

---

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 25. årgang

---

## TEMA: CERN 60 ÅR

- CERN BLIVER 60 ÅR
- FREMTIDIGE ACCELERATORER
- PÅ STUDIETUR TIL CERN
- OPDAGELSEN AF HIGGSEN OG HVAD FREMTIDEN BRINGER
- AMPLITUDER OG NYE FUNDAMENTALE TEORIER
- CENTRIFUGE OG TEHVIRVEL – BREDDEOPGAVER
- JORDSKÆLVSRISIKO I DANMARK?
- SNU OG UNF FEJRER JUBILÆUM
- SUPERNOVA I MESSIER 82
- 2015 BLIVER LYSETS ÅR
- KVANT-NYHEDER



YEARS/ÅRS CERN



# KVANT

## Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk)  
E-mail : [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk)  
Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/KVANT.fysiktidsskrift)  
ISSN (trykt) : 0905-8893  
ISSN (web) : 2245-4942

### 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](mailto:astro@kvant.dk)),  
Astronomisk Selskab  
Sven Munk (nyhedsredaktør)  
John Rosendal Nielsen,  
Aurehøj Gymnasium  
Jens Olaf Pepke Pedersen,  
DTU Space  
Finn Berg Rasmussen,  
Niels Bohr Institutet, KU  
Svend Erik Rugh  
Torben Westerberg (korrektur)

### 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 Christine Pepke Pedersen: [christine@kvant.dk](mailto:christine@kvant.dk) (tlf. 27 51 01 76).

### 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 på: [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk) (tlf. 22 67 26 42).

### Tryk

HCB Tryk ApS, Brønderslev.  
Oplag: 2800.

### Produktionsplan

Nr. 3-14 udkommer ca. 15. september  
Nr. 4-14 udkommer ca. 15. december  
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

## Indhold:

Temanummer om CERN

|                                                                                                                  |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <i>Børge Svane Nielsen</i> . . . . .                                                                             | 3        |
| CERN bliver 60 år<br><i>Peter H. Hansen</i> . . . . .                                                            | 4        |
| KVANT siger farvel til Lene<br><i>Jens Olaf Pepke Pedersen</i> . . . . .                                         | 7        |
| Opdagelsen af Higgsen og hvad fremtiden bringer<br><i>Troels C. Petersen</i> . . . . .                           | 8        |
| KVANT-nyheder<br><i>Sven Munk</i> . . . . .                                                                      | 12       |
| Amplituder og Nye Fundamentale Teorier<br><i>N. Emil J. Bjerrum-Bohr</i> . . . . .                               | 14       |
| Foreningsnyt – foredrag i efteråret 2014 . . . . .                                                               | 18       |
| Annoncer: SDU Science Camp og IDA . . . . .                                                                      | 19       |
| Centrifuge og tehvirvel – breddeopgave 58 og 59 med didaktisk kommentar<br><i>Jens Højgaard Jensen</i> . . . . . | 20       |
| På studietur til CERN<br><i>Michael Cramer Andersen og 2x på Christianshavns Gymnasium</i>                       | 22       |
| Fremtidige accelerators<br><i>Mogens Dam</i> . . . . .                                                           | 24       |
| Supernova i Messier 82<br><i>Michael Quaade</i> . . . . .                                                        | 29       |
| Jordskælvsrisiko i Danmark? – forslag til fremtidige studier<br><i>Søren Gregersen</i> . . . . .                 | 30       |
| 2015 bliver lysets år<br><i>Jørgen Schou</i> . . . . .                                                           | 35       |
| SNU og UNF fejrer jubilæum den 19. august 2014 på DTU<br><i>SNU og UNF</i> . . . . .                             | Bagsiden |

**Billedet på forsiden** viser udsigten (fra nordvest) over området hvor det europæiske partikelfysikcenter CERN ligger. De nærmeste gule ringe viser hvor de nuværende accelerators ligger (efter størrelse: PS, SPS, LEP/LHC). Den største ring viser den mulige afløser, "Future Circular Collider" (FCC), der har en omkreds på 80-100 km og omringer Salave-bjergene.



Dette nummer af KVANT markerer 60-året for CERN med fire temaartikler, der omtaler hhv. CERNs historie, forskning i tilknytning til CERN samt fremtidige accelerators. Derudover er der friske indtryk fra CERN, skrevet af elever der besøgte stedet på en studietur. Billedkredit: Jörg Wenninger, CERN Beams Department Operation group – LHC.

KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, 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) og DTU Nanotech.

# Temanummer om CERN

Af Børge Svane Nielsen, Discovery Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Den 29. september er der inviteret til fødselsdagsfest på det europæiske forskningscenter for partikelfysik, CERN, på grænsen mellem Schweiz og Frankrig. Organisationen bag CERN fylder 60 år. Det fejres ved at indbyde statsoverhoveder fra alle medlemslandene og ved i løbet af året at lave en række arrangementer rundt omkring i Europa. Dette nummer af KVANT er med en række artikler med relation til CERN og partikelfysik et bidrag til festen.



Nogle visionære videnskabsmænd (ja, de var alle mænd) indså efter 2. verdenskrigs afslutning, at det ville være en rigtig god idé at samle europæisk kerneforskning til fredelige formål i et fælles laboratorium med grundforskning baseret på partikelacceleratorer. Vores egen Niels Bohr var blandt de varmeste fortalere. Ud over de tekniske og forskningsmæssige udfordringer var det en chance for at samarbejde mellem fysikere fra tidligere fjendtlige nationer og dermed bidrage til afspændingen i det nye Europa.

Både forskningsresultaterne i de seks årtier og det nære samarbejde blandt forskerne har bevist, hvor rigtig idéen var. Organisationen er siden dens start udvidet fra 11 europæiske medlemsstater til 21 i dag. Dertil kommer en række associerede lande og samarbejdspartnere fra hele verden, heriblandt USA, Canada, Rusland, Japan, Indien, Kina og Brasilien. På CERN møder man nu udover europæiske fysikere også kolleger fra alle andre kontinenter (minus Antarktis), og i kantinen kan man møde nobelpristagere, en travl generaldirektør, fysikerkolleger og venner fra hele verden og hundredvis af studerende, hvor de deltager i det yderst populære sommerstudentprogram. Jeg vil vove den påstand, at der næppe findes en mere inspirerende arbejdsplads.

I de sidste år er interessen for CERN i offentligheden øget kraftigt, ikke mindst takket være opstarten af verdens ubetinget største partikelaccelerator, Large Hadron Collider (LHC), og spektakulære opdagelser som Higgs-partiklen og Big Bang relaterede resultater (kvark-gluon plasma). I dette nummer af KVANT kan man læse om CERNs historie og nogle aktuelle artikler om partikelfysik. Der er også en artikel om de tanker, der rører sig omkring nye acceleratorer og eksperimenter, man forestiller sig, når LHC engang om ca. 20 år får brug for en afløser.

Den offentlige interesse viser sig ved en lang række af besøgende grupper, som arrangerer studieture og private besøg. Ingen rejser hjem fra CERN uden en

oplevelse og bedre forståelse for højteknologisk forskning i stor skala. Mange skoleklasser har i løbet af det sidste års tid benyttet chancen for at komme ned til de underjordiske haller, fordi acceleratorkomplekset er nedlukket indtil slutningen af i år som led i en ombygning, der skal give højere kollisionsenergi fra 2015. I dette blad finder man en artikel fra et besøg af en gymnasieklasse fra København. For et år siden arrangerede vi en tur for dansk presse fra radio og skrevne medier. Det resulterede i en radioudsendelse og mange artikler i landsdækkende aviser og internetmedier. I efteråret holdt CERN åbent hus i en weekend og man regner med at 70.000 mennesker besøgte stedet, flest fra lokalområdet. Successen var så stor, at den måtte suppleres med endnu en weekend her i foråret specielt for beboere i kommunerne omkring CERN. Interessen for at se faciliteterne og møde forskerne er overvældende, og med de mange besøg følger også en fornyet interesse for den fysik, der udforskes, og grundvidenskab i almindelighed.

Idéen bag CERN som fælleseuropæisk forskningscenter var visionær og den nu 60-årige fødselar kan se tilbage på en stribe af forskningsmæssige og tekniske succeser. Perioden svarer næsten præcist til den årrække, hvor partikelfysikkens standardmodel med kvarker og tilhørende kræfter blev udviklet og testet i alle ender og kanter. CERN ikke bare deltog i denne forskningsudfordringer, man bidrog også meget væsentligt, ikke mindst med opdagelsen af neutrale svage vekselvirkninger, beviserne for kvark-kvark sammenstød, opdagelsen af W- og Z-partiklerne og en imponerende række præcisionsmålinger ved LEP-acceleratoren. Dertil kommer så i de senere år opdagelsen af Higgs-partiklen og fremstilling af og præcisionsmålinger på anti-brint. Dertil må man lægge de tekniske innovationer, der er kommet ud af laboratoriet, som har resulteret i bedre skannere og stråleterapi på hospitalerne, store fremskridt indenfor vakuumteknik og superledning, samt ikke mindst opfindelsen af vores allesammens World Wide Web. Jo, der er bestemt god grund til at indbyde verden til 60-års fest i september og fejre det med dette temanummer af KVANT. God læsning!



Børge Svane Nielsen arbejder som lektor i High Energy Heavy Ion (HEHI) gruppen på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Han har i en menneskealder været tilknyttet CERN som eksperimentalfysiker, hvor han tilegnede sig sin ekspertise i partikeldetektorer. Han er nu tilknyttet ALICE-eksperimentet ved LHC med hovedansvar for gruppens hardware-indsats.

# CERN 60 år

Af Peter H. Hansen, Discovery Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

CERN står for Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. Organisationen blev officielt indviet med en traktat mellem 11 europæiske lande, heriblandt Danmark, i 1954 og har således rund fødselsdag i 2014. Traktaten siger blandt andet at organisationen skal tilvejebringe europæisk samarbejde i kerneforskning af ren videnskabelig og fundamental karakter, og at forskningen skal være offentligt tilgængelig og fremme europæisk samarbejde.

Ordet “Nucléaire” refererer til atomkernen. I dag er det snarere *bestanddelene* af atomkernen som CERN har i fokus og organisationen betegnes da også som “Det europæiske center for partikelfysik”, men missionen er ellers den samme som beskrevet i traktaten fra 1954.



