ph.d. Natalia Golubeva, Aarhus Universitet og medlem af Kvant-redaktionen.

Litteratur

- [1] D. Field, J.P. Ziesel, P.M. Guyon, T.R. Govers (1984), *Journal of Physics B: At. Mol. Phys.*, vol. **17**, 4565
- [2] S.V. Hoffmann, S.L. Lunt, N.C. Jones, D. Field, J.-P. Ziesel (2002), *Review of Scientific Instruments*, vol. **73**, 4157
- [3] M. Sulc, R. Curik, J. P. Ziesel, N. C. Jones, D. Field (2011), *Journal of Physics B: At. Mol. Opt. Phys.*, vol. **44**, 195204
- [4] R. Balog, P. Cicman, N.C. Jones, D. Field (2009), *Physical Review Letters*, vol. **102**, 073003
- [5] A. D. Bass, L. Sanche (1991), *Journal of Chemical Physics*, vol. **95**, 2910
- [6] O. Plekan, A. Cassidy, R. Balog, N.C. Jones, D. Field (2011), *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. **13**, 21035
- [7] Yuhuan Xu, J.D. Mackenzie (1999), *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. **246**, 13
- [8] R. Balog, P. Cicman, D. Field, L. Feketeova, K. Hoydalsvik (2011), *Journal of Physical Chemistry A*, vol. **115**, 6820
- [9] S. Horuchi, Y. Tokura (2008), *Nature Materials*, vol. **7**, 357
- [10] J. Kroupa, P. Vanek, R. Krupkova, Z. Zikmund (1997), *Ferroelectrics*, vol. **202**, 229



David Field er forskningsdirektør ved *Institute for Storage Ring Facilities* ved Aarhus Universitet, hvor lagringen ASTRID har til huse. Hans nuværende interesser er delt mellem den eksperimentelle fysik beskrevet her, observationel astronomi i både radio- og infrarødområdet og forbindelsen mellem disse to forskningsområder.

Aktuelle bøger

Af Finn Berg Rasmussen og Michael Cramer Andersen

Fængende videnskabshistorie

Af: *Hubert Mania*, "Kædereaktion – historien om atombombens tilblivelse", Informations Forlag 2012, 332 sider, 299 kr., <http://www.informationsforlag.dk>.

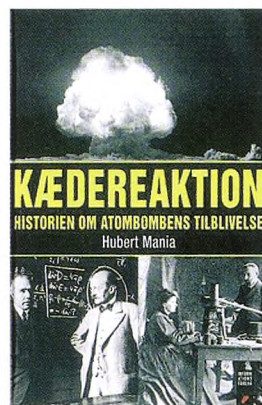
Historien om atombombens tilblivelse er blevet fortalt mange gange før, og denne version vil ikke få rollen som den endegyldige historie. Men der er tale om en meget underholdende bog, som starter med opdagelsen af uran (1789, i Berlin) og slutter ved projekt "Trinity", dvs afprøvningen af den første fissionsbombe (1945, i Alamogordo-ørkenen i New Mexico, USA). Bogens titel har en dobbelt betydning, idet forfatteren ser hele dens udvikling som en kædereaktion.

Hovedvægten ligger på de implicerede forskere og deres indbyrdes forhold og, for nogle få, deres personlige baggrund. Her kommer mange interessante og overraskende historier frem. Der er ca. 130 litteraturhenvisninger, men det drejer sig helt overvejende om andenhånds kilder: biografier og populærvidenskabelige bøger. Et komplet personregister kan bruges som en nyttig indgang til litteratur om de enkelte forskere. Forfatteren (født 1954) er hverken professionel historiker eller professionel fysiker, men har tidligere skrevet bøger om Gauss og om Stephen Hawking. De fysiske forklaringer forekommer ofte ufuldstændige og er undertiden fejlagtige i detaljen, men de giver alligevel et godt indtryk af de problemer, der skulle løses.

Selv om forfatteren er tysker, lægger han ikke fingrene imellem i skildringer af Nazi-styrets racevanvid, som resulterede i, at der – som et af de mindre onder kan man roligt sige – ikke måtte undervises i "jødisk fysik": relativitetsteori og kvantemekanik. Han er ligeledes åbenhjertig om en vis rivalisering mellem de tyske fysikere, som sinkede det tyske uranprojekt. Således blev Werner Heisenberg i årene 1935-1937 som en af kvantemekanikkens fædre og tilhænger af "einsteinismen" angrebet meget voldsomt af regeringstro kolleger, især J. Stark. Ifølge Manias fremstilling slap Heisenberg kun helskindet over dette næsten livsfarlige angreb, fordi hans moder kendte moderen til SS-chefen Heinrich Himmler og gennem hende kunne formidle et krav fra Heisenberg om at blive rensset for anklagerne.

Det er skrækindjagende at læse, hvor tidligt forskere hos begge verdenskrigens parter var opmærksomme på den teoretiske mulighed af en uranbombe. Men som bekendt havde kun USA de industrielle og videnskabelige muskler til at realisere idéen. Ifølge Mania var Manhattan-projektet (bogen forklarer dette og andre kodenavne) på sit højeste mere omfattende end den amerikanske bilindustri.

Finn Berg Rasmussen



Opdateret astronomibog til gymnasiet

Af: *Helle Stub og Henrik Stub*, "Det levende univers", ny udgave, Nyt Teknisk Forlag 2012, 260 sider, 349,95 kr., http://www.nyttf.dk/levende_univers.

Denne bog er en ny og opdateret udgave af Helle og Henrik Stubs bog til undervisningen i astronomi i gymnasiet. Den udkom første gang i 2001 og blev tilpasset gymnasiereformen i 2005. Som de skriver i forordet, sker der hele tiden en rivende udvikling indenfor astronomien, hvilket kræver opdateret undervisningsmateriale. Man kan finde meget information på internettet, men det er bedst at have en grundbog, der giver overblik og en pædagogisk indføring i fagets grundlæggende begreber og metoder. Den nye udgave har bevaret de mange gode illustrationer, der viser hvordan astronomerne ved snedig analyse af lyset fra himmellegemerne og matematiske modeller kan regne de mest utrolige størrelser ud om himmelobjekterne.

Vi får først placeret Jorden i forhold til de andre planeter i Solsystemet og vores galakse Mælkevejen i forhold til resten af det synlige univers. Over et par sider opsummeres astronomiens historie, så vi får højdepunkterne på plads og beskrevet nogle af de moderne teknikker der anvendes i astronomien. Igennem bogen beskrives en lang række emner, der tilsammen giver læseren et varieret og detaljeret overblik over moderne astronomi. Den nødvendige fysik introduceres og der er adskillige regneeksempler. På bogens hjemmeside (se ovenfor) findes 28 sider med opgaver. Bogen vil være til stor nytte for enhver astronomiinteresseret, som ønsker lidt mere end en populær fremstilling, hvor resultaterne må tages for troende. Forfatterne har mange års erfaring i både undervisning og formidling og en stor styrke ved bogen er, at den ofte fortæller de spændende opdagelseshistorier og elegant fører læseren frem til overkommelige beregninger, der demonstrerer hvordan astronomerne er kommet frem til deres resultater.

Michael Cramer Andersen

Nanodiamanter bærer vidnesbyrd

KLIMAFYSIK. For 13.000 år siden – hvilket var lang tid efter afslutningen af den sidste istid – kom der en kuldeperiode på tusind år. Temperaturfaldet på op til 10 grader skete abrupt – nogle år eller måske blot få måneder. Forskere har ikke hidtil kunnet blive enige om årsagen. Der argumenteres for, at det var havsstrømmene i Atlanterhavet (f.eks. golfstrømmen), som blev “afbrudt”.

En anden hypotese/teori er, at afkølingen var resultat af et asteroide-nedslag et sted i Nordamerika. Asteroiden har måske haft en diameter på et par hundrede meter. Der er flere steder i Nordamerika fundet bittesmå kugler af smeltet materiale og nanodiamanter i geologiske formationer, som anslås at være 13.000 år gamle. Nu er nanodiamanter ikke nødvendigvis ens, fordi de benævnes på samme måde.



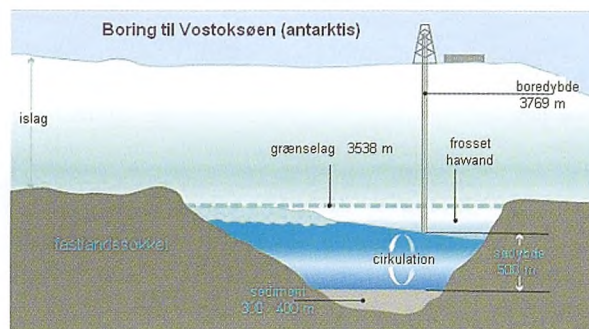
På bunden af Cuitzeo-søen (se billede) finder man et sediment, som også rummer materiale, som er 13.000 år gammelt. Forskerne har her fundet en speciel form for nanodiamanter, Lonsdaleit. Sådanne dannes kun ved chokprocesser, hvor temperaturen bliver høj og trykket stort. Da denne diamanttype ikke dannes af vulkaner og andre sædvanlige naturlige processer, er det vel rimeligt at pege på et asteroide-nedslag som årsag.

Kilder: “Evidence from central Mexico supporting the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis”; Isabel Israde-Alcántara et al.; *Proceedings of the National Academy of Science*, 2012.

Nærkontakt med Vostok-søen

GEOFYSIK. Det har længe været kendt, at der under isen på Antarktis findes flere store søer med ferskvand. Den største af disse hidtil kendte er Vostok-søen, som er 230 km lang, 50 km bred og op til 500 m dyb. Over søen finder man is med en tykkelse på 3-4 km, så det er ikke så ligetil at få kontakt med Vostok-søen. Forskergrupper i flere lande har beskæftiget sig med spørgsmål om biologi og geologi forbundet med søen. Før man kan svare på disse, må man kunne anbringe instrumenter nede i søen. På papiret en let opgave: Vi borer et hul gennem isen! Som de første lykkedes det russiske forsker-/bore-hold at få hul igennem, men det tog vel et par årtier, fra de første idéer udklækkedes, til målet blev nået. Det er kun muligt at lave udendørs arbejde på Sydpolen i sommersæsonen (dec.-jan.). I vintersæsonen kan termometeret krybe under -80°C . Hertil kommer en række praktiske problemer, som f.eks. transport af materiel

fra kysten ind til midt på isen. At bore et hul i is på 4 km er vel stadig lidt af en bedrift.



Vostok-søen er den største, men absolut ikke den eneste af den art på Antarktis. På nuværende tidspunkt har forskerne kendskab til mere end 350. Mange af disse antages at have forbindelse/kanaler med hinanden, så vand kan udveksles. Et engelsk team har således kig på “Lake Ellsworth”, som nok får nærkontakt dec. 2012.

Som geografisk/geologisk størrelse anser forskere Vostok-søen for at være 15 mio. år gammel. Indholdet i søen er dog ikke isoleret fra omverden. For øjeblikket regner forskerne med, at vandet udskiftes i løbet af 30.000 år. Hvorvidt dette påvirker det, der umiddelbart fremstår som et isoleret økosystem, vil forskerne fortælle i de kommende år.

Venus snurrer langsommere

PLANETFYSIK. Ved at sammenligne opmålte kort over Venus hidrørende fra sonden MAGELLAN (1990-1992) med dem fra Venus Express (2006-2008) fandt man afvigelser på op til 20 km. Det var ikke, som man først troede, regne-/kalibreringsfejl, men fordi Venus roterede langsommere. Over 16 år var omdrejningstiden blevet forlænget med 6,5 minut.

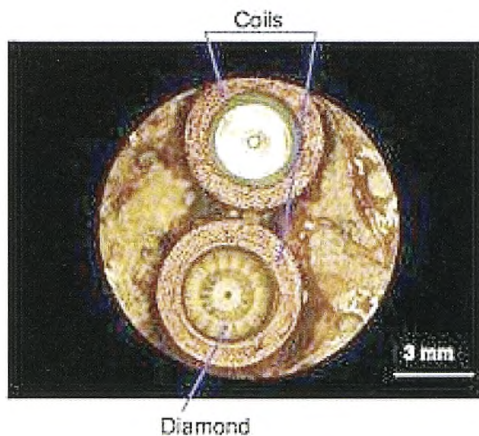


I en astronomisk sammenhæng er dette en stor ændring. Til sammenligning kan nævnes, at Jordens omdrejnings-hastighed i løbet af ét år (pga. vinde, ebbe og flod m.m.) kan variere nogle ms. Sådanne fluktuationer vil imidlertid udjævnes over nogle år. På Venus synes forandringen at akkumuleres fra år til år. Måske er dette blot et udsnit af en proces med meget lang periodetid 10 til 50 år. Forskerne kan ikke give noget klart svar, så de er gået i tænkeboksen.

Kilder: Rotation period of Venus estimated from Venus Express VIRTIS Images and Magellan altimetry; N. T. Mueller et al.; *Icarus* 2012.