**Figur 1.** Den tredje session af provisoriske CERNs Council i 1952. Niels Bohr ses ved bordet til venstre. Her vedtog man en provisorisk start af laboratoriet (CERN).

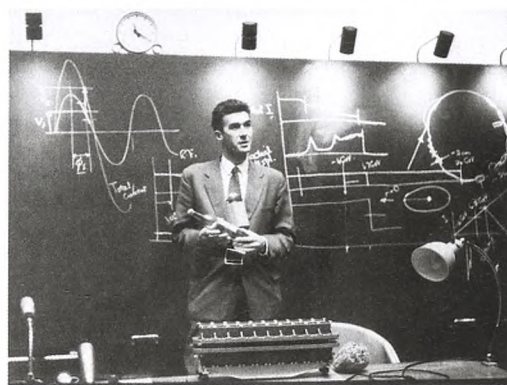
Bestræbelserne for at skabe en sådan organisation startede kort efter anden verdenskrig hvor Europæisk videnskab var ramt af “hjerneflugt”, dvs. udvandring af de bedste forskere til USA. Et land som Italien var særligt hårdt ramt. For eksempel var en af de monumentale skikkelser i Europæisk fysik, Enrico Fermi, flyttet til Chicago hvor han blandt andet byggede den første atomreaktor.

En række fremsynede europæiske fysikere, især franske Pierre Auger, begyndte derfor umiddelbart efter krigen at agitere for at skabe et europæisk laboratorium for fundamental atomforskning. Niels Bohr og hans nære ven, hollandske Hans Kramers, støttede op, men havde et lidt andet syn på projektets karakter. Hvor franskmændene og italienerne mest så det som et politisk projekt, så betonedes Bohr og Kramers det som et videnskabeligt projekt som burde vokse op i et allerede eksisterende videnskabeligt miljø. De foreslog København, og dette forslag blev i starten støttet af Sverige, Storbritannien og Tyskland. I sidste ende var Danmark dog for meget “udkants-Europa”. Det europæiske laboratorium blev vedtaget af de 11 grundlæggere af CERN (med en aktiv og uselvsk støtte fra USA) og placeret i Geneve [2-5]. Som et plaster på såret fik København til opgave at huse CERN’s teoretiske division i de første år indtil laboratoriet var bygget færdigt. For fortsat at opretholde en central rolle i fysisk videnskab skabte de

nordiske lande så i 1957 et nordisk institut for teoretisk fysik, NORDITA, som indtil 2007 lå på Blegdamsvej i København og nu ligger i Stockholm (ved siden af det smukke Alba Nova fysikinstitut tegnet af Henning Larsen).

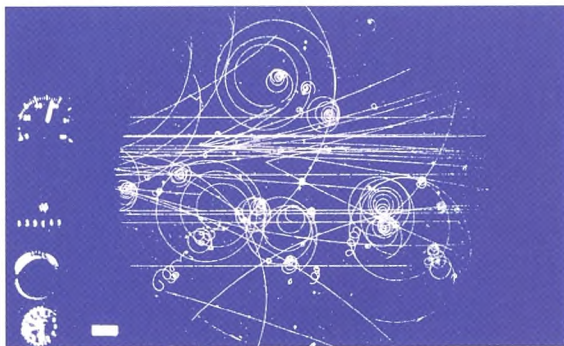
## De første accelerators (1955-1970)

CERNs første accelerator var “synchro-cyclotronen”. Den fik dog hurtigt (november 1959) selskab af “proton synchrotronen” (PS), som var en revolution indenfor acceleratorteknologi. Det var en “stærkt fokuserende synchrotron”, hvor en stråle af ladede partikler bliver holdt sammen i et smalt ringformet vakuumrør af flere par af “kvadrupol” magneter, der virker som skiftende sprede- og samlelinser i de to retninger vinkelret på strålen. Netto virker de fokuserende i begge retninger. Selve accelerationen leveres af en høj vekselspænding i et hulrum af kobber placeret i ringen. Dipol magneter sørger for at holde strålen i ringen således at hulrummet passeres igen og igen, og accelerationen fortsætter indtil den maksimale dipol feltstyrke er nået. PS kunne levere en intens stråle af protoner, hver med en energi på 28 GeV, svarende til at protonen er accelereret gennem et spændingsfald på 28 milliarder volt. Ganske typisk for CERN var maskinen mekanisk set “overdesigned”, således at PS i dag stadig kan fungere som arbejdshest i CERNs accelerator-kompleks, men med mange tusinde gange højere stråleintensitet end dengang.



**Figur 2.** John Adams var CERNs store ingeniør. Han ledte bygningen af CERNs første accelerators og tjente også som generaldirektør i to år. Læg mærke til tavlens øvre venstre hjørne. Her vises accelerationsspændingen og det ses at langsomme partikler bliver accelereret mere end middel og hurtige partikler mindre end middel, så strålen i alt bliver “bundtet” og holdt sammen. Se også den tomme vodkaflaske. Den var blevet tømt af russiske fysikere i sorg over at CERN nu havde passeret russernes hidtidige energirekord (CERN).

Fysikerne rettede i 1960'erne strålen mod "boblekammer" af flydende brint. Bobler, som starter langs de herved skabte partiklers bane, blev omgående fotograferet og den begyndende kogning klart (heldigvis) ved hver passage af et strålebundt.



**Figur 3.** Foto fra 1960 af CERNs 32 cm flydende brint boblekammer. Protoner med 28 GeV energi kommer ind fra venstre og ses som parallelle stråler. Man ser også en inelastisk kollision med en af brintens protoner og et "V" som skyldes en "Lambda" partikel, dvs en neutron hvor en down kvark er skiftet ud med en strange kvark. Spiralerne er elektroner som er blevet revet løs fra deres brintatomer. Partiklernes krumning skyldes et magnetfelt vinkelret på billedets plan (CERN).

Herved opdagede man at protonen og andre hadroner (partikler som følger den stærke kernekraft) ikke er fundamentale punktformede partikler, men er sammensatte partikler med en udstrækning på ca.  $10^{-15}$  m. Det ledte til *kvarkmodellen* for hadronerne. Et andet boblekammer, *Gargamelle*, førte endvidere til den første observation af såkaldte "neutrale strømme", en afgørende forudsigelse af den teori for elementarpartiklerne, som senere skulle gå under navnet "Standardmodellen".

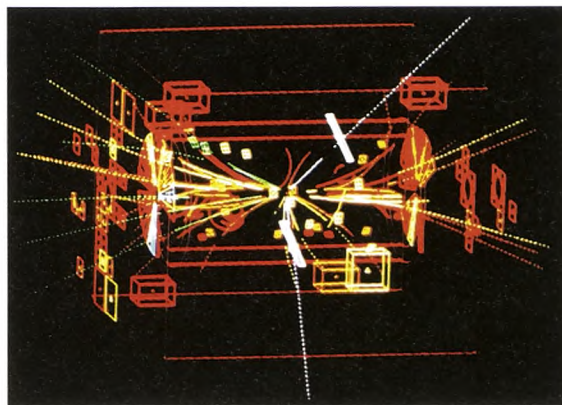
### De første kollisionsmaskiner (1971-1988)

Den næste accelerator stod klar i 1971. Den hed ISR, Intersecting Storage Rings, og var igen totalt revolutionerende, idet den skød to protonstråler med hver 31 GeV energi frontalt sammen i stedet for at skyde én stråle ind i et stillestående mål. Herved kan al energien bruges til at skabe nye partikler i stedet for at bruge det meste til at bevare impulsen i sammenstødet. Teknisk set var denne lagring endnu mere krævende end de tidligere accelerators, og meget af den grundlæggende ingeniørkunst til opbygningen af den senere LHC blev udviklet ved ISR.

I protonsammenstødene ved ISR så man partikler blive udsendt med usædvanligt store vinkelafbøjninger. Det gav mindelser om Ernest Rutherford, som i 1911 så lignende store afbøjninger af alfapartikler når de ramte et guldfolie. Rutherford konkluderede dengang at der måtte være en lille hård kerne i midten af et atom, og det var netop afsættet for Bohrs atommodel fra 1913. På samme måde var observationerne fra ISR, hvor Danmark spillede en stor rolle, endnu et vigtigt bevis for kvarkmodellen: Der er små hårde "gryn" inde i protonen.

Næste trin på raketten var CERNs Super Proton Synchrotron (SPS) fra 1976. Den er 7 km i omkreds,

bliver fodret med protoner fra PS og accelererer dem fra 28 GeV videre op til 450 GeV. I modsætning til ISR har SPS kun ét strålerør og kan derfor ikke kolliderer protonstråler. Imidlertid fik CERN-fysikerne Carlo Rubbia og Simon van der Meer ført en genial ide ud i livet, nemlig at have protoner og *antiprotoner* cirkulerende hver sin vej i *samme rør* og samme magnetfelter. For at få tilstrækkeligt mange sammenstød måtte man først *køle* antiprotonerne og Simon van der Meer opfandt hertil "stokastisk køling". Hermed kunne man opnå kollisioner ved en tilstrækkelig høj energi og intensitet til at producere de længe eftersøgte, men tunge, W- og Z-partikler. Også i disse bestræbelser deltog danske fysikere meget aktivt.



**Figur 4.** Opdagelsen ved CERN af W- og Z-partiklerne var uhyre vigtig. Disse partikler er forudsagt i "Standardmodellen" hvor de udfylder rollen som formidlere af den svage kraft, som er ansvarlig for visse former for radioaktivitet og afgørende for Solens energiproduktion. Billedet viser den første registrerede Z-partikel (CERN).

For dette blev CERN langt om længe belønnet med Nobelprisen (se figur 5), der ellers havde haft for vane at gå til amerikanerne. Senere blev også CERNs Georges Charpak belønnet med Nobelprisen for hans opfindelse af de "multiwire proportional chambers", som nu var blevet et standardredskab til at detektere de ladede partikler.