Superleder påvirkes af tryk

FASTSTOFFYSIK. Opdagelsen af, at jern-chalkogenider kunne være superledende, skete for 4-5 år siden. Der er tale om en krystallinsk forbindelse, der bl.a. indeholder jern, selen og rubidium. Overgangstemperaturen i en version ligger på 33 K. Forskere fra Kina og USA har sammen arbejdet med den nye superleder og herunder udsat den for varierende tryk.



opstilling med superleder

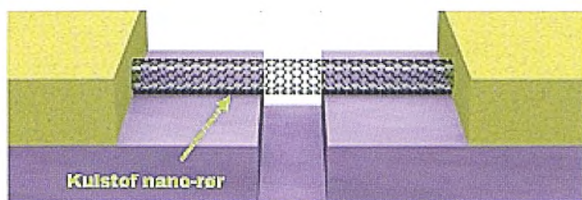
Ved normaltryk (1 atm) er tærskeltemperaturen for overgang til superledende tilstand 33 K. Med prøven i en diamant-trykcelle registrerede forskerne, at den superledende tilstand forsvandt ved et tryk på 9 GPa (90.000 atm). Forskerne øgede trykket og oplevede, at den superledende tilstand kom igen ved 13 GPa. De gned sig i øjnene, for der måtte vist være tale om en fejl. Mange forsøg senere havde de fået dokumentation for, at ikke blot vendte den superledende tilstand tilbage, men tærskeltemperaturen var tillige blevet højere, fra 33 K til 48 K!

Forskerne kan ikke umiddelbart tilbyde en forklaring på fænomenet. De håber på, at målinger med neutrondiffraction kan afklare, om trykket påvirker selve krystalstrukturen i superlederen.

Kilde: "Re-emerging superconductivity at 48 kelvin in iron-chalcogenides"; Liling Sun et al.; *Nature*.

Vægt afslører protons tilstedeværelse

NANOFYSIK. En vægt, som forskerne meddeler har en opløsningsevne svarende til vægten af en proton (angives i artiklen til 1,7 yoctogram), har set dagens lys i Barcelona.



Måleprincippet er baseret på, at en svingende streng ændrer resonansfrekvens, når strengen tilføres en ekstra masse. Den svingende streng er i dette tilfælde et kulstof nano-rør med en længde på 150 nm.

Vægten blev afprøvet ved, under vakuum, at lade et Xenon-atom "fortætte" på kulstof-rørets stærkt afkølede overflade. Frekvensændringen, som denne masseforøgelse gav anledning til, oplyses at være ca. 2 GHz.

Kilde: "A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution", J. Chaste et al.; *Nature Nanotechnology* 2012.

Nyt om Merkur fra MESSENGER

PLANETFYSIK. Rumsonden MESSENGER har cirklet rundt om Merkur i mere end ét år. Bearbejdede måleresultater er begyndt at vise sig. Målinger af gravitationsfeltets styrke er brugt til at beregne, hvordan Merkurs indre kan være opbygget. Beregningerne giver som resultat, at Merkurs kerne af jern er større end før antaget. Jernkernens radius er 85 % af Merkurs radius. Jernkernen er omgivet af en tynd skorpe/skal af jernsulfid. I dette forhold finder forskerne en forklaring på, at Merkurs skorpe rummer meget svovl, men lidt jern. En laser-højdemåler er brugt til topografiske undersøgelser. Forskerne mener ud fra målingerne, at Merkur i sin ungdom havde en del vulkanisme og tektoniske bevægelser i planetens overflade. Det sidste ord er næppe sagt om den sag.



Kilde: "Gravity Field and Internal Structure of Mercury from MESSENGER"; David E. Smith et al.; *Science* 2012; "Topography of the Northern Hemisphere of Mercury from MESSENGER Laser Altimetry", Maria T. Zuber; *Science* 2012.

Støvring omkring stjernen Fomalhaut

PLANETFYSIK. ALMA (Atacama Large Millimeter Array) i Chile er endnu ikke bygget færdig, men alligevel lykkedes det nogle forskere at lave interessante målinger med udstyret. Deres opmærksomhed var rettet mod stjernen Fomalhaut, som befinder sig 25 lysår fra Jorden. Stjernen er omgivet af en støvring, som både udadtil og indadtil er skarpt afgrænset. To planeter bevæger sig langs støvgrænsen hhv. indenfor og udenfor. Sammenligning af computersimulationer med ALMA-data gav anledning til at konkludere, at de to planeter var større end Mars, men maksimalt et par gange større end jorden.



I 2008 kunne Hubble-teleskopet indfange den inderste planet, men billedet blev fortolket sådan, at den var større end Saturn.

Hubble-teleskopet tager billeder med synligt lys, hvilket har den virkning, at også meget små støvkorn spredt lyset fra stjernen, og billedtegningen bliver derfor noget diffus.

ALMA opererer med radiobølger, hvorved støvkorn på under en millimeter nærmest bliver usynlige og derfor fremtræder støvringen meget skarpt i de færdige billeder.

Om selve støvringen vides, at afstanden mellem den inderste og yderste kant er 16 gange afstanden mellem Solen og Jorden. Afstanden fra stjernen til støvringen er tre gange afstanden mellem Solen og Pluto.

Kilde: "Constraining the Planetary System of Fomalhaut Using High-resolution ALMA Observations", A. C. Boley, M. J. Payne, S. Corder et al. *Astrophysical Journal Letters* 2012.



Stjernehimlen
den 15/6 kl. 1.00

Månens faser



12/5 21/5 28/5 4/6 11/6 19/6 27/6 3/7 11/7 19/7 26/7 2/8 9/8 17/8

På *morgenhimlen* ses Venus og Jupiter.
På *aftenhimlen* ses Merkur, Mars og Saturn.

Solsystemet ca. 15. juni

Kun planeter synlige med det blotte øje er vist nedenfor.
Udenom planetbanerne ses Dyrekredsens 12 stjernebilleder.
Den røde streg markerer Ekliptika - Solsystemets baneplan.

Astronomiske begivenheder

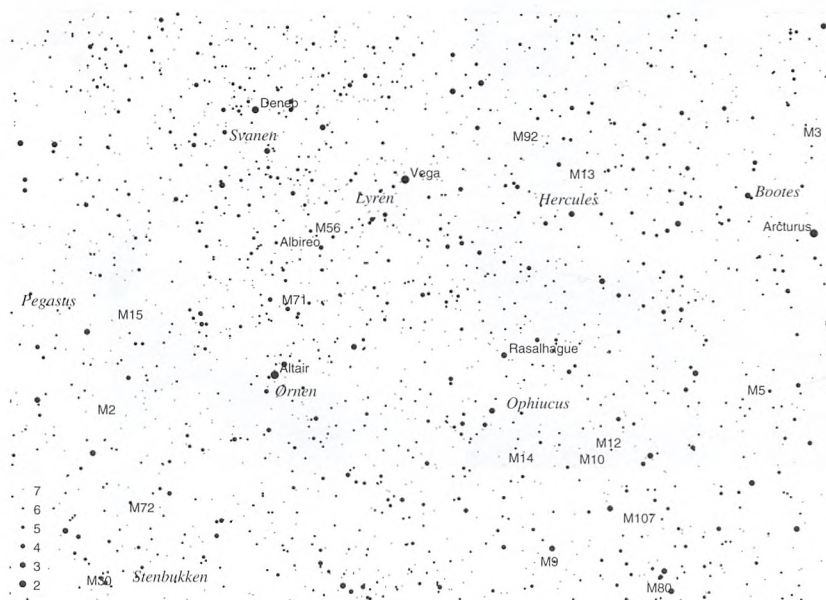
21/5 Ringformet solformørkelse (ikke synlig fra Danmark)
21/6 Sommersolhverv
5/7 Jorden fjernest Solen
12/8 Stjerneskydssværmen *Perseiderne* kulminerer.



Kugleformede stjernehobe

Af Michael Quaade, Astronomisk Selskab

I sommer- og efterårsmånederne vrir nattehimlen med kugleformede stjernehobe. Set gennem en stor astronomisk kikkert er kuglehobene blandt himlens smukkeste objekter.



Figur 1. Stjernerkortet viser et udsnit af himlen set mod syd i aftentimerne om efteråret. De klareste kugleformede stjernehobe er markeret med symbolet $\oplus$ og deres Messiernummer. Når der er særlig mange kugleformede hobe fremme på aftenhimlen i disse måneder er det fordi de er klumpet sammen omkring centrum af vores galakse, Mælkevejen. Mælkevejens centrum ligger i stjernebilledet *Skytten* som står på aftenhimlen helt nede i den sydlige horisont om sommeren og i det tidlige efterår. Skytten ligger i underkanten af kortet nær midten. Om foråret er Mælkevejens kerneområde ikke på himlen om natten og derfor ser vi kun ganske få kugleformede stjernehobe på den årstid. Stjernerkortet er lavet med XEphem programmet [6].

Det er slet ikke ualmindeligt at der er et par hundrede tusinde stjerner i en kugleformet hob. I de største f.eks. ω Centauri (se [1], s. 70), som ikke kan ses fra Danmark, er der flere millioner stjerner.



Figur 2. Messier 13 [5] i stjernebilledet *Hercules* er den klareste kugleformede stjernehob, vi kan se fra vores breddegrader. I en håndkikkert fremtræder hoben som en lille diffus klat, der danner en stumpvinklet trekant med to stjerner til venstre og under hoben. Den indeholder omkring en halv million stjerner. Billedet er sammensat af billeder fra Jorden optaget i 1990'erne og nyere optagelser fra Hubble rumteleskopet. Foto: Noel Carboni, NASA/Jet Propulsion Laboratory

Det samlede lys fra alle de stjerner får naturligvis hoben som helhed til at lyse kraftigt. Derfor kan vi se de kugleformede stjernehobe på meget store afstande – de er typisk adskillige tusinde lysår væk.

Kuglehobene er bestemt ikke ens, selv om de ved første øjekast ligner hinanden temmelig meget. Fælles for dem er, at stjernerne ligger i en kugleformet fordeling – de ser "runde" ud. I en hob som Messier 15, se [2], er stjernerne tydeligt mere klumpet sammen i midten af hoben end i f.eks. Messier 13 (se [1], s. 69). Messier 15 har gennemgået en proces, der i fagsproget kaldes et *core collapse*, som har ført til at stjernerne ligger meget tæt i hobens kerneområde og langt mere spredt i de ydre dele. Denne proces er resultatet af en kompliceret vekselvirkning mellem stjernernes indbyrdes tyngdekraft og deres individuelle hastigheder rundt i hoben [3].

Det tager lang tid for en kugleformet stjernehob at nå frem til et *core collapse*. Det går så langsomt, at det indtil i dag kun er sket for en femtedel af Mælkevejens omkring 150 kuglehobe – selv om de er blandt de allerældste objekter i universet. De er dannet nogenlunde samtidigt med Mælkevejen som helhed, for omkring 12 milliarder år siden. Dette stemmer overens

med modelberegninger, f.eks. [4], hvor det tager fra 8 til 17 milliarder år inden der finder et core collapse sted. Når vi observerer kuglehobenes forskellige udseende ser vi altså en igangværende proces, der tager så lang tid at Universet ikke har eksisteret længe nok til at den er forløbet til ende.



Figur 3. Messier 15 ses i stjernebilledet *Pegasus*. Den er et typisk eksempel på en hob, der har gennemgået et core collapse. Billedet er optaget med Hubble Rumteleskopet i april 2011. Foto: ESA, Hubble, NASA.

Litteratur

- [1] H. Nørgaard og J. Teuber (2012), Vores Kosmiske forbindelse, Gyldendal.
- [2] <http://www.spacetelescope.org/images/potw1107a>.
- [3] B.W. Murphy (1999), A Thousand Blazing Suns: The Inner Life of Globular Clusters, *Mercury*, **28:4**, 26.
- [4] B.W. Murphy og H.N. Cohn (1988), Realistic models for evolving globular clusters: core collapse with a mass spectrum, *MNRAS* **232** 835-852.
- [5] <http://apod.nasa.gov/apod/ap071115.html>.
- [6] <http://www.xephem.com>.
- [7] <http://www.spacetelescope.org/news/heic1205>.



Michael Quaade er formand for Astronomisk Selskab. Han er kandidat i fysik og astronomi fra Københavns Universitet. Har undervist i fysik, naturfag og astronomi på Rødovre Gymnasium og arbejdet som systemkonsulent hos TDC og Ericsson. Han er med i driften af Wieth-Knudsen Observatoriet i Tisvilde. Michael kan kontaktes på mq@astronomisk.dk.

Kapillarbølger – breddeopgave 49 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 to nye opgaver. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave (nr. 49 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 49. Kapillarbølger

For korte bølgelængder er det overfladespændingen mere end tyngdekraften, der er bestemmende for overfladebølgers opførsel. Hvordan afhænger udbredelseshastigheden af disse såkaldte kapillarbølger af deres bølgelængde? Begrund svaret.

Løsning

Overfladebølger er et bevægelsesfænomen, der grundlæggende er styret af Newtons anden lov. Opskrivning af masse gange acceleration må nødvendigvis inddrage

væskens massefylde ρ . Og i tilfældet kapillarbølger må kraftsiden af loven afhænge af væskens overfladespænding γ . Udover ρ og γ som inputvariable kan kapillarbølgerens udbredelseshastighed tænkes at afhænge af deres amplitude (en længde) og af deres bølgelængde λ . Grænsetilfældet, hvor amplituderne er små i forhold til bølgelængderne, kan derfor udregnes ved dimensionsanalyse med ρ , γ og λ som inputvariable. Idet $[\rho] = \text{M} \cdot \text{L}^{-3}$, $[\gamma] = \text{M} \cdot \text{T}^{-2}$ og $[\lambda] = \text{L}$ ses det, at

$$v = \text{tal} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \lambda}} \quad (1)$$

er den eneste mulige kombination af ρ , γ og λ til en størrelse med dimensionen fart. Svaret på opgaven er altså, at udbredelseshastigheden af kapillarbølger er omvendt proportional med kvadratroden af deres bølgelængder.

Kommentar

Hvor kraftsiden af Newtons anden lov for kapillarbølger afhænger af γ , afhænger den for tyngdebølger af tyngdefeltstyrken g . Herudover skulle man umiddelbart for tyngdebølger på dybt vand på samme måde som for kapillarbølger forvente, at deres fart afhænger af ρ , λ og deres amplitude. For grænsetilfældet, hvor amplituderne er små i forhold til bølgelængderne, giver dimensionsanalysen så:

$$v = \text{tal} \cdot \sqrt{g\lambda}. \quad (2)$$

For tyngdebølger er farten således alligevel uafhængig af ρ . Denne uafhængighed er generel for fænomener styret af specielt tyngdekrafter på kraftsiden af Newtons anden lov, fordi indgående masser netop da forkortes væk på de to sider af loven.

Vi har kunnet stille eksamensopgaven om kapillarbølger, fordi vi som noget nyt har indlagt en kursusgang i den forudgående undervisning om overfladespænding. Da overfladespænding spiller en vigtig rolle i både biofysiske og nanoteknologiske sammenhænge, har vi syntes at emnet hører med til en bred introduktion til fysik, den stigende fokus på biofysik og nanoteknologi taget i betragtning. Breddekurset (nu = Fysisk problemløsning I + Fysisk problemløsning II) på RUC er således udover at være rettet mod kompetencen fysisk problemløsning også pensumtænk.

Helt fra starten og ved den første eksamen i breddekurset sommeren 1976 har opgaverne så vidt muligt været formuleret i dagligdags sprog ud fra den opfattelse, at det væsentligste udbytte af fysikundervisning først opnås gennem opøvelsen af evnen til aktiv anvendelse af tillærte begreber og forståelsesmåder på ikke i forvejen velkendte eller tilrettelagte problemer. Forestillingen har været, at denne evne til aktiv begrebsanvendelse er af overgribende karakter i forhold til de enkelte fysikemner. Senere har breddekursets formål således været annonceret som et tilbud om at lære de studerende at tænke som fysikere, hvor indfrielsen af formålet ikke er bundet op på pensummet, men på måden der arbejdes med pensummet på. Med den seneste omdøbning af Breddekurset til Fysisk problemløsning (I og II) er det kompetencerettede i kurset yderligere understreget.

Men som opgaven her illustrerer, har og har kurset altid haft også en pensuminddækningsopgave. Kurset er det af kurserne på fysikuddannelsen på RUC, hvor der udover mekanik, termodynamik og statistisk mekanik, elektrodynamik og kvantemekanik dyrket i dybden i de øvrige kurser også bliver orienteret lidt om f.eks. relativitetsteori, hydrodynamik, geometrisk optik, astrofysik

og kernefysik blandt andre emner, der ikke tages op i de øvrige kurser, men af os regnes som noget en fysiker bør være orienteret i det mindste en smule om. Navnet "Breddekursus" refererede til denne funktion. Og nu har vi altså bredt os ud til også at inddrage overfladespænding i pensummet.

Jeg nævner disse RUC specifikke forhold som illustration til diskussionen om kompetence- versus pensumtænkning ved undervisningstilrettelæggelse. Forveksler man pensum med faglighed, og tror man, at tilrettelæggelse af undervisning er det samme som at fastlægge et pensum – så viser man efter min vurdering symptomer på pensumitis (jævnfør Jens Højgaard Jensen, Faglighed og pensumitis, Undervisningsministeriets tidsskrift Uddannelse, november 1995). Men at enøjet pensumdyrkelse er en sygdom betyder ikke, at pensum som sådant er noget sygt. Der er naturligvis ikke nogen modsætning imellem pensum som sådant og kompetenceorientering som sådan. Det ville – med et lån fra min kollega Mogens Niss – være som at modstille ordforråd og sprogbeherskelse. Uden ordforråd ingen sprogbeherskelse. Men sprogbeherskelse er meget mere end ordforråd. Den egentlige pædagogiske konflikt er derfor nærmere om ordforrådet tænkes udbygget forud for sprogtræningen eller det forsøges erhvervet integreret i den. I Breddekurset inddrages nyt pensum i høj grad gennem nye kompetenceorienterede opgaver.

Breddeopgave 50 og 51. Mikroelektronik

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til disse to opgaver fra breddekurset på RUC (fra vintereksamen 1978 og sygeeksamen september 1987, nr. 50 og 51 i rækken her i KVANT):

Ved fremstillingen af integrerede kredsløb i elektronikindustrien nedprojiceres ønskede mønstre fra en stor skabelon på kredsløbsmatrixen (areal ca. 1 mm^2) via brug af lysfølsom lak på denne. Vurder en mindste tykkelse af ledningerne i integrerede kredsløb. Begrund vurderingen.

For at fremstille integrerede mikroelektronikkredse benyttes nu ofte elektronstråler, fordi man var nået til en nedre grænse for komponenternes størrelse ved brug af lys ved nedprojiceringen af kredsløbsmønstrene. Hvor stor en bevægelsesenergi har elektronerne mindst? Begrund svaret.

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer.

Jagten på Jordlignende planeter med gravitationel mikrolinsning

Kennet Bomann West Harpsøe, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Det er ikke mere end 17 år siden den første planet uden for vores eget solsystem, der kredser om en hovedseriestjerne blev opdaget. Siden har vi opdaget over 600 nye exoplaneter, men langt de fleste af disse planeter er gaskæmper, med meget dårlige betingelser for liv. Vi kender flest gasplaneter simpelthen fordi de er lettest at opdage. Vi ved nu at exoplaneter er almindelige, men vi ved stadig ikke, hvor almindelige Jordlignende planeter med behagelige temperaturer, er i vores galakse. Med gravitationel mikrolinsning kan vi besvare lige netop dette spørgsmål. Dermed kan vi finde ud af hvor langt der er mellem de steder hvor E.T. kunne bo, og om dette kan forklare at han ikke har besøgt os endnu.

Einsteins artikel og udvalgseffekter

December nummeret af det videnskabelige tidsskrift Science indeholdt i 1936 en meget kort artikel af Albert Einstein: Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field [1]. I denne artikel beskriver Einstein, hvordan tyngdefeltet fra en stjerne kan afbøje lyset fra en baggrundsstjerne og dermed forstærke lyset fra denne, hvis de to stjerner er noget nær perfekt oplinierede på een synsline. Den påkrævede grad af opliniering er faktisk så stor at Einsteins artikel slutter med de berømte ord: "There is no great chance of observing this phenomenon".

Heldigvis tog Einstein fejl. Han kunne ikke have forudset den enorme tekniske udvikling inden for elektronik, detektorer og optik, vi har været vidner til siden 1936. I dag kan vi med hjælp fra automatiske teleskoper og computere overvåge flere hundrede millioner stjerner i Mælkevejen om dagen og herved finde de meget sjældne mikrolinsninger.

Det mest interessante aspekt af disse mikrolinsninger er, at de kan afsløre planeter der kredser om den linsende stjerne. Denne metode til detektion af såkaldte exoplaneter udgør et yderst interessant supplement til de to dominerende exoplanetdetektionsmetoder: radialhastighedsmetoden og transitmetoden.

For både radialhastighedsmetoden og transitmetoden gælder det, at det er langt lettere at detektere tunge planeter med små baneradier. Det vil sige at detektioner fra disse to metoder vil være behæftet med en udvalgs-effekt, der dækker over, at der vil være relativt flere detektioner af denne type af planeter alene fordi de er lettere at detektere.

Gravitationel Mikrolinsning

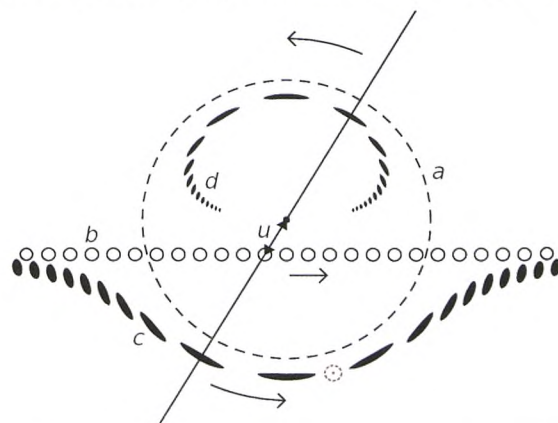
Den gravitationelle mikrolinsningsmetode er ikke i samme grad påvirket af denne udvalgseffekt. Her er der langt bedre muligheder for at detektere små planeter og planeter med store baneradier. Vi kan dermed udforske opbygningen af exosolsystemer, vi kan undersøge hyppigheden af jordlignende planeter i jordlignende baner,

og vi kan finde exoplaneter svarende til Jupiter og Saturn i vores eget solsystem. Det kan have betydning for hyppigheden af liv i universet, da det meget vel kan vise sig, at tunge planeter i de ydre dele af et solsystem er nødvendige for at få bragt vand til de indre dele.

Ifølge den almene relativitetsteori vil det mikrolinse-de billede af en baggrundsstjerne, der observeres præcis på den akse, der udspændes af en given baggrundsstjerne og en given linsestjerne, have form af en ring, en såkaldt Einsteinring. Radius af denne ring er givet ved følgende udtryk:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_S - d_L}{d_S d_L}} \quad (1)$$

hvor θ_E er givet i radianer, G er gravitationskonstanten, M er massen af linsestjernen, d_S er afstanden til baggrundsstjernen, og d_L er afstanden til linsestjernen.



Figur 1. Den sorte prik i midten af figuren er linsestjernen, og den stiplede cirkel (a) angiver dens tilhørende Einstein radius. Rækken af åbne cirkler (b) angiver baggrundsstjernes vej gennem systemet. Baggrundsstjernen vil dog ikke kunne ses her. I stedet vil der være to billeder (c og d) af baggrundsstjernen modsat hinanden langs Einsteinringen på den linje, der forbinder linse- og baggrundsstjerne. Når afstanden mellem baggrundsstjernen og linsestjernen er stor, vil billedet inden for Einsteinringen forsvinde, og det ydre billede vil falde sammen med positionen for baggrundsstjernen som vist på figuren.

For en typisk mikrolinsning der observeres ind mod Mælkevejens centrum gælder det, at $d_S \approx 24000$ lysår og $d_L \approx 12000$ lysår. Hvis vi nu sætter M til Solens masse får vi en Einsteinradius på 0,001 buesekund, hvilket er langt under opløsningsevnen af nuværende teleskoper. Vi kan altså ikke observere Einsteinringen direkte. Det viser sig dog at lyset fra baggrundstjernen også forstærkes når det er mikrolinset, og denne ændring i lysstyrke kan vi observere, selv om vi ikke kan opløse Einsteinringen.

Hvis opliniering ikke er perfekt, vil billedet af baggrundstjernen ikke blive en ring men to diskrete billeder af stjernen: et tæt på men inden for Einsteinringen og et tæt på ringen men udenfor. Se figur 1. Disse to billeder vil være diametralt modsat hinanden i forhold til linsestjernen. De vil ikke være opløselige, men lyset fra baggrundstjernen vil stadig blive forstærket, og der er et simpelt udtryk for denne forstærkning som funktion af den projekterede afstand $u = \theta/\theta_E$, i termer af Einsteinradier, mellem baggrunds- og linsestjerne:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad (2)$$

Den opliniering, der ligger til grund for de mikrolinsninger, vi observerer fra Jorden, opstår og forsvinder på grund af Mælkevejens rotation. Denne rotation giver stjerner egenbevægelse, og vi kan parametrisere u i termer af denne egenbevægelse via Pythagoras formel

og dermed beregne forstærkningen som funktion af tid:

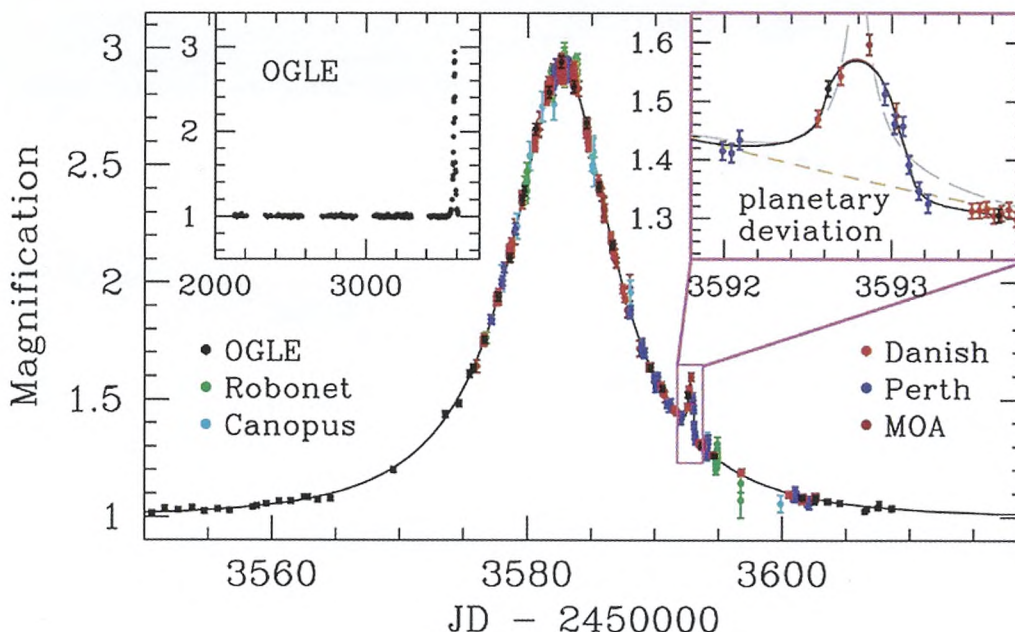
$$u(t) = \sqrt{u_{\min}^2 + \frac{(t - t_0)^2}{t_E^2}} \quad (3)$$

hvor $u_{\min}$ er den minimale afstand (impact parameter), der opnås, t_0 er tiden for mindste afstand og t_E er den tid, det tager baggrundstjernen at krydse Einsteinringen.