**Figur 5.** Carlo Rubbia og Simon van der Meer bliver fejret ved CERN efter de blev tildelt Nobelprisen (CERN).

## Den store ring (1989-nu)

For at studere de ny-fundne W- og Z-partikler i detaljer gav CERN sig i kast med et gigantisk konstruktionsprojekt, nemlig "Large Electron-Positron collider" (LEP), der krævede en boret tunnel, med en omkreds på 27 km, ca. 100 meter under jorden (se figur 6). Boringen var Europas største før kanal-tunnelen mellem England og Frankrig. Den startede i 1985 og var overstået i 1988. Ringen var en perfekt cirkel idet den skulle fyldes med magneter og superledende accelerations-hulrum positioneret med 0,1 mm nøjagtighed.

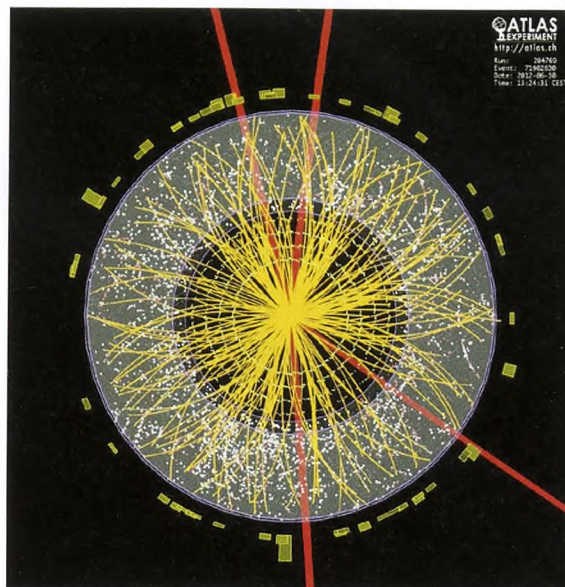
Allerede de første kollisioner i 1989 mellem ringens cirkulerende elektroner og positroner bragte et fundamentalt resultat, nemlig at der findes netop 3 "generationer" af elementarpartikler og i de følgende 12 år blev *Standardmodellen*, teorien bag W- og Z-partiklerne, udsat for et sandt tredjegradsforhør ved LEP. Teorien bestod med glans. Men den havde et "missing link". For at give masse til elementarpartiklerne, specielt til de tunge W- og Z-partikler, er der brug for en mekanisme der bryder teoriens egen symmetri. En manifestation af den mekanisme som teorien foreslår er den såkaldte Higgs partikel. Den er imidlertid uhyre god til at skjule sig og undslap da også opdagelse, selv ved den formidable LEP-maskine.



**Figur 6.** LEP tunnelen under udboring. Den stod færdig i 1988. Tunnelprojektet var Europas største og udført med uhørt præcision. Tunnellen husede LEP acceleratoren i 12 år og blev herefter overtaget af LHC acceleratoren (CERN).

Der skulle altså et kraftigere mikroskop til. Det kom med CERN's LHC accelerator der i dag huses i tunnelen bygget til LEP. LHC har to strålerør og magneterne er superledende så de kan holde protoner med op til 7000 GeV på plads i rørene. LHC leverede sine første proton-kollisioner i 2010 og den 4. juli 2012 kunne fysikerne offentliggøre opdagelsen af Higgs-partiklen. Opdagelsens vigtighed blev smukkeste udtrykt af *The Economist*: "Historical events recede in importance with every passing decade [...] The laws of physics, though, are eternal and universal. Elucidating them is one of the triumphs of mankind. And this week has

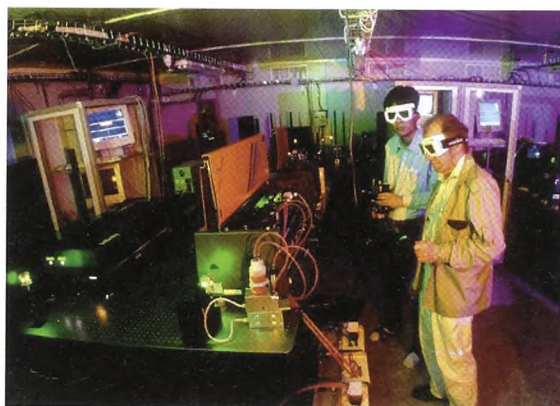
seen just such a triumph." To af fædrene til teorien om Higgs partiklen, Peter Higgs og Francois Englert blev belønnet med Nobelprisen i 2013.



**Figur 7.** En protonkollision i LHC. Begivenheden er en kandidat til et henfald af en Higgs boson til Z-bosoner, der så igen hver henfalder til et par af myoner (CERN).

## Non-LHC programmet og teknologisk spin-off

CERNs acceleratorkompleks giver muligheder for en rig buket af undersøgelser med sit såkaldte "fixed target" program, der rækker langt ud over hvad LHC kan tilbyde. I dette program spiller især kollegerne fra Aarhus en ledende rolle (se figur 8). Både PS og SPS bruges, ud over at injicere protoner i LHC, til en lang række fixed target eksperimenter der studerer fx neutrinoer, sjældne henfald og endda klimaspørgsmål.



**Figur 8.** Aarhus Universitet spiller en ledende rolle i flere "fixed target" eksperimenter. Fotoet er fra et eksperiment, der blandt andet eftersøger forskelle mellem brint og anti-brint. Forskelle, som – hvis de bliver observeret – vil vende op og ned på alle teorier (CERN).

Hertil kommer ISOLDE-faciliteten der skaber stråler af kort- og langt-levende isotoper til brug for kernefysiske, astrofysiske, biokemiske og materialevidenskabelige formål. En anden del af strålerne fra PS bruges til at producere antiprotoner som sendes til Antiproton-Deceleratoren. Her køles de ned indtil de kan fanges

i en fælde og kombineres med positroner til antibrint atomer. Disse atomer bruges til helt fundamentale undersøgelser af antistof, men faciliteten kan også bruges til terapi af meget specielle cancer-tilfælde. Endeligt omfatter komplekset en facilitet, n-TOF, undersøgelser omkring en underkritisk reaktor, som potentielt kunne løse vores problemer med energiforsyning og klima.

Den stadige udvidelse af de teknologiske grænser for erkendelse af materiens inderste partikler og principper har ført til mange opfindelser af banebrydende karakter for den generelle teknologiske udvikling i samfundet. Det gælder ting som generel accelerator-teknologi, ultra-højt vakuum, superledende magneter og accelerations-hulrum, NMR spektrografi, "World Wide Web", "GRID computing", strålingsdetektorer til medicinske formål, statistisk-matematiske redskaber og meget andet.

Således slutter en kort historie om følgerne af Niels Bohrs og andres "lobbyarbejde" for at skabe et fælles europæisk laboratorium på ruinerne fra anden verdenskrig. CERN er i dag verdens ledende laboratorium og et skoleeksempel på at europæisk samarbejde faktisk kan lede til fremragende og meget håndgribelige resultater. Derfor er der grund til at ønske organisationen hjerteligt tillykke med fødselsdagen.

Denne artikel er en bearbejdet udgave af [1].

## KVANT siger farvel til Lene

Kvants forretningsfører, Lene Körner, har ved årsskiftet ønsket at blive afløst på posten. Dermed slutter en hel epoke i Kvants historie, for Lene har om ikke være lig med Kvant så dog været en central del af Kvant næsten siden starten og i hvert fald så længe, at ingen i redaktionen længere præcist kan huske hvornår. I Kvant-udgaverne fra 1992 kan man dog læse, at man skal henvende sig til Lene, hvis man ønsker at abonnere på bladet, og sådan har det været i de forløbne cirka 22 år.

Kvant startede som et samarbejde mellem Dansk Fysisk Selskab og Selskabet for Naturlærens Udbredelse, og siden har Astronomisk Selskab og Dansk Geofysisk Forening også valgt at bruge Kvant som medlemsblad. Desuden har vi fra starten – takket være bidrag fra en række naturvidenskabelige institutter – kunnet sende Kvant gratis til gymnasier, seminarer, HTX-kurser mm. Der har således været ganske mange abonnenter at holde styr på med ind- og udmeldelser, flytninger, betalinger, og ikke mindst postvæsenets skiftende luner, for heldigvis er abonnenterne gode til at klage, hvis de ikke har fået deres Kvant-blad.

Udover at holde styr på abonnenterne, har Lene også passet Kvants regnskaber. Udviklingen har betydet, at der ikke længere skal sendes håndskrevne girokort ud til abonnenterne, så Lene har måttet vænne sig til, at Kvant gik over til en webbaseret betalingsservice. På ét punkt har Lene dog været ganske upåvirket af den teknologiske udvikling, idet hver eneste postering gennem alle årene er blevet registreret i sirligt håndskrevne kolonnebøger.

Jeg har selv haft fornøjelsen af at arbejde sammen med Lene de sidste 15-16 år, og på sin stille humoristiske måde har Lene omhyggeligt sørget for, at der altid var styr på abonnenter og regnskaber. I håb om at der blandt de ældre redaktionsmedlemmer måske gemte sig nogle underholdende historier fra de tidlige år, har jeg forsigtigt prøvet at udspørge

## Litteratur

- [1] Peter Hansen (2013), Niels Bohr og CERN, artikel i: Niels Elbrønd Hansen og Henry Nørgaard (red.), Naturvidenskab for alle – Niels Bohrs atomteori 1913-2013, Fysikforlaget 2013.
- [2] En spændende og let tilgængelig historisk diskussion af CERNs tilblivelse kan findes i Gunver Lystbæk Vestergård, CERN syd for Valbyparken, Weekendavisen – Ideer, den 6. september 2013.
- [3] En kort oversigt over CERNs historie findes på <https://home.web.cern.ch/about>
- [4] Et smukt illustreret værk, der markerede 50-året: "Infinitely CERN". CERN and Editions Suzanne Hurter, 2004, ISBN 2-940031-33-7.
- [5] Et stort professionelt værk: "History of CERN", er samlet i tre bind af forlaget North-Holland. Nogle artikler er elektronisk tilgængelige fra CERN. En dybtgående redegørelse for bl.a. Bohrs rolle i CERN's tilblivelse kan bl.a. findes i J. Kriges artikler.



*Peter H. Hansen* er professor ved Niels Bohr Institutet. Han har arbejdet i USA med elastisk protonspredning, siden ved CERNs SPS collider, som opdagede W- og Z-bosonerne, herefter ved LEP med fokus på hadronfysik og afprøvning af den elektrosvage teori og nu ved ATLAS-eksperimentet ved LHC, hvor han beskæftiger sig med rekonstruktionen af ladede spor i den indre detektor.

Finn Berg Rasmussen, som ikke har kunnet bidrage. Deri ligger ifølge Finn dog også et implicit udsagn om, at Lene har passet tingene så godt, at "der har ikke været noget at bemærke", som det hedder på revisorsprog.



Det omvendte er dog ikke tilfældet – ifølge Lene blev hun introduceret til Kvants regnskaber efter at hun en dag gik forbi Finn i vandrehallen på HCØ og han i forbifarten stak hende en bunke bilag med en bemærkning om, at det kunne hun vel lige kigge på. Derefter var hun i gang med arbejdet.

Lene slipper dog ikke det naturvidenskabelige miljø helt, idet hun fortsat tager sig af regnskabsførelsen for Selskabet for Naturlærens Udbredelse og i øvrigt også på deltid som regnskabsmedarbejder på KU's Science Fakultetssekretariat.

*Jens Olaf Pepke Pedersen*  
medlem af KVANTs redaktion siden 1998

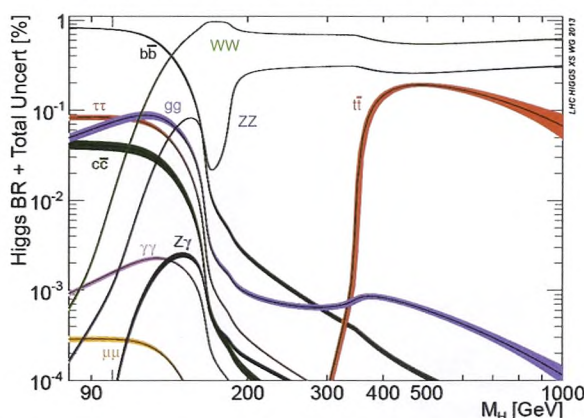
# Opdagelsen af Higgsen og hvad fremtiden bringer

Af Troels C. Petersen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Opdagelsen af Higgs-partiklen den 4. juli 2012 af ATLAS- og CMS-eksperimenterne ved CERN var den foreløbige kulmination på næsten et halvt århundredes jagt på én af de mest centrale udfordringer i vores forståelse af de fundamentale naturlove. Siden da har mere data og forbedrede analysemetoder slået fast, at det observerede signal rent faktisk ligner den Higgs-partikel, som Standardmodellen (SM) forudsagde. Til gengæld har der ikke været nogen tegn på fysik ud over Standardmodellen til trods for, at man har søgt intensivt efter tegn på ny fysik. Jagten har givet en masse udelukkede muligheder, som får én til at overveje, hvilke yderligere naturlove Universet har valgt, og om disse overhovedet kan opdaget ved LHC. Men LHC-acceleratoren har foreløbig kun leveret 2 % af det forventede antal proton-kollisioner og disse "kun" ved halvdelen af LHCs designenergi på 14 TeV. Næste år genstarter LHC ved den dobbelte energi, og dermed fortsætter jagten på nye partikler og fænomener, som måske kan forklare hvad fx det mørke stof i Universet består af og hvorfor der er mere stof end antistof.

Standardmodellen har siden dens gradvise tilblivelse vist sig at være en virkelig god model for Universets fundamentale love, og den har vist sig at stemme overens med alle de partikelfysikseksperimenter vi hidtil har udført. Men det var fra starten af klart, at der manglede en grundlæggende ingrediens, nemlig en mekanisme der tillod, at elementarpartikler havde masse, ligesom man kunne se, at de havde!

Higgs-mekanismen blev det første bud på en sådan forklaring, men der blev siden foreslået utallige andre mulige løsninger (et bud på antallet af artikler er mellem 300-600), som både var variationer af det oprindelige tema (fx "Little Higgs"), men også radikalt andre løsninger (fx "Technicolor"). Men noget skulle der findes for at udfylde denne sidste brik i Standardmodellen.



**Figur 1.** Figuren viser hvad SM-Higgs-partiklen henfalder til som funktion af dens masse. Generelt henfalder Higgs-partiklen helst til tunge partikler, hvis et sådant henfald ellers er muligt. For meget lave Higgs-masser er dette hovedsagligt til  $b + \text{anti-}b$  kvarker ( $bb$ ), mens det for høje masser er  $WW$  og  $ZZ$  samt  $t\text{-anti-}t$  ( $t\bar{t}$ ). Ved 126 GeV er der næsten alle muligheder, hvilket giver Higgs-partiklen en rig fysik. Fra [3].

Spørgsmålet om Higgs-partiklens eksistens blev med tiden mere og mere centralt, og da man designede de detektorer, som skulle observere kollisionerne fra LHC, der havde man stort fokus på at sikre, at ligegyldig hvad Higgs-partiklen vejede, så skulle man være i stand til at observere den. Målet var, at enten ville man

finde Higgs-partiklen eller også ville man få beviser nok til at udelukke dens eksistens.

Den altafgørende parameter, når man skal søge efter Higgs-partiklen, er Higgsens egen masse, idet den afgør, hvad Higgs-partiklen henfalder til, og der er faktisk mange muligheder, se figur 1.

Man havde en svag idé om, at hvis det var en SM-Higgs, som man var på jagt efter, så ville den have en masse mellem 50 og 500 GeV. Dette vidste man fra præcise målinger af  $W$ -massen, som en eventuel Higgs havde en svag indflydelse på.

Men inden LHC startede, så havde flere andre eksperimenter forsøgt at finde Higgsen. Acceleratoren Large Electron-Positron (LEP) collider – som var den oprindelige grund til, at man på CERN byggede den 27 km lange tunnel, som LHC nu "bebor" – var følsom overfor Higgs-partikler op til 115 GeV, mens "Tevatron-acceleratoren" ved Fermilab i USA begyndte at have følsomhed i masse-intervallet 160-170 GeV, da LHC skulle til at starte.

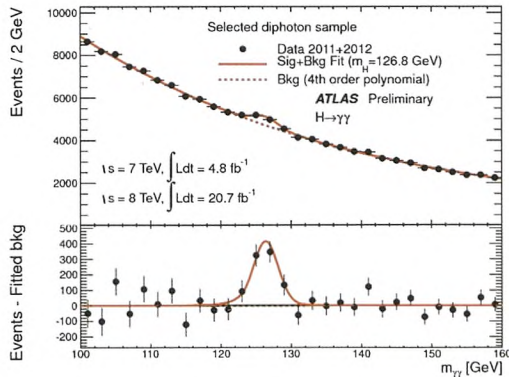
Higgs-partikler produceres, når man støder protoner sammen ved høj energi. Da protoner ikke er fundamentale partikler, men består af kvarker og gluoner, så er det kvarker og gluoner, som støder sammen, og det typisk med en energi, som er en del lavere, end den protonerne har.

Den energi, der er i sammenstødet kan bruges til at producere nye partikler, ligesom man kan veksle danske kroner til fx amerikanske dollars. Alle – også ikke-fysikere – kender faktisk godt vekselkursen, idet den er bestemt ved Einsteins berømte formel,  $E = m \cdot c^2$ . Hvis man har en bestemt mængde energi,  $E$ , så kan man "købe" partikler med en bestemt masse,  $m$ , og vekselkursen er lysets hastighed i anden.

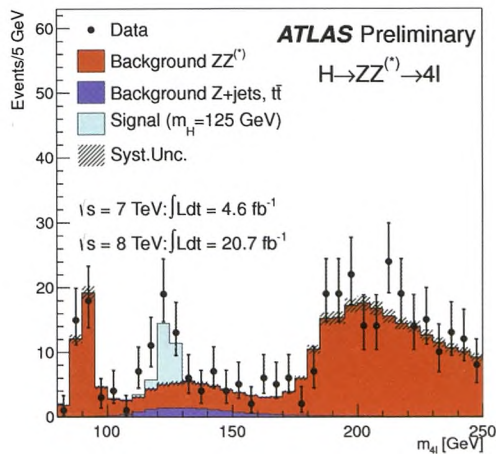
Nu er det sådan, at lysets hastighed er et stort tal (ca. 300.000.000 m/s), hvormed det er "dyrt" at købe partikler med energi. Det er derfor, at CERNs LHC-accelerator er så stor. Desuden er man tvunget til at overholde de bevarelseslove, som gælder i partikelfysikken, fx at den elektriske ladning skal være bevaret. Sidst men ikke mindst, så kan man ikke selv bestemme, hvad man veksler til! Man er simpelthen tvunget til at

kollidere en masse protoner, og så se alle kollisionerne igennem. Naturen er ikke rar, når man veksler, idet den oftest giver en billig valuta tilbage i form af lette kvarker. Faktisk får man kun én observerbar SM-Higgs-partikel ud af 10.000.000.000.000 (titusind milliarder) kollisioner.

Rent faktisk produceres der i proton-kollisioner i princippet *alle* eksisterende partikler, så længe deres masse ligger under kollisionsenergien. Således producerer LHC også store mængder af kendte partikler, som man så kan studere i større detalje. Og så kommer der måske en sjælden gang imellem en ny type partikel, som afslører noget yderligere om Universets mangfoldighed.



**Figur 2.** Fordelingen af masser fra begivenheder med to fotoner. Langt den overvejende del kommer fra “almindelige” SM-processer, men den lille top ved 126 GeV (lettere at se i nederste plot, hvor den monotone baggrund er trukket fra) er Higgs-signalet.



**Figur 3.** Fordelingen af masser fra begivenheder med fire leptoner (elektroner eller myoner). Det røde og lilla histogram viser baggrunden fra SM-processer, mens der ved 125 GeV ses et Higgs-signal ud over den forventede baggrund.

I jagten på Higgs-partiklen var der tre af dens mulige henfald, som kom til at spille den afgørende rolle, nemlig  $\gamma + \gamma$  (to fotoner),  $Z + Z^*$  og  $W + W^*$ .<sup>1</sup> Grunden til, at disse henfald blev afgørende var både, at Higgsen havde en masse, som tillod henfald til disse sluttillstande, men også (og især) at det man skal observere ikke indeholder kvarker, og dermed har mindre baggrundsstøj, idet LHC producerer utrolige mængder af kvarker.