Hvis man indsætter ligning (3) i ligning (2), får man udtrykket for den såkaldte Paczyński kurve, opkaldt efter den polske astronom Bohdan Paczyński (1940–2007), se figur 2.

Det spændende er nu, at hvis der er en planet i en position der overstryges af et af de to billeder, som angivet med den røde prik i figur 1, vil hele mekanismen gentage sig, nu blot med en langt mindre Einstein radius svarende til planetens masse. Det ene af billederne vil blive splittet op, og der vil for en kort stund være hele tre billeder. Disse ekstra billeder kan observeres som en ekstra top af forstærkning før eller efter den top af forstærkning, der svarer til mikrolinsningen fra linsestjernen. Se den indsatte figur øverst til højre på figur 2.

I figur 1 har vi angivet radius af baggrundstjernes skive som mange gange mindre end Einsteinradien for linsestjernen. Dette billede er korrekt, når vi taler om Einsteinradien for en stjerne, men da Einsteinradius er proportional med kvadratroden af linseobjektets masse, bliver Einsteinradien for en planet fantastisk mange gange mindre.



Figur 2. Lyskurve observeret for mikrolinsningshændelsen OGLE-2005-BLG-390L [2]. Tidsangivelsen er i Julianske dage, dvs. dage siden 1. januar 4713 f.v.t. kl. 12:00. Grafen øverst til venstre viser observationerne fra det automatiske overvågningsteleskop OGLE. Hver dag overvåger OGLE automatisk ca. 200.000.000 stjerner i et felt ind mod Mælkevejens centrum. Når dette teleskop opdager en mikrolinsningshændelse udsender det en alarm, og et stort antal observatorer og teleskoper begynder at observere denne hændelse i stor tidlig opløsning. Alle disse observatorer og deres observationer er angivet i hovedgrafen. Den 10. august 2005 observerer det danske 1,54m-teleskop på La Silla i Chile som det første, at lyskurven afviger fra det beregnede mønster. Denne afvigelse var begyndelsen på den lille top, der er vist i den lille boks. Denne top svarer til mikrolinsningen fra exoplaneten OGLE-2005-BLG390Lb. Den gule, stiplede linje angiver den beregnede lyskurve uden planet.

De helt små planeter

Det bliver nu interessant at spørge om hvad der sker, når radius af baggrundsstjernens skive bliver sammenlignelig med Einsteinradien. Noget af baggrundsstjernens skive vil stadig blive forstærket, men denne forstærkning vil blive fortyndet af de dele af baggrundsstjernens skive, der ikke bliver forstærket.

For at estimere den tilsyneladende forstærkning vi vil observere, kan vi integrere forstærkningen givet ved ligning (2) over baggrundsstjernens skive og sætte den i forhold til den lysstyrke, som vi ville se uden linsen, dvs. integralet over baggrundsstjernens skive:

$$A(r_*) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_*} I(r) A(r) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_*} I(r) r dr d\theta} \quad (4)$$

hvor r_* er radius af baggrundsstjernens skive og $I(r)$ er baggrundsstjernens lysstyrke per areal. Hvis vi nu antager at kildestjernens lysstyrke er uniform hen over skiven, dvs. $I(r) = 1$, kan vi løse integralerne og får:

$$A(r_*) = \frac{\sqrt{r_*^2 + 4}}{r_*} \rightarrow 1 \text{ for } r_* \rightarrow \infty \quad (5)$$

Som det ses går den tilsyneladende forstærkning mod én, dvs. mod et signal, der ikke kan observeres, når radius af kildestjernens skive vokser udover Einsteinradien af linseobjektet. Faktisk går denne funktion hurtigt mod én, f.eks. er $A(1) = 2.2$ og $A(2) = 1.4$. Der er altså en sammenhæng mellem størrelsen af baggrundsstjernens skive og massen af planeter, der kan observeres.

Hvor ser vi dem

Chancen for at tilfældige stjerner på himlen pga. deres egenbevægelse bliver oplineret tilstrækkeligt til at udvise mikrolinsning er forsvindende lille. Derfor bliver praktisk taget alle mikrolinsninger observeret i de allertætteste felter ind mod centret af Mælkevejen af den simple grund, at her er der flest stjerner.

En beklagelig konsekvens er dog, at disse felter er overfyldt, dvs. stjernerne ligger oven i hinanden. Dette betyder at stjernerne fremtræder som et kontinuum, hvor kun de klareste stjerner kan identificeres som individuelle stjerner.

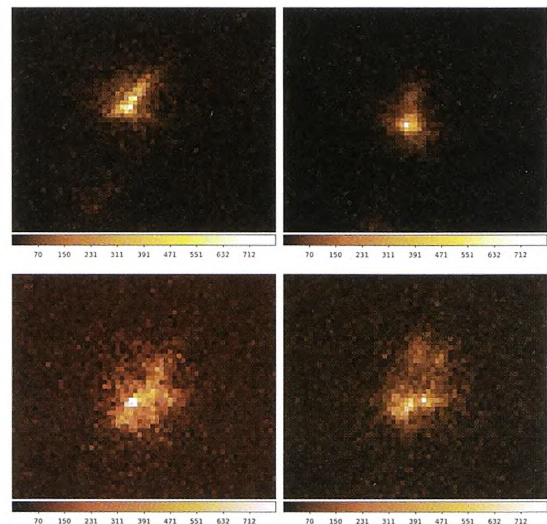
Disse klare stjerner vil oftest være røde kæmpestjerner, som er stjerner nær enden af deres liv. Disse stjerner svulmer op til flere hundrede gange deres oprindelige størrelse og bliver meget lysstærke, lige som solen vil gøre det om ca. 5 milliarder år. Men denne opsvulmen betyder, at radius af stjernens skive vil være meget stor og derfor ikke i stand til at afsløre planeter med små masser.

Den eneste vej uden om dette problem er at øge opløsningen af de billeder, som man optager gennem sit teleskop for at kunne identificere svagere stjerner, der stadig er hovedseriestjerner, og derfor meget mindre.

Lucky imaging

De fleste, der har set på stjerner vil have bemærket at de funkler. Denne funklen er udelukkende en konsekvens

af turbulens i Jordens atmosfære, og hvor romantisk det end måtte være, er funklen eller seeing overordenligt forstyrrende for astronomiske observationer. Set i forstørrelse ser det ud som om stjernerne ryster. Rysteriet giver slørede billeder på nøjagtigt samme måde, som hvis man ryster på hånden, når man tager billeder med sit håndholdte digitalkamera med zoom.



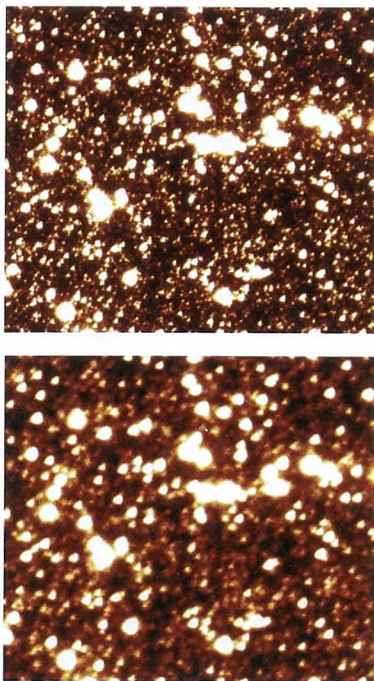
Figur 3. Fire eksempler på korttidseksponeringer af en enkelt stjerne. Eksponeringstiden i hvert billede er 30 ms. Som det ses ændrer både positionen og opløsningen, dvs. fokus, af stjernen sig meget fra billede til billede. De to fænomener, variationen i position og variationen i fokus, giver ophav til de to metoder “shift and add” og “lucky imaging”. Disse billeder er optaget med det danske 1,54 m teleskop ved Det Europæiske Sydobservatoriums (ESO) La Silla Observatorium i Chile. Dette teleskop bruges til at teste SONGs teknik og til mikrolinsningsobservationer.

Hvis man nu kunne optage billeder lige så hurtigt som stjernerne ryster, kunne man fryse bevægelsen og flytte de enkelte billeder, så bevægelsen fra stjernernes rysten ophæves. Derefter kunne man lægge billederne sammen og opnå et billede med samme signal som et traditionelt billede. Men det opnåede billede vil være uden den atmosfæriske seeing, og dermed i en langt højere opløsning, denne metode kaldes for “shift and add”.

Desuden vil opløsningen i de korte eksponeringer variere kraftigt, som det ses i figur 3. Man kunne derfor også forestille sig en strategi hvor man, udover at flytte billederne, kun beholder de billeder der tilfældigvis har meget høj opløsning og smider resten væk. Denne metode kendes som “lucky imaging”. Med denne metode kan man opnå meget store forbedringer i opløsningen, langt bedre end “shift and add”, ved at beholde omkring 1% af billederne. Men man smider altså i princippet 99% af sit lys og sin observationstid væk. Det mistede lys gør bestemmelsen af lysstyrkerne dårligere.

Heldigvis kan man kombinere de to teknikker. I figur 4 ses øverst et lucky imaging billede. På grund af den høje opløsning kan man klart adskille et meget stort antal stjerner. Et billede af det samme felt med en lavere opløsning vil i princippet indeholde lige så

mange stjerner og lige så meget lys. Men lyset fra de enkelte stjerner vil så at sige være sløret sammen. Specielt vil lyset fra svage stjerner være sløret sammen med lyset fra langt klarere stjerner og være domineret af disse. Derfor vil det være meget svært at finde svage stjerner og beregne deres lysstyrke.



Figur 4. To billeder af centeret af kuglehoben ω Centauri i stjernebilledet Kentaurer. I det øverste billede er opløsningen øget med lucky imaging. Det nederste billede er en konventionel langtidseksponering af det samme felt, altså uden hverken shift and add eller lucky imaging. Forskellen i opløsning er slående. Størrelsen af feltet er 45 gange 45 buesekunder, hvilket er et SONG teleskops synsfelt. Dette svarer til at en tennisbold set i en afstand af 4,5 km vil dække feltet. Opløsningen i det øverste billede er ca. 0,4 buesekund FWHM og opløsningen i det nederste billede er ca. 1,2 buesekund.

Men hvis man forlods kender positionerne af alle stjerner i feltet fra et lucky image, kan man rent matematisk beregne udseendet af det samme billede i lavere opløsning. Dermed kan man også, givet et billede i lavere opløsning, regne baglæns til alle de oprindelige lysstyrker. Så man kan finde lysstyrkerne i billeder genereret med shift and add, som har lavere opløsning, men ikke smider billeder væk, hvis man kan lave et lucky image og finde alle stjernerne i dette. Denne kombination gør det muligt at bestemme lysstyrken nøjagtigt af svage stjerner i overfyldte felter.

Fremkomsten af nye højhastigheds-lavstøjskameraer har muliggjort netop denne strategi. Dermed er mikrolinsningsteknikken nu klar til at tælle antallet af Jordmasseplaneter i Mælkevejen.

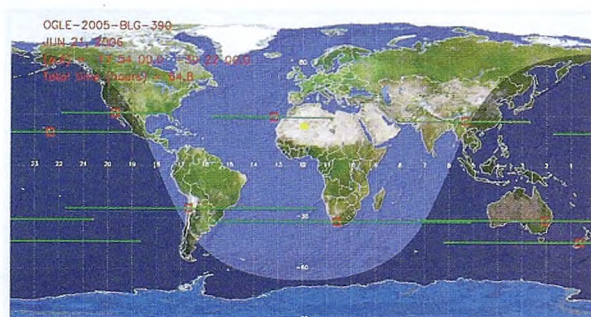
SONG

Derfor har astronomer fra Niels Bohr Institutet og Aarhus Universitet i samarbejde med bl.a. Beijing Normal University taget initiativ til SONG (Stellar Oscillations Network Group) [3], der består af et planlagt netværk

af 8 automatiske 1 m-teleskoper, placeret på strategiske steder Jorden rundt i to ringe, en på den nordlige og en på den sydlige halvkugle. Se figur 5. Herved kan enhver stjerne, der ikke står tæt på solen, observeres døgnet rundt, idet teleskoperne afløser hinanden, når solen går ned og står op det pågældende sted.

SONG er udelukkende beregnet til mikrolinseobservationer og stjernesismologi. Disse metoder kræver lange ubrudte tidsserier, men behøver ikke meget store teleskoper. Observationer med et globalt netværk af 1 m-teleskoper er derfor ideelt. For mikrolinsninger gælder det, at signalet fra en Jordmasseplanet vil være omkring en halv time. Det er derfor vigtigt at kunne observere mikrolinsninger meget tæt, hele tiden.

I skrivende stund er det første SONG ved at blive stillet op på Teide Observatoriet på Tenerife.



Figur 5. Planlagt placering af alle 8 SONG teleskoper. De grønne streger angiver over hvilket tidsrum en stjerne, på himlens ækvator, kan følges af hvert enkelt teleskop. Der er et betydeligt overlap, specielt på den sydlige halvkugle, hvor der i tillæg er fuld 24 timers dækning. Mikrolinsnings-signalet fra en Jordlignende planet vil være ca. en halv time pga. den meget lille Einsteinradius for så lille en masse. Så det gælder om at være på pletten når tid er.