<sup>1</sup> Stjernen på hhv. Z og W refererer til, at partiklen ikke har sin fulde masse.

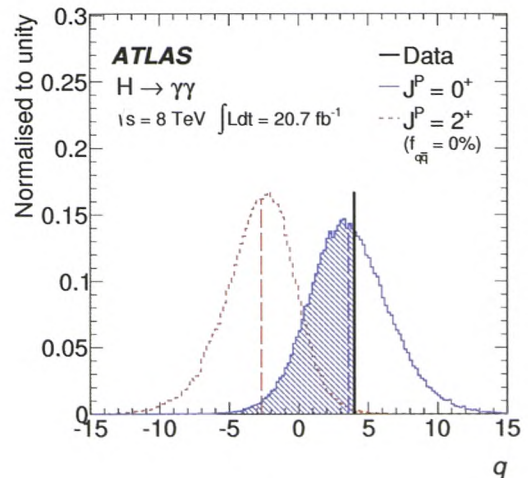
Alle tre sluttillstande produceres også uden Higgs-partiklens eksistens, så udfordringen er at se, om disse sluttillstande produceres yderligere (altså udover den forventede baggrund fra SM) og om denne yderligere produktion er ved en specifik masse. Denne masse,  $m$ , kan beregnes ved at tage de to fotoner og “lægge dem sammen” ifølge speciel relativitetsteori. Da fotonerne er masseløse, så er dette specielt nemt, og givet ved formelen:

$$m^2 = \frac{2E_1E_2}{c^4}(1 - \cos(\theta)), \quad (1)$$

hvor  $E_1$  og  $E_2$  er energien af de to fotoner, og  $\theta$  er vinklen imellem dem.

I modsætning til fotoner, så henfalder Z-partikler videre, engang imellem (6 %) til to elektroner eller to myoner, som er relativt lette at observere. Man kigger derfor efter kollisioner, hvor der kommer fire elektroner/myoner ud. Igen lægger man dem sammen, og ser, om der er en overskudsproduktion ved en specifik masse.  $WW^*$ -tilfældet ligner  $ZZ^*$ -tilfældet meget, undtagen at  $W$ 'er ikke henfalder til to elektroner/myoner, men kun til én samt en tilhørende neutrino, som man ikke ser. Dette gør det sværere at se, om der er et overskud af partikler, hvormed denne henfaldskanal ikke er helt så “stærk”, som de to foregående.

Efter Higgsens opdagelse var det store spørgsmål, om det nu også var en Higgs, dvs en partikel med spin 0, og om den fulgte Standardmodellens forudsigelse om at have positiv paritet (lidt løst sagt, om den er højre- eller venstrehåndet!). Dette kan man måle ved at se på vinkelfordelingerne af Higgs-kandidaternes henfald, og selv om dette er en udfordring, så kunne man allerede med de data LHC har leveret bestemme, at den nyopdagede Higgs-partikel har spin 0. Faktisk har ATLAS lige udgivet en artikel med titlen: “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data” [5].



**Figur 4.** Figuren viser den forventede fordeling af  $q$  (som er log af likelihood ratio for hypoteserne spin=0 og spin=2), der er følsomt overfor, hvilket spin Higgs-signalet har. Den røde fordeling er, hvad man forventer for spin=2 og den blå for spin=0, som Higgs-partiklen skal have. Data er den sorte streg, som altså klart favoriserer spin=0 med meget lille chance for spin=2 hypotesen [5].

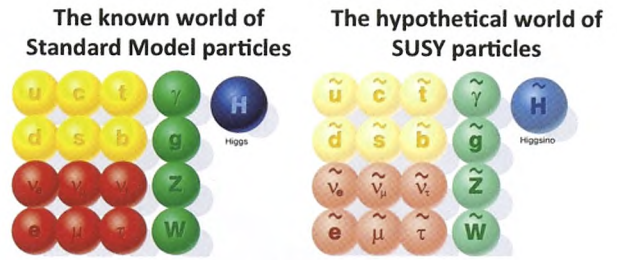
Figur 4 viser, hvad man skulle forvente hvis Higgsen var spin 0 eller spin 2. Den sorte linier markerer, hvad man rent faktisk ser i data, og den favoriserer klart spin 0 hypotesen, så det er en Higgs-partikel. Man måler også, om den nye partikel nu henfalder lige så ofte som den "skal" til de forudsagte sluttillstande, og foreløbig er svaret, at det gør den!

## Supersymmetri

Med opdagelsen af Higgs-partiklen er Standardmodellen sådan set afrundet og komplet. Men der er flere grunde til, at vi ved, at det ikke er den endelige teori. For det første forklarer SM ikke eksistensen af mørkt stof og heller ikke hvorfor der endte med at være et overskud af stof i forhold til antistof i Universet. Desuden er der flere ting i SM, som ikke falder naturligt. Fx burde massen af Higgs-partiklen naivt/naturligt være  $10^{16}$  gange større, end den er, fordi andre SM-partikler gennem kvantekorrekationer "bidrager" voldsomt til Higgs-partiklens masse (ligesom den bidrager lidt til W-massen, se ovenfor). Men der synes at foregå en eller anden meget delikat og præcis annullering af disse korrekationer, således at Higgs-massen ender på de 126 GeV. Den slags er ikke naturligt, og en fysikers skepsis er dermed vakt!

Et muligt svar på alle disse udfordringer kunne være en ny symmetri, "Super Symmetri" (SUSY), som postulerer, at der for hver SM-partikel findes en super-

symmetrisk partikel, som vist på figur 4. Disse skulle være tungere end SM-partiklerne, og af den grund ikke opdaget – endnu!



**Figur 5. SUSY-partikler.** Til venstre er de partikler vi kender, som alle findes i Standardmodellen. SUSY postulerer, at der for hver af disse er en super-partner. Den letteste af disse (her er der dog flere muligheder!) vil være stabil og kan derfor udgøre det mørke stof. SUSY-partiklerne har de samme elektriske- og farveladninger, som deres SM-partnere, men deres spin er ændret med 1/2, således at der byttes om på fermioner og bosoner. Fra Quantum Diaries.

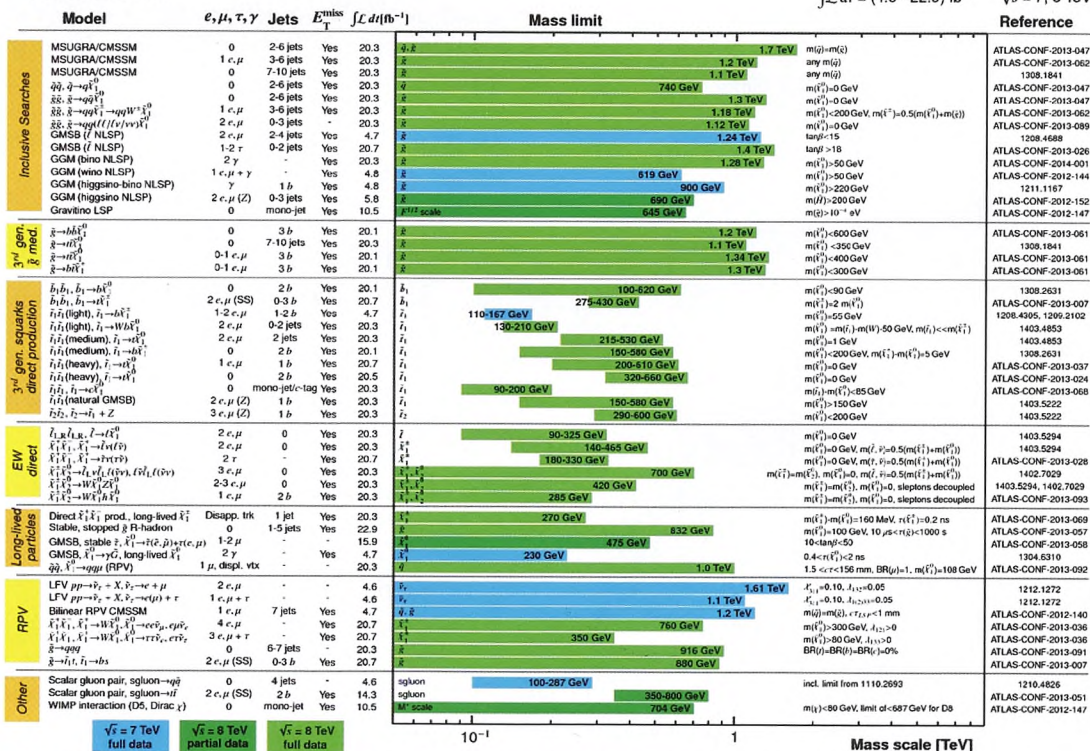
Ligesom SM-partikler henfalder disse til lettere partikler, men SUSY-partikler kan ikke uden videre henfalde til SM-partikler, idet de ikke kan "komme af med" deres supersymmetri, og dermed vil den letteste SUSY-partikel være stabil. Denne partikel (kaldet LSP = "Lightest SUSY Particle") kan udgøre det mørke stof, idet den kun vekselvirker gennem tyngdekraften og den svage kernekraft (og altså ikke elektromagnetisk).

## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: Moriond 2014

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 $\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

**Figur 6. ATLAS SUSY-resultater.** Denne meget informationsrige figur opsummerer de vigtigste (men ikke alle!) ATLAS SUSY-analysers resultat i form af en minimum masse de eftersøgte SUSY-partikler kan have, givet at vi ikke har fundet signal i nogle af alle disse søgninger. Generelt kan SUSY-partikler med masse under omkring 1 TeV udelukkes. Når LHC starter op igen i 2015, ved "Run2", forventer man at kunne observere SUSY-partikler op til 2,0-2,5 TeV, og så må man se, om der er spor af SUSY-signaler i nogle af dem. Fra ATLAS public results.