Litteratur

- [1] Albert Einstein (1936), Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field, *Science*, **84**, 506-507, DOI:10.1126/science.84.2188.506.
- [2] Beaulieu et. al. (2006), Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing, *Nature*, **439**, 437-440, DOI: 10.1038/nature04441.
- [3] Song Network Homepage, <http://song.phys.au.dk/>.
- [4] MiNDSTeP Homepage, Online interactive data, <http://www.mindstep-science.org/>



Kennet Bomann West Harpsøe er ph.d.-studerende ved Niels Bohr Institutet. Hans ph.d.-projekt omhandler mikrolinsning og lucky imaging, specielt metoder til at udtrække nøjagtige lyskurver fra svage mikrolinsninger i jagten på Jordmasse-exoplaneter.

Demokratiseret forskning og spilbaseret undervisning

Sidse Damgaard Hansen, Rikke Magnussen og Jacob Friis Sherson, AU Ideas Center for Community Driven Research

Vi vil ved hjælp af et online socialt computerspil forsøge at løse en aktuell og meget resourcekrævende teknologisk udfordring – at designe verdens kraftigste kvantecomputer. I the Quantum Computer Game skal spillerne på en sjov og nem måde udforske og udvikle kvantecomputerens fulde potentiale. Vi har en forventning om, at denne form for onlineforskning, faciliteret af internettet, kan blive et vigtigt redskab for både grundvidenskabelig og anvendt forskning samt undervisning i det 21. århundrede.

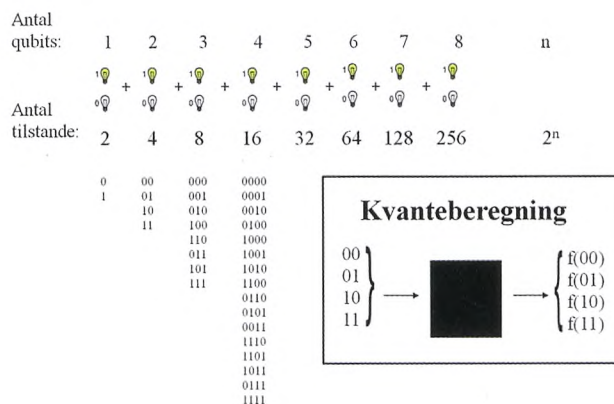
Kvantecomputeren

Den eksponentielle vækst af tilgængelig computerkraft gennem de sidste årtier, konkretiseret i Moore's lov, har været enestående. Omtrent hvert andet år er det konsekvent lykkedes at formindske størrelsen af computerens elementære logiske bestanddel, transistoren, til det halve. Denne udvikling præsenterer samtidig udviklerne for et dilemma. Hvis tendensen fortsætter er den mikroskopiske verden, enkelte atomer lever i, nemlig i sigte. I dette regime er den store udfordring at håndtere de særlige spilleregler, der gælder for enkelte atomer, kvantemekanikken. Allerede i dag er kvantemekaniske effekter, hvor enkelte elektroner tunnelerer mellem tætliggende ledere en alvorlig udfordring for miniaturiseringen af computerchips.

I stedet for at opfatte de kvantemekaniske effekter som begrænsende faktorer kan man vælge at udnytte kvantemekanikkens love til at opbygge en kvantecomputer, der vil kunne lave mange beregninger på samme tid. Det er muligt, fordi kvantemekanikken tillader et atom at være i flere forskellige tilstande samtidig (superpositionsprincippet). De fundamentelle byggesten i almindelige computere er bits, der enten har værdien 0 eller 1. Den kvantemekaniske ækvivalent, en qubit, kan derimod være i tilstandene 0 og 1 samtidig. To qubits kan være i en kombination af fire tilstande (00, 01, 10 og 11), og for hver tilføjet qubit fordobles dette antal. Det betyder at hvor 10 normale bits repræsenterer ét af tallene fra 1 til 2^{10} , kan 10 qubits i en vis forstand repræsentere alle 2^{10} tal på én gang. Denne eksponentielle vækst er ekstrem hurtig: bare 300 qubits kan repræsentere flere tal, end der er atomer i universet, og en kvantecomputer vil i en vis forstand kunne lave operationer på dem alle samtidigt, se figur 1.

Det lyder næsten for godt til at være sandt, og det er det desværre også på grund af endnu et af kvantemekanikkens forunderlige koncepter. Et atom kan jo som nævnt være i flere forskellige tilstande samtidig, men det viser sig, at når man måler på det, kollapsede atomet til ét bestemt af dem. For kvantecomputeren betyder det, at nok kan man lave manipulationer på mange forskellige tilstande på én gang, men lige så snart man spørger til resultatet af udregningen får man kun ét resultat ud! Så synes vi at være lige vidt. Heldigvis har

det i løbet af de sidste par årtier vist sig, at hvis man udfører smarte kombinationer af manipulationer og stiller de rigtige spørgsmål til atomerne kan man alligevel udnytte paralleliteten til at lave bestemte beregninger hurtigere end alle normale computere tilsammen. Et eksempel på en sådan udfordring er primtalsfaktorisering [1]. Eftersom en stor del af krypteringen på internettet i dag er baseret på antagelsen af, at dette ikke kan gøres effektivt, kan udviklingen af en funktionel kvantecomputer potentielt få store konsekvenser for samfundet.



Figur 1. En qubit kan visualiseres som en lyspære, der både kan være tændt (1) og slukket (0) på samme tid. For hver qubit, der føjes til systemet, fordobles antallet af tilstande så f.eks. fire qubits kan være i 16 forskellige tilstande samtidig. En kvanteberegning kan ses som en kasse, der udfører en funktion på inputtet. Da inputtet rummer forskellige tilstande, vil outputtet også bestå af flere forskellige beregningsværdier.

Denne erkendelse har siden afstedkommet intenst eksperimentelt og teoretisk arbejde. Allerede i 2001 blev den første prototype af en kvantecomputer udviklet med enkelte atomer i et organisk molekyle i en vandig opløsning som qubits. Beregningerne (primtalsfaktorisering af 15) blev foretaget ved en teknik kaldet kernemagnetisk resonans (NMR), men desværre tillod strukturen af molekylet kun 7 qubits [2].

I figur 2 lister vi de tre vigtigste kriterier for at kunne bygge en kvantecomputer og sammenligner dem med de tilsvarende krav til en almindelig computer.

Først og fremmest skal man have et system der kan operere på tilstrækkeligt mange værdier. Som nævnt ovenfor vil bare 300 qubits muliggøre manipulation af ekstremt mange tilstande, men af tekniske grunde vil en fuldt funktionel kvantecomputer nærmere kræve nogle tusinde qubits, der hver især kan initialiseres i de ønskede starttilstande.

Dykker man tilstrækkeligt dybt ned i en normal computers software, viser det sig at den kan programmeres alene ved hjælp af enkelte bit flips, hvor 0 flippes til 1 og vice versa, samt 2-bit operationer hvor outputtet afhænger af værdierne af begge bits. Et eksempel på en 2-bits operation er XOR, hvor outputtet er 1 hvis og kun hvis netop en af de to bits er 1. Analogt har det vist sig at al software i en kvantecomputer kan sammensættes af enkelt- og 2-qubit operationer. En enkelt-qubit operation er lidt mere kompliceret end et normalt bit-flip, idet man skal kunne dreje qubitten til en vilkårlig superposition af 0 og 1. Der eksisterer flere forskellige 2-qubit operationer, og hvilken der søges implementeret afhænger af det specifikke system. Et eksempel på en 2-qubit gate er en phase-gate, hvor tilstanden ganges med -1 hvis og kun hvis de to qubits begge er 1 tilstanden.

	Klassisk computer	Kvante computer
a.	Milliarder af bits	100 – 10.000 qubits
b.	Flip bit	Drej qubit
c.	2-bit operation fx. XOR:	2-qubit operation fx. phase-gate:
	00 → 0	00 → 00
	01 → 1	01 → 01
	10 → 1	10 → 10
	11 → 0	11 → -11

Figur 2. Kriterier for at lave henholdsvis klassiske og kvanteberegninger. I begge tilfælde kan al software implementeres ved en sekvens af enkelt bit og to-bit operationer.

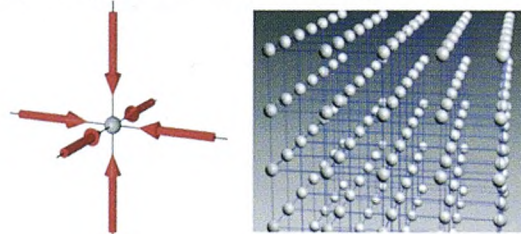
I løbet af det sidste årti har forskere rundt omkring i verden arbejdet på at implementere en kvantecomputer i forskellige systemer såsom enkelte atomer og molekyler, ioner, fotoner og elektriske kredsløb. Hvert system har sine unikke fordele og ulemper, men fælles er den store udfordring at sikre at systemet forbliver komplet isoleret fra omgivelserne da bare den mindste kobling vil forårsage fejl i kvanteberegningen. Langt de fleste grupper har forsøgt en bottom-up tilgangsvinkel til at bygge en kvantecomputer, hvor forskerne først laver

en mindre computer og derefter arbejder på at forøge størrelsen ved at tilføje en qubit af gangen. I dag er antallet af qubits med stor møje kun blevet forøget til 12, så fremskridt mod en stor-skala kvantecomputer med hundrede- eller tusindevis af qubits har været meget langsom.

Vores kvantecomputerkandidat

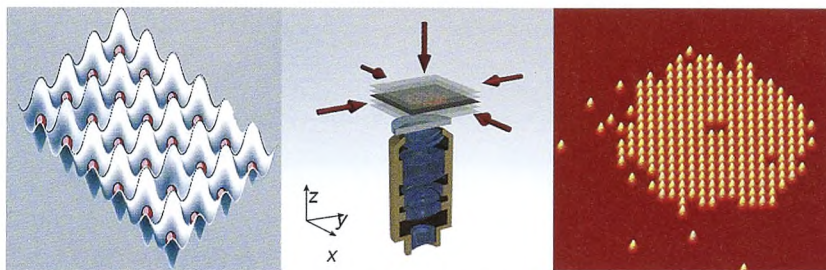
I løbet af det sidste par år har IFA's kvantefysikgruppe i et dansk-tysk samarbejde i en top-down tilgangsvinkel eksperimentelt frembragt en utroligt ren og manipulerbar krystal af 300 enkelte atomer [3].

Optisk gitter – en fælde af lys

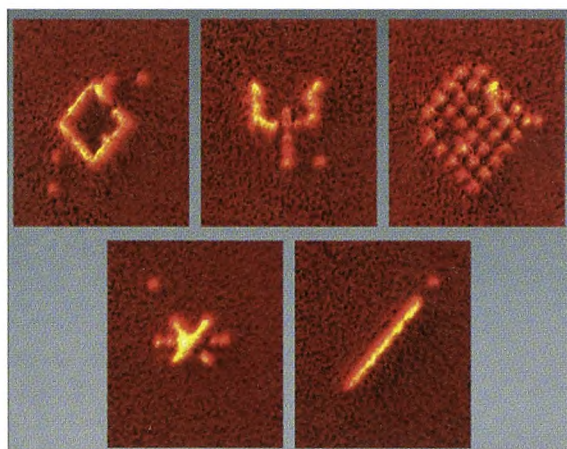
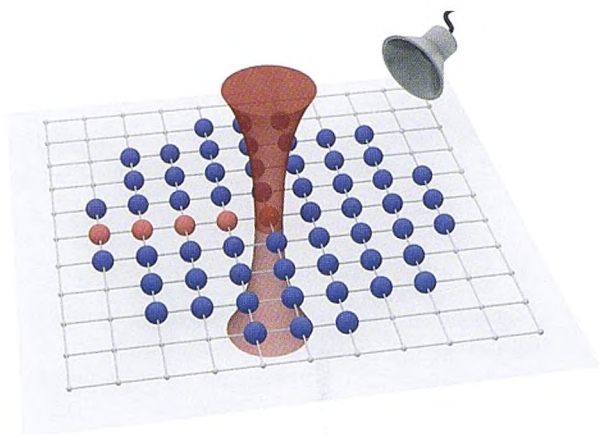


Det vigtigste redskab i eksperimentet er et optisk gitter. Det består af stående bølger af lys, som produceres ved at reflektere en laserstråle tilbage i sig selv, ligesom når man fastgør et tov til en mur og svinger det. Hvis man vælger den rigtige lysfrekvens søger atomerne mod områder med høj intensitet. Hvis man gør det i alle tre rumlige retninger dannes en perfekt krystalstruktur som udsætter atomerne for en kraft rettet mod gitterpunkterne. I eksperimentet udvælges et enkelt plan af 3D-strukturen, hvilket resulterer i den æggebakkellignende struktur illustreret i figur 3.

Det skete ved at placere ultrakolde atomer i en æggebakkellignende potentialstruktur bestående af en kunstig krystal af lys, et optisk gitter (se faktaboksen: "Optisk gitter"). Ved præcist og langsomt at øge dybden af brøndene lykkedes det at udnytte atomernes indbyrdes vekselvirkning til at få dem til at organisere sig selv på rad og række i en yderst ordnet struktur med præcist ét atom per brønd. Afstanden mellem brøndene er bare 0,5 μm , så det var kun muligt at afbilde de enkelte atomer ved at udvikle et specialdesignet mikroskop med en ultrahøj opløsning (se figur 3). Med en temperatur på 4 nK er krystallen den koldeste krystal i Verden og ville med sine 300 atomer kunne udgøre kernen i en stor-skala kvantecomputer.

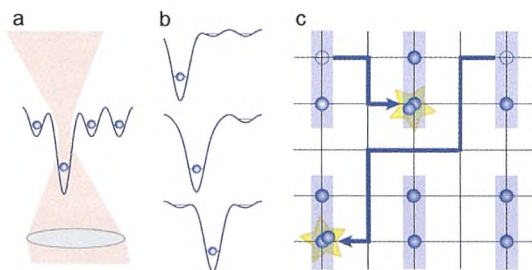


Figur 3. Til venstre ses et idealiseret billede af selvorganiserede atomer i en æggebakkellignende struktur. I midten ses det ultra-højt opløsende mikroskop, der er brugt til at tage billedet af atomerne i den eksperimentielt fremstillede krystal vist til højre.



Figur 4. Adressering af enkelte atomer [4]. Til venstre: En laserstråle fokuseret på en enkelt brønd i krystalstrukturen udgør en optisk pincet. Den skifter energien for en overgang i det udvalgte atom, og med mikrobølger flippes atomet mellem 0 og 1. Til højre: Et udpluk af mønstre tegnet ved efter tur at pege pincetten på de udvalgte atomer.

For at løse udfordringen med at manipulere enkelte atomer blev mikroskopet derefter udnyttet til at skabe en optisk pincet fokuseret på en vilkårlig brønd i krystalstrukturen. Denne laserstråle har en bølglængde langt fra alle tilladte overgange i atomet, så strålens fotoner bliver ikke absorberede af atomerne, men ligesom det optiske gitter udsætter pincetten atomerne for en kraft. Denne kraft forandrer i det udvalgte atom energien mellem de to tilstande i atomet, der benyttes som de logiske 0 og 1 beregningstilstande. Med mikrobølger resonante med denne skiftede energi flippes atomet mellem 0 og 1, mens de resterende atomer forbliver uberørte [4], se figur 4. Dette udgør en enkelt-qubit gate, og dermed er to ud af de tre kriterier for at kunne lave en kvanteberegning opfyldt (se figur 2).



Figur 5. 2-qubit operation [5]. a: Atomet fanges af pincetten. b: Atomet transporteres til nabobrønden. c: Atomer transporteres rundt via gitterets frie brønde og bringes til at vekselvirke med udvalgte atomer.

Vi har siden undersøgt teoretisk, hvorvidt kombinationen af krystallen og den optiske pincet også kan bruges til at realisere den sidste ingrediens i kvanteberegningen, en operation betinget af to atomers tilstande. Dette syntes at kunne lade sig gøre ved at benytte pincetten til først at transportere to udvalgte atomer tæt på hinanden og derefter bringe dem sammen vha. den optiske pincet [5]. På grund af den svage interatomare frastødning vil tilstandene i atomerne langsomt akkumulere en faseforskel, der vil kunne udgøre en 2-qubit gate, se figur 5. Hvis denne arkitektur skal være en seriøs kandidat til en stor-skala kvantecomputer skal

fejlsandsynligheden i hver operation dog være mindre end 10^{-3} . Så vil kvante-fejlretningsprotokoller kunne garantere, at selv beregninger med tusindvis af operationer vil kunne foretages uden at fejlene i de enkelte operationer hober op.

Vi har parametriseret pincettens bevægelse og intensitet som funktion af tiden i hvert delskridt (transport af atomet, vekselvirkning mellem atomer mm.) og numerisk optimeret bevægelsen og dermed bragt fejlsandsynligheden under de påkrævede 10^{-3} . Problemet er, at selv efter intensiv optimering er det ikke lykkedes at finde bevægelsesalgoritmer, der er robuste når realistiske eksperimentelle fejlkilder såsom en uundgåelig svag rysten af pincetten – akkurat som det er svært at holde en laserpointer helt stille – medtages. Det synes dermed ikke realistisk at implementere en kvantecomputer ved hjælp af den optiske pincet, med mindre man kan finde en anden måde at søge efter robuste algoritmer på.

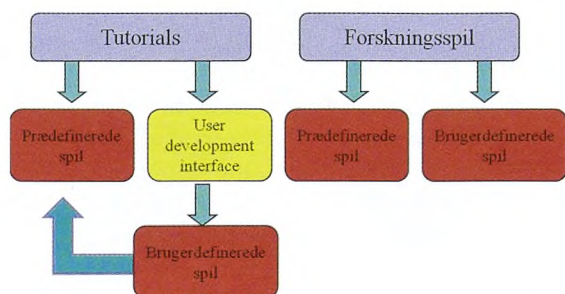
The Quantum Computer Game

Vi mener at den eksponentielle vækst af information og kommunikation på internettet, som allerede har omdefinert det moderne samfund også har potentialet til at omdefinere, hvordan forskning udføres. Vi forsøger derfor i en community-baseret tilgang (spillet: the Quantum Computer Game) at engagere internettets mange brugere til at løse vores konkrete udfordring med at udvikle nye, robuste kvantecomputeralgoritmer.

Som vist i figur 6 består spillet af to enheder. De første baner fungerer som tutorials, der ikke bidrager direkte til udviklingen af en kvantecomputer, men istedet skal lære spillerne om kvantemekanik og ad den vej gøre dem bedre til at løse de forskningsmæssige udfordringer i the Quantum Computer Game.

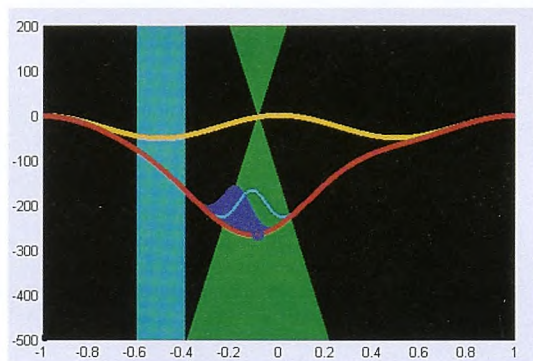
I forskningsspillene vil brugerne frit kunne udforske fysikken bag kvantecomputeren og bidrage med nye kvantecomputeralgoritmer, se faktaboksen “Et eksempel på et kvantecomputerspil”. Efter hvert forsøg udregnes en score baseret på kvaliteten af den resulterende kvantecomputer. Hvis en spiller finder en bedre løsning på et delproblem uploades data om spillerens løsning

til en central server og den tilhørende score tilføjes en global high-score liste, der til enhver tid vil svare til forskningsfeltets state-of-the-art. Denne bliver udbygget for hver time intelligente og lidenskabelige mennesker spiller. Til sidst vil spil-dataene hørende til den globale high-score kunne publiceres som et optimeret resultat for en robust kvantecomputeralgoritme.



Figur 6. Skematisk oversigt over spillet. Til venstre: Spillet indeholder baner, der skal lære spilleren om kvantemekanik og derved ruste dem bedre til at løse de videnskabelige problemer. I denne afdeling er det muligt for spillerne selv at opbygge baner til brug for alle andre spillere. Til højre: Baner hvor spillerne hjælper forskningen. Her bliver data om spillernes valg uploadet til en server, hvorfra de bedste resultater kan bruges i opbygningen af en kvantecomputer.

Et eksempel på et kvantecomputerspil



Figuren viser et screen shot af den nuværende beta-version af et af spillene i the Quantum Computer Game, mens det er i spil.

Her ses to af brøndene i den underliggende gitterstruktur (orange). Den optiske pincet (grøn) samt den underliggende gitterstruktur giver det resulterende potentialt (rød) atomet følger. Pincetten peger i starten på den højre brønd.

I dette spil er målet at bringe atomet (blå), der starter i den højre brønd, over i den venstre brønd – midten af den venstre brønd er markeret med en blå søjle. Det blå atom skal, for at undgå beregningsfejl i kvantealgoritmen, ende i den laveste energitilstand for potentialt, der er vist med den lyseblå linje.

Atomt og den laveste energitilstand vil ændre sig i realtid når spilleren ændrer potentialt.

Spilleren ændrer potentialt ved at klikke på den blå cirkel og derefter bevæge musen rundt på skærmen. Den optiske pincet og det resulterende potentialt følger nu musens bevægelser.

Spillerne af the Quantum Computer Game vil ikke alene bidrage med beregningskraft til at afprøve de mange muligheder, men også med menneskelig feedback til optimeringen baseret på mønstergenkendelse og intuition, hvilket har vist sig essentielt i spillet Foldit (se faktaboksen "Forsknings/lærings spil"). Derudover håber vi på at engagere spillerne i at udvikle metoder, der ligger udenfor de prædefinerede rammer af spillet og endda med tiden til at hjælpe med at definere nye videnskabelige problemer, der skal løses i fremtidige versioner af spillet. Med kombinationen af massiv udbredelse og en flok af dedikerede medudviklere håber vi dermed at skabe et bredt forskningsfællesskab, der udnytter det fulde potentiale af den nye community-baserede tilgang til forskning.

Didaktiske udfordringer i spil-baseret undervisning

En af de uddannelsesmæssige udfordringer i videnskonomier som den danske er at undervise børn og unge i at deltage kreativt i skabelse og udvikling af råstoffet i videnssamfundet: ny viden. Formidlingen af statisk viden i skolerne har været det gældende paradigme indtil nu, men med fremkomsten af spil-baseret undervisning er grundstenen lagt til at elever kan producere viden og dermed tilegne sig viden aktivt. Udover at skabe et spil, der egner sig til viral udbredelse på f.eks. Facebook, arbejder vi i øjeblikket med den didaktiske udfordring at udvikle et undervisningsforløb til gymnasiet baseret på både klassiske og kvantemekaniske elementer af spillet. Vi ser dette som et pilotprojekt for implementeringen af forskningsproducerende undervisning i komplekse naturvidenskabelige fænomener til grundskole og gymnasiet, hvor vi tror, at følelsen af at bidrage aktivt til naturvidenskabelig grundforskning vil være et kraftigt læringsincitament.

Spilmediet er velegnet til komplekse simuleringer af faglige tilgange og kan med narrative elementer og konstruktion af regler fungere som rammen om simulering af komplekse autentiske læringsmiljøer. I den vidensbaserede udvikling af et undervisningsforløb til gymnasiet vil det videnskabelige fokus her være på innovativt design af et læringsmiljø kombineret med samtidige eksperimentelle studier af effekten af de innovative elementer. Målet er at udvikle et didaktisk design hvor eleverne får førstehåndsoplevelsen af at være med til at skabe naturvidenskabelig viden og at denne ikke er statisk, men i konstant udvikling og tilblivelse.

Der er flere didaktiske udfordringer i at designe såkaldte "Scientific Discovery Games" som the Quantum Computer Game. Et af de mere specielle karakteristika ved denne type spil er at løsningerne på spillets missioner er ukendte. Hverken lærere eller forskere ved reelt hvad den bedste proces er. Det betyder, at spillet skal designes så generelt som muligt for at give spillerne maksimal frihed til udforskning.

En anden udfordring er, at spillet skal være designet til at ikke-ekspert spillere kan fremme viden indenfor et yderst komplekst forskningsområde med høj grad af ekspertise. Dette har indflydelse på design

af spillets forskellige elementer såsom grafik, interface og spildynamikker. Spillets interaktive visualiseringer af videnskabelige fænomener skal gøre det muligt for nybegyndere at eksperimentere med komplekse parametre og samtidig formidle begrænsninger indenfor forskningsområdet der genereres ny viden til. Belønningsstrategier som pointgivning og highscorelister skal således understøtte, at spillerne kan benytte sig af flere ny kreative strategier, samtidig med at spillet er tro mod den nyeste model af det pågældende videnskabelige fænomen. For at optimere det forskningsmæssige udbytte af spillet vil social interaktion og konkurrence mellem grupper, såsom klasser, gymnasier, byer eller lande, desuden blive inkorporeret.

Forsknings/læringsspil: proteinfoldning og detektivarbejde

Scientific Discovery Games og proteinfoldning

Internettet har frembragt en eksplosion af community-baseret indsamling og deling af viden, som fx Wikipedia.org. Involvering af internetbrugere til at hjælpe med at løse praktiske og fundamentale problemer fik sit gennembrud i 1999 med SETI@home, hvor brugere stiller deres computerkraft til rådighed for søgningen efter liv i universet. Endnu et kvantespring skete i 2008 med introduktionen af online-spillet Foldit, hvor forskere fra University of Washington lader spillere løse komplicerede 3D-protein-foldningsproblemer. Det er blevet en ekstrem succes med mere end 100.000 spillere, og de genererede resultater hjalp forskerne til at vinde den prestigefyldte kemiudfordring, Critical Assessment of Techniques for Protein Structure Prediction (CASP) i 2009.

Foldit: <http://fold.it/portal/>

Forskningsbaserede spil og simulation af professionelle miljøer

I det sidste årti har der i Danmark og internationalt foregået en udforskning af hvordan man kan bruge spilmediet til at skabe nye typer af læringsmiljøer. Indenfor naturfagsundervisningen har der bl.a. været fokus på hvordan spil kan understøtte nye typer af sanselig forståelse af naturvidenskabelige fænomener og hvordan man kan bruge spil til at simulere autentiske professionelle naturfaglige miljøer. Et eksempel på dette er spillet Drabssag/Melved [6] som blev udviklet af en gruppe spiludviklere og forskere i 2003 på forskningsinstitutionen Learning Lab Denmark i samarbejde med skolebogsforlaget Malling Bech. I spillet skal eleverne (7.-10. klasse) i teams opklare en række mord i en fiktiv midtsjællandsk by ved at lytte til optagelser med vidner og mistænkte og gennem teknisk analyse af spor. Gennem brug af autentiske kemiske, matematiske, fysiske og biologiske kriminaltekniske redskaber skal eleverne opbygge verificerbare hypoteser og teorier om hændelsesforløb.