Spørgsmålet om, hvordan der endte med at være mere stof end antistof i Universet, kræver at der på et tidligt tidspunkt i Universets udvikling skete en faseovergang, helt ligesom vand der fryser til is. Der er flere teorier, som giver et bud på, hvordan der forekommer sådan en faseovergang, men Higgs-mekanismen er den mest populære. Det viser sig dog, at den nyligt fundne Higgs-partikel på 126 GeV *ikke* kan give den krævede overgang, og man skal derfor have flere Higgs-partikler. Med SUSY får man faktisk fem Higgser ialt, men andre teorier med flere Higgser kan også gøre det. Denne sidste mulighed er bl.a. et resultat af forskning ved Niels Bohr Institutet.

Mens SUSY i sig selv er en glimrende idé, så har den det problem, at de mange nye partikler og vekselvirkninger kræver over 100 parametre at beskrive. Dermed kan SUSY have næsten uendelig mange udformninger, hvilket gør dens forudsigelser og mulighed for at blive afkræftet langt mindre.

Både ATLAS- og CMS-eksperimenterne har ledt intenst efter signaturer fra SUSY, men det foreløbige resultat er, at man ikke har fundet noget tegn på SUSY endnu. Figur 6 viser et udvalg af resultater fra ATLAS, hvor de forskellige linier repræsenterer hvor høje masser på SUSY-partikler, man har kunnet udelukke (idet man ellers allerede ville have set dem, hvis de eksisterede).

### En historisk opdagelse

Det er ikke så ofte, at man får lov til at være del af en så afgørende opdagelse i partikelfysik, som fundet af Higgs-partiklen 48 år efter Higgs, Brout og Englerts oprindelige ideer. Det er noget nær en lille revolution. Robert Brout (1928-2011) døde kort tid før opdagelsen af Higgs-partiklen blev annonceret.

Ud over at resultere i en nobelpris til Higgs og Englert allerede året efter, så var det også en opdagelse, som gav genlyd uden for naturvidenskabens, idet mange af verdens aviser havde nyheden på forsiden.



Billedet viser Fabiola i Time Magazine. Fabiola Gianotti var talsperson for ATLAS-eksperimentet, og kendt for at gøre en dyd ud af det faktum, at ATLAS er en kollaboration, og at resultater som Higgs-opdagelsen kun kan lade sig gøre ved samarbejde. Hun var med i opløbet til at blive Time Magazines "person of the year" i 2012. Det var dog Barack Obama, der ved genvalg løb med titlen.

### Fremtiden

Dette er status i skrivende stund – Higgsen er fundet og den ligner SM-Higgsen, mens SUSY gemmer sig, hvis den overhovedet eksisterer. Men som sagt har LHC foreløbig kun leveret 2 % af det forventede antal proton-kollisioner og disse "kun" ved det halve af LHCs designenergi på 14 TeV.

Imens LHC opgraderes til sit fulde potentiale og design, så er forskningsgrupperne bag eksperimenterne også i gang med at reparere og forbedre deres detektorer. ATLAS har fået sat et ekstra lag af sporingsdetektorer ind helt tæt på kollisionspunktet, så man bedre kan se, om de partikler der kommer fra kollisionen, når at bevæge sig et lille stykke ( $< 1$  mm) inden de henfalder. Det er der nemlig nogle, der gør, og evnen til at kunne se dette giver bedre resultater, simpelthen fordi man har et skarpere syn, der kan skelne den interessante fysik (fx Higgser) fra støj.

I starten af 2015 genstarter LHC så ved dobbelt energi, og dermed fortsætter jagten på nye partikler og fænomener, som kan forklare hvad det mørke stof i Universet består af og hvorfor der er mere stof end antistof. Med Higgs-opdagelsen in mente bliver det mere end overordentligt interessant at se, hvad naturen har i vente til forskningen ved LHC på CERN.

### Litteratur

- [1] The ATLAS Collaboration (2012), Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Lett. B* **716** 1-29, <http://arxiv.org/abs/1207.7214>
- [2] CMS Collaboration (2012), Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Phys. Lett. B* **716** (2012) 30-71, <http://arxiv.org/abs/1207.7235>
- [3] S. Dittmaier *et al.* [LHC Higgs Cross Section Working Group] (2011), Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables, <http://arxiv.org/abs/1101.0593>
- [4] The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD Collaborations, Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance, *Phys. Rept.* **427**, 2006
- [5] ATLAS Collaboration (2013), Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data, *Phys. Lett. B* **726** (2013), 120-144, <http://arxiv.org/abs/1307.1432>

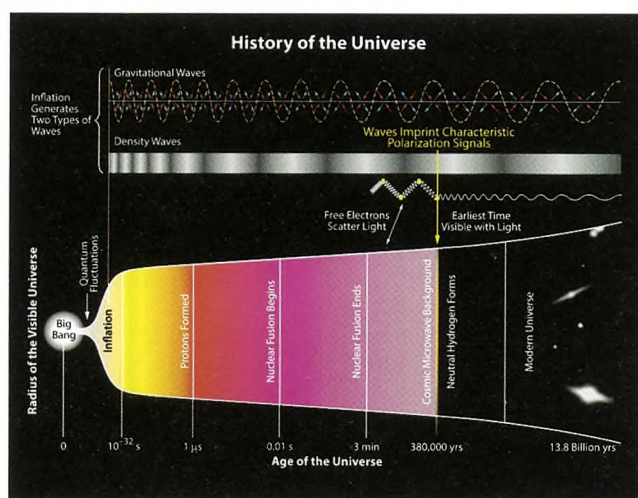
Troels C. Petersen er forskningslektor ved Niels Bohr Institutet. Han har tidligere arbejdet på BaBar-eksperimentet med målinger af CP-brud, dvs forskelle på stof og antistof. Siden 2004 har han arbejdet på ATLAS-eksperimentet med identifikation af elektroner i Transition Radiation Tracker (TRT) og præcisionsmåling af W-massen. Efter LHCs start har han arbejdet på at søge efter stabile massive partikler og Higgs-partiklen.



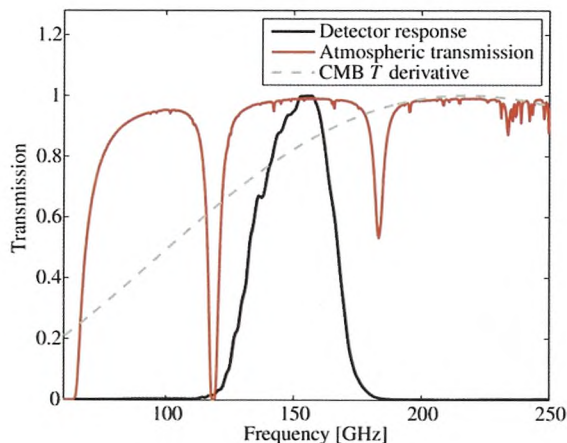
Af *Sven Munk, KVANT*

## Skabte Big Bang gravitationsbølger?

**KOSMOLOGI.** Blandt astronomer og andre med interesse for Universet er det en almindelig opfattelse, at Big Bang var ledsaget af en kosmisk inflation, hvor Universet udvidede sig med en ekstremt stor hastighed. Da energitætheden var så voldsom og ekspansionen ikke skete som en perfekt kugleformet udvidelse, har forskere antaget, at denne proces har frembragt gravitationsbølger. Den elektromagnetiske stråling, som opstod kort tid efter Big Bang og hvis rester nu findes som en kosmisk mikrobølgebaggrundsstråling, påvirkes af gravitationsfelter. Ved at måle på den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling (elektromagnetiske bølger) skulle det således være muligt at registrere gravitationsbølger, som opstod da Universet blev dannet.



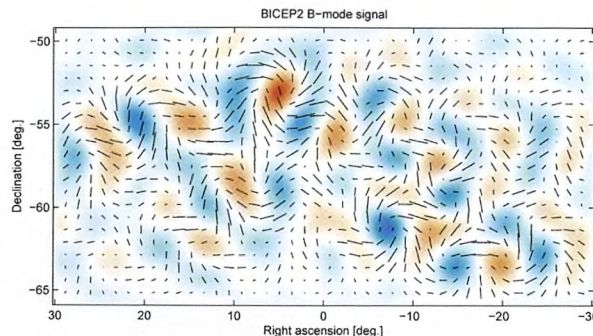
Dette er tankegangen bag opbygningen af specialteleskopet, BICEP2, på Antarktis. Der er efterhånden lavet en del målinger af temperaturvariationer i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, så BICEP2 skulle i stedet bestemme strålingens polarisation. Centerfrekvensen for målingerne er valgt til 149,8 GHz og båndbredden 42 GHz. Som det ses af figuren, ligger det valgte frekvensområde tæt på det sted, hvor baggrundsstrålingen (2,7 K) har sit maksimum.



For at en måling af strålingen overhovedet giver mening, skal detektoren være kølet ned til 250 mK. Elektroniske

halvlederkomponenter er helt inaktive ved denne temperatur, så de strålingsfølsomme komponenter er 512 bolometre. Altså, styrken af den elektromagnetiske stråling bestemmes via opvarmning.

For at få fri passage tilbage imod Big Bang, har astronomerne fundet en "sort plet" på himmelen hvor forstyrrende forgrundskilder, som fx stjerner, støv og galakser, er minimale. Observationsfeltet måler ca. 15×30 grader, hvilket svarer til ca. 2 % af himmelen.



Billedet ovenfor viser hvorledes polarisationen af den modtagne stråling er orienteret. Det er sådanne resultater med efterfølgende komplekse matematiske beregninger, som får forskere til at konkludere, at gravitationsbølger har været på spil og at hypotesen om Universets inflation understøttes.

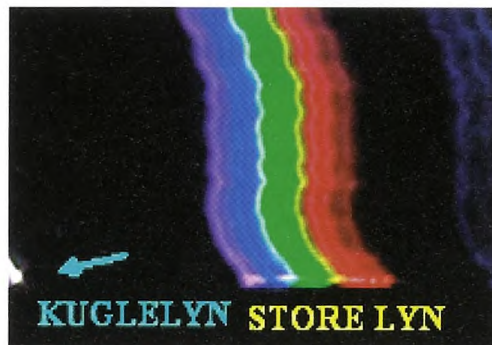
Der findes en omfattende dokumentsamling om emnet, så her nævnes blot et par kilder.

Kilder: BICEP2 2014 Release Papers, <http://bicep2.keck.org/#papers>; <http://arxiv.org/pdf/1403.3985>; <http://arxiv.org/abs/1403.3985>.