I bestræbelserne på at tilpasse denne klasse af spil i skolen som et didaktisk design til samarbejde med forskere, er der også en række designfunktioner og pædagogiske overvejelser, der skal tages i betragtning, for eksempel lærerens rolle og deltagelse. Som allerede nævnt er et af de unikke aspekter ved denne type spil,

at løsninger på missioner er ukendte. Derfor vil læreren ikke kende resultaterne på de problemer, de studerende forsøger at løse, og vil snarere skulle påtage sig rollen som facilitator eller forskningsleder end den alvidende underviser. Vi arbejder derfor på at give læreren mulighed for nemt at sammensætte sin egen kombination af spil skræddersyet til undervisningsforløbet.

Disse forskellige udfordringer og undersøgelses-spørgsmål har vi valgt metodisk at adressere gennem en designbaseret forskningsproces hvor forskningsbaserede prototyper implementeres online og i gymnasieklasser. Efter interventioner med de første prototyper videreudvikles designet på baggrund af data fra afprøvnin-gerne og nyopståede forskningsspørgsmål. Dette vil både bidrage til udviklingen af en ny type forsknings-baseret læringsteknologi og teoretisk forståelse af et nyt forskningsfelt.

Vil du være med?

Vil du være med til at udvikle the Quantum Computer Game?

- Så meld dig som beta-tester.
Skriv en mail til coderteam@phys.au.dk
- Hvis du underviser i fysik/matematik og har lyst til at bruge spillet i din undervisning eller opbygge et undervisningsforløb omkring spillet så skriv en mail til coderteam@phys.au.dk

Besøg os på vores hjemmeside
www.scienceathome.org

Litteratur

- [1] Michael A. Nielsen and Issac L. Chuang: Quantum Computation and Quantum Information, (Cambridge University Press 2000) side 216 - 247.
- [2] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura and L. J. O'Brien, *Nature* **467**, 68 - 72 (2010).
- [3] Jacob F. Sherson, Christof Weitenberg, Manuel Endres, Marc Cheneau, Immanuel Bloch and Stefan Kuhr: Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator, *Nature* **464**, 45 - 53 (2010).
- [4] Christof Weitenberg, Manuel Endres, Jacob F. Sherson, Marc Cheneau, Peter Schauss, Takeshi Fukuhara, Immanuel Bloch and Stefan Kuhr: Single-spin addressing in an atomic Mott insulator, *Nature* **471**, 319 - 324 (2011).
- [5] Christof Weitenberg, Stefan Kuhr, Klaus Mølmer and Jacob F. Sherson: Quantum computation architecture using optical tweezers, *Phys. Rev. A* **84**, 032322 (2011).
- [6] <http://drabssag.elevunivers.dk/>



Jacob Friis Sherson er adjunkt ved Institut for Fysik og Astronomi (IFA), Aarhus Universitet, og er leder af det tværfaglige AU Ideas Center for Community Driven Research (CODER). Han har gennem både eksperimentelt og teoretisk arbejde med kolde atomare gasser bidraget til udviklingen mod en stor-skala kvantecomputer.



Sidse Damgaard Hansen er cand.scient i fysik og er som videnskabelig assistent i CODER ansvarlig for udviklingen af kvantecomputerspillet software, samt den tekniske understøttelse i forbindelse med indlejringen af spillet i gymnasieundervisningen.



Rikke Magnussen er Lektor på Institut for Kommunikation på Aalborg Universitet hvor hun er tilknyttet ForskningsLab: It og LæringsDesign. Hun har igennem mange år forsket i og udviklet spilbaserede læringsmiljøer til naturfagsundervisning og er i CODER ansvarlig for udviklingen af spillenes læringsdesign.

Foreningsnyt – foredrag i efteråret

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Sep.				
3/9	19.15	Lyman alpha-lyset – et unikt vindue til de fjerneste galakser	Peter Laursen	AS (Kbh)
10/9	19.00	Lyman alpha-lyset – et unikt vindue til de fjerneste galakser	Peter Laursen	AS (Årh)
10/9	19.30	Katalyse: Vejen til et bedre miljø og en grønnere fremtid	Esben Taarning,	SNU
24/9	19.15	Gammaglimt og de tidligste galakser	Johan Fynbo	AS (Kbh)
Okt.				
1/10	19.00	Gammaglimt og de tidligste galakser	Johan Fynbo	AS (Årh)
1/10	19.30	Biosustainablity	Morten Sommer	SNU
22/10	19.15	Kæmpe sorte huller, kvasarer og baby-galakser	Marianne Vestergaard	AS (Kbh)
22/10	19.30	Algebiomasse	Marianne Thomsen	SNU
29/10	19.00	Kæmpe sorte huller, kvasarer og baby-galakser	Marianne Vestergaard	AS (Årh)
Nov.				
12/11	19.15	Galakser set gennem gravitationelle linser	Lise Christensen	AS (Kbh)
12/11	19.30	Metagenomics og rensningsanlæg	Per Halkjær Nielsen	SNU
19/11	19.00	Galakser set gennem gravitationelle linser	Lise Christensen	AS (Årh)
Dec.				
3/12	19.15	Faint galaxies identified via supernovae discoveries (afholdes på engelsk)	Max Stritzinger	AS (Kbh)
3/12	19.30	Den nyeste udvikling indenfor solceller	Peter Sommer Larsen	SNU
10/12	19.00	Faint galaxies identified via supernovae discoveries (afholdes på engelsk)	Max Stritzinger	AS (Årh)

AS (Kbh): Astron. Selskab (København), Auditorium 4, H.C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Årh): Astron. Selskab (Århus), Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade, Bygn. 1530, Aud. D2, 8000 Århus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net).

VHS: Videnskabshist. Selskab, H.C. Ørsted Inst., aud. 10, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.math.ku.dk/videnskabshistorie).

Astronomisk Selskab

Universets første galakser. Undersøgelser af de tidligste og fjerneste objekter i Universet er helt essentielle for at forstå hvordan galakserne er dannet og hvilke forandringer, de har gennemgået i tidens løb. I denne foredragsrække – se kalenderen ovenfor – vil vi se nærmere på, hvordan man kan observere galakserne som de så ud for mere end 12 milliarder år siden. Det, vi kan observere i meget fjerne galakser skyldes ofte helt anderledes fysiske mekanismer end vi ser i nærmere objekter. Disse observationer viser, hvordan galakserne er opbygget og hvordan de efterhånden er blevet til de galakser, vi ser i dag.

Selskabet for Naturlærers Udbredelse

Foredragsrække med temaet "Bæredygtighed", og det spænder fra solceller til algebiomasse.

Videnskabshistorisk Selskab

Foredragene afholdes på H.C. Ørsted Instituttet i København. Kl. 16.30 byder selskabet på kaffe, te og frugt i Institut for Matematiske Fags frokoststue, rum 04.4.19 på 4. sal. Man er velkommen til at gå med ud at spise med foredragsholderen efter foredraget, på egen regning.

Noget om ellipsen

Af Mogens Esrom Larsen, Institut for Matematiske Fag, Matematisk Afdeling, Københavns Universitet

Ellipsens geometri og anvendelse i Keplers beskrivelse af planeters bevægelser og de deraf følgende Newton's love.

Ellipsen er et af de første matematiske fænomener, vi støder på allerede i barndommen. Det er nemlig typisk randen af en isvaffel. Det er ikke tilfældigt. Ellipsen er det lukkede keglesnit, altså fællesmængden mellem en *kegle* (vaflen) og en *plan* (snittet). Der er også andre keglesnit, der er ubegrænsede, nemlig parabelen og hyperblen.

Lad os nu forestille os en kegle, dvs. i rummet alle linier gennem et givet punkt og et punkt på en given cirkel. For nemheds skyld vælger vi punktet på normalen til cirkelns plan i cirkelns centrum.

Vi skærer nu keglen med en plan i en ellipse. Som en iskugle i en vaffel lægger vi en kugle, så den netop tangerer ellipsens plan i et punkt, O , og keglen i en cirkel, der er parallel med frembringercirklen for keglen. Betragt nu et vilkårligt punkt på ellipsen, P . Frembringeren gennem P skærer cirklen i punktet Q . Da PO og PQ er tangenter til kuglen, er de lige lange:

$$PO = PQ$$

Keglens frembringer danner vinklen ϕ med tan-

gentcirkelns plan, og snitplanen vinklen ψ med tangentcirkelns plan, og de to planer skærer hinanden i en linie, der kaldes *ledelinien*. Vi projicerer nu P på ledelinien i punktet L og på cirkelns plan i punktet P' . Af trekanterne $\triangle PQP'$ og $\triangle PQL$ fås

$$PP' = PQ \sin \phi$$

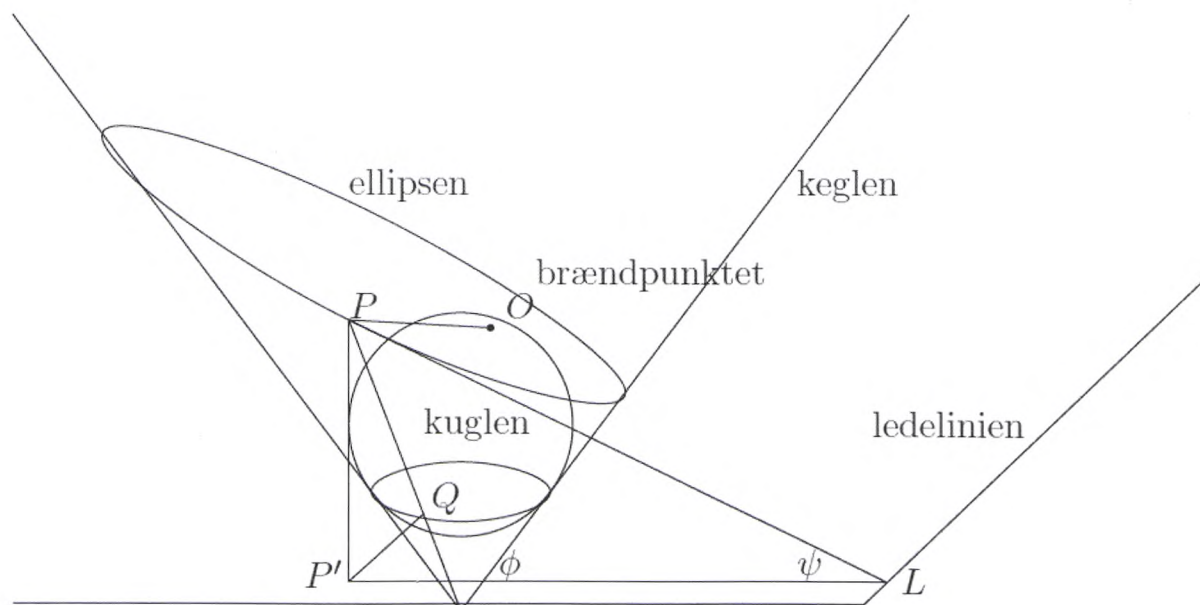
$$PP' = PL \sin \psi$$

Altså finder vi

$$PO = e \cdot PL, \text{ hvor } e = \frac{\sin \psi}{\sin \phi}$$

Faktoren e kaldes ellipsens *excentricitet*. Hvis $e = 0$ er snitplanen parallel med cirkelns plan og ellipsen udarter til en cirkel. Egentlige ellipser har $0 < e < 1$. (Tilfældet $e = 1$ giver et snit, der er parallelt med en frembringer og dermed et snit, der er en parabel.)

Vi har nu fundet den beskrivelse af ellipsen, at afstandene til brændpunktet og ledelinien har et konstant forhold.



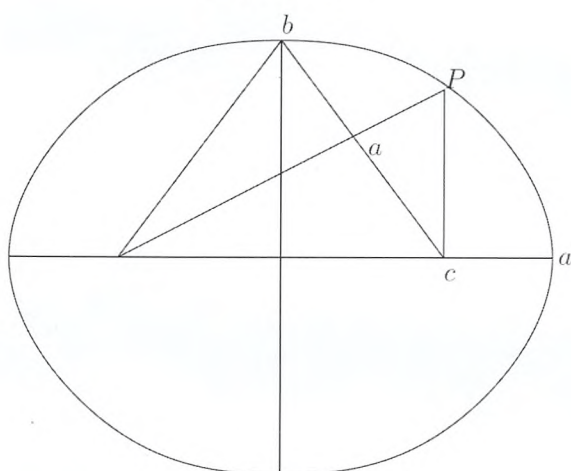
Figur 1. Ellipsen som keglesnit.

Ellipsen som projektion

Nu kan man også tænke sig en kugle oven over ellipsen, således at den også tangerer snitplanen i et punkt inden for ellipsen og keglen i en cirkel. Da vil afstandene fra P til det andet brændpunkt og til den anden cirkel også være ens. Men det betyder, at summen af afstandene til de to brændpunkter er lig med afstanden mellem de to cirkler målt ad en frembringer for keglen. Altså er denne sum konstant, lad a være det halve af denne.

Ellipsen er derfor symmetrisk. Og dens *storakse*, dvs aksen gennem brændpunkterne, er lig med $2a$. Den halve storakse er altså a , og lad den halve akse vinkelret herpå, kaldet *lilleaksen*, være b og den halve afstand mellem brændpunkterne være c . Som det fremgår af nedenstående figur er der den simple sammenhæng mellem storaksen, lilleaksen og brændpunktet:

$$b^2 + c^2 = a^2$$



Figur 2. Summen af brændstrålerne er konstant.