## Sjældent foto af kuglelyn

**ATMOSFÆREFYSIK.** Kuglelyn er så sjældne, at nogle forskere tvivler på, at de overhovedet forekommer. Blandt forskere, som har lyn som tema, er den fremherskende opfattelse dog, at disse – som det beskrives – kugleformede lysfænomener optræder sammen med normale lyn. Imidlertid savnes fortsat en videnskabelig forklaring på fænomenet.

Kinesiske forskere omkring Jianyong Cen var i 2012 på feltekspektion i det tibetanske højland (Qinghai-plateauet) for at studere lyn, som der er mange af på dette sted. Her oplevede de det usædvanlige at se et kuglelyn, som kom umiddelbart efter et (fra sky til jord)-lyn. Helt tilfældigt lykkedes det med et high-speed kamera at lave en farveoptagelse med en varighed på omkring 1 sekund. Forskerne beskrev farven som hvid i begyndelsen og rødlig ved afslutningen. De skønner, at det "runde" lyn havde en diameter på omkring 5 m med en langt mindre kugle inde i sig. Kuglelynet så ud til at bevæge sig omkring 10 m, medens det steg 3 m i højden. De kunne dog ikke bedømme højden over jorden.

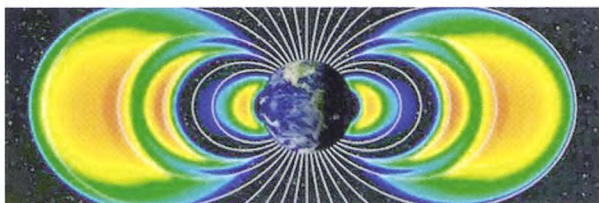


En efterfølgende spektralanalyse, som dog kun omfatter bølglængder i intervallet 400-1000 nm (se billedet), mener forskerne afslører tilstedeværelsen af jern, silicium og calcium. På grund af det begrænsede bølglængdeområde kunne aluminium ikke påvises. De tre registrerede grundstoffer forekommer hyppigt i mineraler på jordoverfladen, så observationen synes at underbygge teorien om, at lyn ved nedslag får mineraler til at fordampe og ionisere. Det er de ioniserede atomer, som herefter udsender lys.

Kilder: J. Cen et al., Observation of the Optical and Spectral Characteristics of Ball Lightning, *Physical Review Letters*, 2014; <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v112/i3/e035001>.

## Nyt om van Allen-bæltet

**ATMOSFÆREFYSIK.** Efter opsendelse af van-Allen-sonden medio 2012 er det nu klarlagt, at dette bælte har langt mere struktur end tidligere antaget. Sorterer man elektronerne i det inderste strålingsbælte efter energi og tildeler dem passende farver, kan der dannes et billede, som kan minde om Zebra-linjer. Dette mønster er mest tydeligt, når Solen er i "slumre-tilstand". Af dette drager forskerne den slutning, at Zebra-linjerne opstår pga. jordens rotation. Der opstår tidsvarierende magnetiske og elektriske felter, som vekselvirker med elektroner i den øverste del af atmosfæren. Her har det også betydning, at den magnetiske nordpol ikke befinder sig samme sted, som den geografiske pol.



Førhen var forskerne tilbøjelige til at ignorere Jordens rotation, fordi jordens magnetfelt er ret svagt og fordi elektronerne bevæger sig med hastigheder, som minder om lysets. Computermodeller har bekræftet, at Jordens rotation har betydning og at resonansfænomener får virkningerne til at fremtræde så tydeligt.

Kilder: A.Y. Ukhorskiy et al., Rotationally driven 'zebra stripes' in Earth's inner radiation belt, *Nature*, 2014, <http://dx.doi.org/10.1038/nature13046>; Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, <http://www.jhuapl.edu>; Van Allen Probes, <http://vanallenprobes.jhuapl.edu>.

## Vand i Jordens kappe

**GEOFYSIK.** Ved et tilfælde blev det i Canada opdaget, at en diamant fundet i Brasilien indeholdt mineralet Ringwoodit, som ved yderligere undersøgelser viste sig at indeholde 1,5 % vand. Diamanten (se billedet) stammer fra den såkaldte kappe-overgangszone, som ligger mellem 400 og 650 km inde i Jorden. Selv om forskerne har haft en formodning om, at denne overgangszone skulle indeholde store mængder vand, har det været vanskeligt få formodningen bekræftet definitivt.



Seismiske undersøgelser viser, at Jordens kappe hovedsageligt består af mineralet Olivin. I overgangszonen får Olivin på grund af det høje tryk ændret sin krystallinske struktur, nemlig til Wadsleyit og Ringwoodit. Disse kan optage vand i krystalstrukturen. Bevæger kappe-overgangszonen sig opad mod jordoverfladen svækkes trykket og krystalstrukturen bliver igen Olivin – og vandet forsvinder. At dette åbenbart ikke er sket med den fundne diamant vil forskerne forklare med, at den magma, som omgav diamanten har bevæget sig hurtigt opad. Måske et eksplosionsagtigt vulkanudbrud.

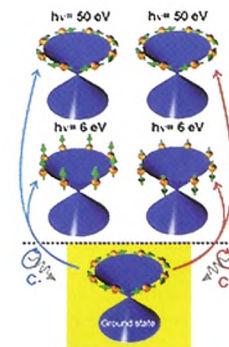
Summa summarum: Uanset at mængden af vand i kappen ikke kan angives præcist, følger forskerne, at vandmængden dog er stor nok til at påvirke de geologiske processer.

Kilder: D.G. Pearson et al., Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond, *Nature*, 2014 <http://dx.doi.org/10.1038/nature13080>; Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta <http://easweb.eas.ualberta.ca/person/pearg>.

## Topologiske isolatorer

**FASTSTOFFYSIK.** Der findes materialer, som besidder den særlige egenskab, at overfladen er elektrisk ledende medens det indre er en isolator. Denne materialekategori er opdaget indenfor de seneste år og den har fået betegnelsen topologiske isolatorer. Et eksempel herpå er Bismutselenid ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ), som indtager hovedrollen i det følgende.

Et internationalt forskerteam har nu fundet ud af, at det er muligt at påvirke elektronspin i materialets overflade ved hjælp af lys. Bismutselenid blev bestrålet med cirkulært polariseret lys fra synkrotronen BESSY II i Berlin. Derved viste det sig, at materialet (spin) blev påvirket forskelligt, alt efter om strålingen havde stor fotonenergi (50-70 eV – vakuum UV) eller en lavere energi på 6 eV (UV).



Med henvisning til billedet kan følgende anføres: Systemets laveste energitilstand er markeret med gul. Langs kanten på det der ligner en skål ses en række grønne pile som angiver spinretningerne. Pilene peger i samme retning langs kanten (ligner markeringerne i en rundkørsel). På de to sider af det gule felt ses to fotoner forsynet med C- og C+. De angiver hvorledes den cirkulære polarisation roterer: CCW eller CW. Det man nu skal bemærke er, at når fotonenergien er 6 eV vil fotonens rotationsretning påvirke den måde elektronspin orienterer sig langs kanten. En foton med C- vil få elektronspin til at pege opad, medens det modsatte vil ske når fotonen er C+. Man kan derfor sige, at fotonens spin (rotationsretning) styrer retningen af elektronernes spin. Bliver fotonenergien stor (50 eV) forsvinder denne egenskab igen. Der kan næppe herske tvivl om, at denne egenskab ved topologiske isolatorer vil blive studeret grundigt i de nærmeste år. Kan det blive vejen til en optisk kvantecomputer?

Kilde: J. Sánchez-Barriga et al., Photoemission of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  with Circularly Polarized Light: Probe of Spin Polarization or Means for Spin Manipulation?, *Physical Review X*, 2014 <http://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.4.011046>

# Amplituder og Nye Fundamentale Teorier

Af N. Emil J. Bjerrum-Bohr, Niels Bohr Internationale Akademi og Discovery Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

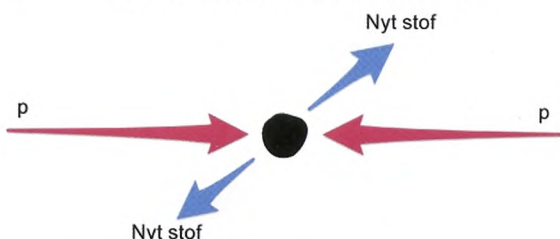
Der har i de seneste år været en revolution af beregningsmetoderne for amplituder i kvantefeltteorien. Dette har gjort det praktisk muligt fra teoretisk side at matche den strøm af nye eksperimentelle data som Large Hadron Collider ved CERN har givet os. Metoderne giver også inspiration til nytænkning og udvikling af nye fundamentale teorier.

En amplitude repræsenterer grundlæggende et mål for sandsynligheden for en given fysisk proces. Den er således et meget vigtigt redskab for at kunne sammenligne teoretiske forventninger med eksperimentelle data fra spredningsmålinger.

$$|\text{Amplitude}|^2 \sim \text{Sandsynlighed}$$

**Figur 1.** En amplitude er via dens kvadrat et mål for en sandsynlighed.

I en given spredningsproces har man indkommende partikler som vekselvirker og danner udkommende partikler (se figur 2). Efter vekselvirkningen måler man hvad man kan observere af udkommende stof.



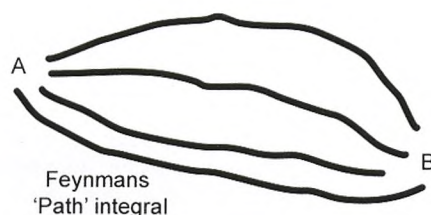
**Figur 2.** To protoner kolliderer ved LHC og ud kommer stof, som vi analyserer. Ved et eksperiment som LHC sker kollisionerne i størrelsesordenen  $\sim 500$  mio. gange per sekund. Den kvantemekaniske amplitude måler teoretisk sandsynligheden for hvilke partikler som opstår og med hvilken hyppighed de kommer. Man taler her om forskellige spredningstværsnit for forskellige partikler.

## Feynman-diagrammer

Slår man op i en vilkårlig undervisningsbog om kvantefeltteori vil man blive mødt med begreber som *Lagrange-funktioner*, *Feynman-diagrammer*, *gaugevalg* osv, når man skal beregne en given amplitude.