Ellipsens ligning

Vi lægger et koordinatsystem med origo midt mellem brændpunkterne, storaksen som x -akse og lilleaksen som y -akse. Lad nu et vilkårligt punkt, P , på ellipsen have koordinater (x, y) .

Så må de opfylde ligningen

$$\sqrt{(x-c)^2 + y^2} + \sqrt{(x+c)^2 + y^2} = 2a$$

Vi kvadrerer og isolerer det dobbelte produkt – og deler med 2 – til

$$\begin{aligned} \sqrt{(x^2 + y^2 + c^2 - 2xc)(x^2 + y^2 + c^2 + 2xc)} \\ = 2a^2 - (x^2 + y^2 + c^2) \end{aligned}$$

Vi kvadrerer og ganger ud til

$$\begin{aligned} (x^2 + y^2 + c^2)^2 - (2xc)^2 \\ = 4a^4 + (x^2 + y^2 + c^2)^2 - 4a^2(x^2 + y^2 + c^2) \end{aligned}$$

som arrangeres til

$$(a^2 - c^2)x^2 + a^2y^2 = a^2(a^2 - c^2)$$

eller kønnere

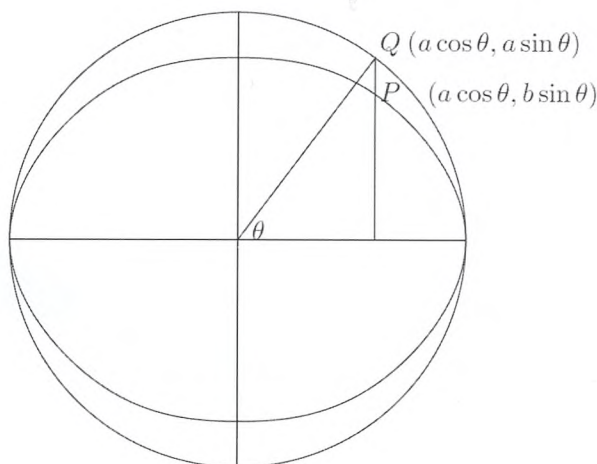
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Ellipsens parametrisering

En oplagt parametrisering af denne ligning er

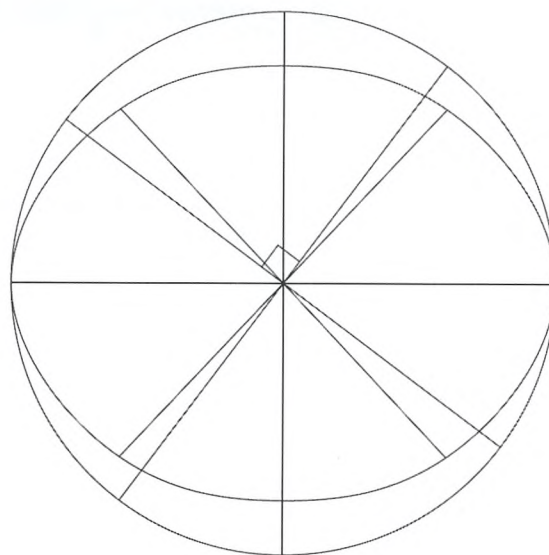
$$(x, y) = (a \cos \theta, b \sin \theta)$$

der viser ellipsen som en projektion af cirklen med radius a fra en skråplan lodret ned på en vandret plan.



Figur 3. Projektionen af en skrå cirkel.

Denne fortolkning har en charmerende konsekvens. Et par diametre i cirklen, der står vinkelret på hinanden, har egenskaber, der nedarves ved projektionen. Nemlig, at tangenterne i enderne er parallelle med den anden diameter, og at korderne, der er parallelle med den ene diameter, bliver halverede af den anden. Et sådant par af diametre i ellipsen kaldes *konjugerede*.



Figur 4. De konjugerede diametre.

Keplers første lov

Lad os nu betragte en planet, der bevæger sig om Solen i origo i de polære koordinater, som vi vil betegne med den komplekse eksponentialfunktion

$$e^{i\vartheta} = \cos \vartheta + i \sin \vartheta$$

på formen

$$z(t) = r(t)e^{i\vartheta(t)} = r(t)(\cos \vartheta(t) + i \sin \vartheta(t))$$

Keplers første lov (1609) siger, at arealet, der dækkes af brændstrålen fra Solen er proportionalt med den forløbne tid.

Arealet af brændstrålens tur fra t_1 til t_2 er

$$A(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} r^2(t) \vartheta'(t) dt$$

Altså er

$$A'(t) = \frac{1}{2} r^2(t) \vartheta'(t)$$

og

$$A''(t) = r(t) r'(t) \vartheta'(t) + \frac{1}{2} r(t)^2 \vartheta''(t)$$

Keplers første lov siger altså, at

$$A'(t) = k \quad \text{og} \quad A''(t) = 0$$

Derfor gælder, at

$$\begin{aligned} z'' &= (r'' - r(\vartheta')^2) e^{i\vartheta} + (2r'\vartheta' + r\vartheta'') i e^{i\vartheta} \\ &= (r'' - r(\vartheta')^2) e^{i\vartheta} = \frac{r'' - r(\vartheta')^2}{r} z \end{aligned}$$

da $A'' = 0$, så

$$\frac{z''}{z} = \frac{r'' - r(\vartheta')^2}{r} \in \mathbb{R}$$

Dvs at accelerationen z'' er proportional med z , altså rettet mod Solen.

Da

$$\frac{1}{2} r^2 \vartheta' = k$$

fås, at

$$z'' = \left(r'' - \frac{4k^2}{r^3} \right) e^{i\vartheta}$$

Newtons lov

Når planeten følger ellipsen, får vi af ligningen ovenfor

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \vartheta}$$

at

$$r' = \frac{pe \sin \vartheta}{(1 + e \cos \vartheta)^2} \vartheta' = \frac{pe \sin \vartheta}{(1 + e \cos \vartheta)^2} \cdot \frac{2k}{r^2} = \frac{2ek \sin \vartheta}{p}$$

hvoraf

$$r'' = \frac{2ek \cos \vartheta}{p} \vartheta' = \frac{2k \left(\frac{p}{r} - 1 \right)}{p} \cdot \frac{2k}{r^2} = \frac{4k^2}{r^3} - \frac{4k^2}{pr^2}$$

som indsat i z'' giver Newtons (Isaac Newton 1642–1727) lov (1686)

$$z'' = -\frac{K}{r^2} e^{i\vartheta}$$

hvor $K = \frac{4k^2}{p}$.

Ellipsens areal er $\pi ab = kT$, hvor T er omløbstiden. Altså er

$$k = \frac{\pi ab}{T}$$

så da $p = \frac{b^2}{a}$, finder vi

$$K = \frac{4k^2}{p} = \frac{4\pi^2 a^2 b^2 a}{T^2 b^2} = \frac{4\pi^2 a^3}{T^2}$$

Keplers anden lov (1609) siger, at K er den samme for alle planeter.

PS

Tillad mig en personlig kommentar. I forbindelse med Tor Nørretranders (1955–) "Mindship" i 1996 blev en af hans foredragsholdere inviteret til at optræde i den nystartede TV-kanal DR2. De ville have ham til at forklare Gödels (Kurt Gödel 1906–78) sætning om, at et aksiomsystem, der er stærkt nok til at kunne definere de naturlige tal, ikke kan bevises at være modsigelsesfrit. Det ville han ikke, fordi det var hans erfaring, at det gik hen over hovedet på næsten ethvert publikum. Nå, så ringede redaktøren til Matematisk Institut og fik fat i mig, – de fleste var gået hjem fredag eftermiddag, – som brugte en halv time på at forklare, hvor enig jeg var i, at jeg heller ikke kunne forklare resultatet på 5 minutter. Ikke desto mindre fik de om aftenen lyst til hente mig ind til en 5 minutters indledning om matematik i almindelighed i form af et interview.

Normalt aftaler man spørgsmålene forud, men efter de aftalte spørgsmål kom det uvarslede: "Hva' nyt er 'et te'?" Der blev ellipsen min redning, fordi jeg kunne fortælle, at den havde været ren matematik i 2000 år, men med Kepler og Newton blev beskrivelsen af planeters og satellitters baner.

Så uden den var der ingen, der kunne modtage DR2s signaler!

Litteratur

- [1] Vagn Lundsgaard Hansen (1992), Temaer fra geometrien, Matematiklærerforeningen.



Mogens Esrom Larsen er tidligere lektor i matematik på Københavns Universitet og har været redaktør ved Kvant siden starten.

Søges: SUSY-partikler og mørkt stof

De første års eksperimenter ved Large Hadron Collider ved CERN tyder på, at den famøse "Higgs-boson" faktisk findes i virkeligheden (se artiklen af Stefania Xella inde i bladet).

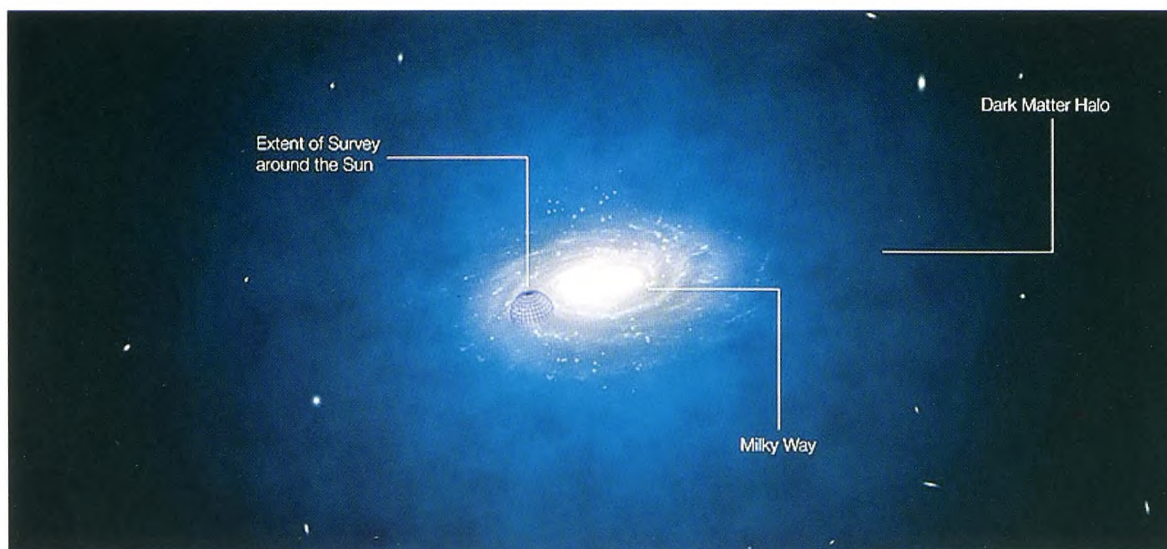
Et team af erfarne partikelfysikere [1] mener, at opdagelsen af Higgs-bosonen blot vil repræsentere "toppen af isbjerget" af det supersymmetriske stof, som forudsiges af supersymmetri (SUSY). Howard Baer fra Oklahoma Universitetet, der har forsket i supersymmetri i 25 år, uddyber dette, "Vi taler om det næste lag af naturlovene. Hvis SUSY eksisterer, vil vi finde superpartnere, som vil give et nyt perspektiv på Universets oprindelse og udvikling. I den forstand er vi på vej til at opnå en dybere forståelse af naturen" [1].

Der er store forhåbninger om, at SUSY-partikler kan forklare det mørke stof, som ifølge astronomerne kun viser sig gennem sin tyngdekraft, men som ikke vekselvirker med lys. Disse egenskaber har de hypotetiske SUSY-partikler. Eksperimenterne ved LHC har dog endnu ikke set tegn på SUSY-partikler, men det er for tidligt at udelukke, at de eksisterer. I de næste tre år kører acceleratoren ved

højere energi, hvilket forhåbentlig er nok til, at afgøre om SUSY-partikler eksisterer eller ej.

Astronomerne vurderer, at det mørke stof i galakser og galaksehobe vejer ca. fem gange så meget som det lysende stof i stjerner og gasskyer. Mælkevejens hurtige rotation kan ikke forklares i detaljer uden det mørke stof, som man antager er fordelt i en mørk halo omkring vores galakse (se figur 1). I Solens omegn burde der derfor være mellem 0,4-1,0 kg mørkt stof i rummet i et rumfang svarende til Jordens rumfang. Det kan derfor undre, at nye målinger [2] af bevægelsen af 400 stjerner i Solens omegn (op til 13.000 lysår fra Solen), ikke viser tegn på noget mørkt stof af betydning (der er under 0,07 kg i et rumfang som Jordens). Dette resultat kan kun forklares med en meget usandsynlig fordeling af det mørke stof. Problemet kan måske løses med mere nøjagtige målinger af et større antal stjerner i Mælkevejen. Dette vil ske med Gaia-satellitten, som opsendes af ESA næste år.

Gåden om det mystiske mørke stof – hvis det findes – er blevet endnu mere mystisk.



Figur 1. En kunstners indtryk af Mælkevejen, hvor den blå halo illustrerer den forventede fordeling af det mystiske mørke stof, der omgiver vores galakse. Nye målinger, baseret på stjerners bevægelser, viser, at mængden af mørkt stof i det undersøgte område omkring Solen er langt mindre end forventet og peger på, at der overhovedet ikke er noget mørkt stof i vores nabolag. Den blå kugle, der er centreret omkring Solens position, viser den omtrentlige størrelse af det undersøgte område, men ikke dets præcise form (ESO).