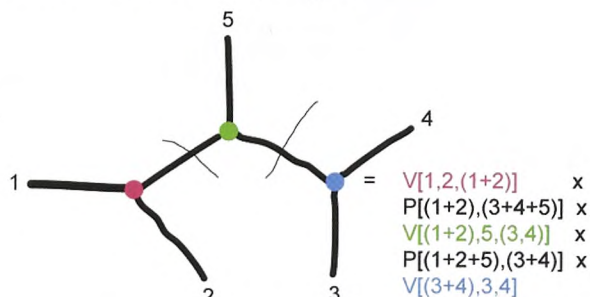
Fysikeren Richard Feynman analyserede de metoder, som fysikerne før ham brugte når de skulle regne sig frem til udtryk for kvanteamplituder. Feynman indså, at man simpelthen kunne opskrive alle udtryk i termer af bestemte summer af diagrammer, hvor den diagrammatiske sum skulle forstås som et uendeligt stort 'Path' integral (se figur 3) over alle diagrammatiske muligheder for en given proces [1].

Nu kunne alle (og ikke kun eksperter) regne amplituder ud for fysiske processer via en diagrammatiske metode, som kun krævede kendskab til et givet sæt af regler for forskellige *vertices* og såkaldte *propagatorer* for partikler. Vertices beskriver, hvordan partikler vekselvirker med hinanden i et givet punkt i rum-tiden. Propagatorerne beskriver kort sagt hvordan partikler bevæger sig fra ét punkt i rumtiden til et andet.



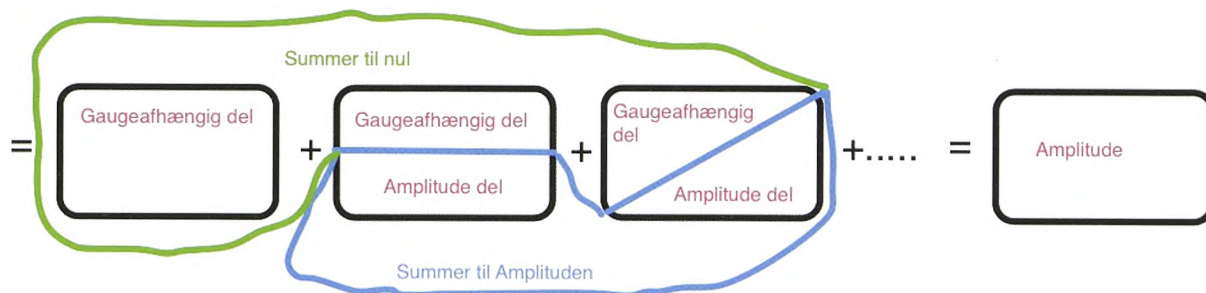
**Figur 3.** I Feynmans 'Path' integral summer man over samtlige diagrammatiske veje imellem to punkter A og B.

Feynman-diagrammerne var i sig selv en stor revolution af feltteorien og et kraftfuldt redskab. Beregninger via Feynman-diagrammer var et afgørende element i bekræftelsen af kvanteelektrodynamikken med mere end 10 betydende cifre. Dertil kom, at Feynmans metode var så generel, at den var umiddelbart anvendelig i mange forskellige typer af feltteorier. Metoden er den dag i dag, stadigvæk den vigtigste standardmetode for de fleste amplitude-beregninger.



**Figur 4.** Et givet Feynman-diagram som vi summer over for at finde amplituden. V er her 'vertices'. P er propagatorer. Både vertices og propagatorer er helt generelt gaugeafhængige størrelser. Feynman-diagrammet som er vist diagrammatiske er 'lig' produktet af de pågældende vertices og propagatorer. Man summer over dette og alle andre mulige diagrammer for den givne proces.

Hagen ved Feynman-diagrammerne er dog, at man selv i simple eksempler har en tendens til at få afsindigt lange og komplicerede udtryk for amplituderne. Det skyldes, at der oftest fremkommer en masse led i summen over diagrammer, som ikke har en egentlig fysisk betydning. Man taler om et begreb som kaldes *gauge*. Led, som er gaugeafhængige er ikke fysiske, da amplituden grundlæggende skal være gaugeafhængig. Men diagrammatiske skal alle led, også de gaugeafhængige, summeres med i 'Path' integralet for at det totale udtryk for amplituden bliver konsistent (se figur 4 og 5).



**Figur 5.** Grafisk illustration af hvordan gaugeafhængige led kan summe til nul i en amplitudeberegning via Feynman-diagrammer. Der vil typisk være mange tusinde led selv i en simpel beregning. Amplituden fremkommer ved, at leddene typisk har én del som giver et bidrag til den, og én del som ikke er fysisk og gaugeafhængigt. De gaugeafhængige dele summer til nul, men for at se det skal vi først udregne alle Feynman-diagrammer og summe dem sammen.

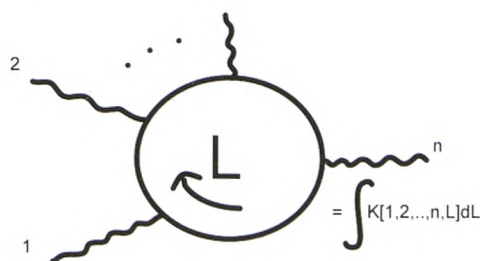
Det betyder, at når vi skriver en given repræsentation af Feynman amplituden ned, så vil der være uendeligt mange diagrammatiske repræsentationer afhængigt af gaugevalget. Det er som sådan ikke noget problem og kan for eksempel bruges til at opnå simple udtryk, da nogle diagrammatiske Feynman-repræsentationer er enklere end andre (se figur 5). Men det, at vi skal vælge en gauge, giver et klart vink om at amplituden generelt må have et stort antal mulige forenklinger og bidrag der summer til nul, når vi lægger forskellige led sammen. Det leder til den åbenlyse konklusion, at der må være en enklere måde at udtrykke amplituden på.

Hvis man derimod fra starten af i en beregning kunne udføre beregninger via udtryk, som var gaugeafhængige ville man have vundet meget med hensyn til at forenkle beregningerne.

For de simpleste feltteorier, fx kvanteelektrodynamik (QED) der bl.a. beskriver elektroners vekselvirkninger med fotoner, virker Feynmans metode over al forventning, selvom summen over de diagrammatiske muligheder for en proces med  $n$  partikler vokser som  $n!$

### Amplituder i kvantekromodynamikken

I kvantekromodynamikken, der beskriver den stærke kernekraft gennem kvarker og gluoner, og, i kvante-teorier for tyngdekraften, kommer der imidlertid nye udfordringer til, da vi også skal tage hensyn til selvvekselvirkende diagrammer imellem de kraftbærende partikler (fx gluoner), se figur 6.



**Figur 6.** Et givet selvvekselvirkende Feynman-diagram, her skal man integrere over alle mulige impulser (bevægelsesmængder) i loop'et. I kvantekromodynamikken kaldes de kraftbærende partikler gluoner fordi de holder kernepartiklerne (protoner og neutroner) sammen. Feynmans diagrammatiske metode kan nemt udvides til at omfatte diagrammer, hvor vi har selvvekselvirkende kraftbærende partikler; sådanne diagrammer er loop amplituder. Jo flere selvvekselvirkninger jo flere loops.

Strengteori (se figur 7) leder automatisk til en mere kompakt måde at udregne amplituder på ved at ordne og symmetrisere amplituden, men på loopniveau kræver beregningerne megen snilde.



**Figur 7.** Feltteori- versus Strengteori-diagrammer. I strengteori tænker man ikke længere på en partikel som bevæger sig langs en *linie* (en 'verdenslinie' i rumtiden), men partikler som excitationer på en *flade* (en 'verdensflade' – det såkaldte 'string world sheet').

Det blev klart i løbet af 1980'erne at hvis man efterlignede dele af strengteoriens måde at udregne amplituder på og kombinerede det med en bestemt repræsentation af polarisationsvektorerne (polarisationsvektorerne holder styr på polarisationerne af de eksterne partikler) så kunne man opnå langt mere kompakte amplituder end ved traditionelle metoder. Fysikerne Bern og Kosower var blandt pionererne indenfor streng-baserede metoder til amplitudeberegninger [2] og startede deres beregninger af amplituder ved Niels Bohr Institutet i København i slutningen af 1980'erne og begyndelsen af 1990'erne.

### Parke-Taylor formlen og Twistorer

Parke and Taylor udviklede en metode ved brug af specielle polarisationsvektorer til at opnå repræsentationer af amplituder, som var langt simple end deres tilsvarende udtryk som diagrammatiske summer over Feynman-diagrammer [3], se figur 8.

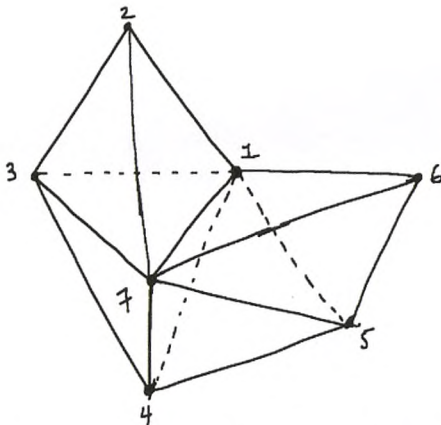
$$\sum_{n!} \text{Diagrammer} \sim \frac{\langle m_1 m_2 \rangle^4}{\langle 12 \rangle \langle 23 \rangle \cdots \langle n1 \rangle}$$

**Figur 8.** Parke-Taylor formlen for en  $n$ -partikel gluon amplitude ( $m_1$  og  $m_2$  er to gluoner, som har modsat polarisation end resten af gluonerne). For at udregne de tilsvarende Feynman-diagrammer vil man være nødt til at summe i størrelsesordenen  $n!$  led fra Feynman-diagrammer. Parke-Taylor formlen har magisk kun ét led.

I 2003 foreslog Witten, at Parke-Taylors formel kunne erstattes af en mere matematisk stringent repræsentation, hvis man gjorde brug af såkaldte twistorer [4]. Begrebet twistor er oprindeligt udviklet af Roger Penrose, som en måde at forstå rum-tiden geometrisk. Wittens idé gav en helt ny matematisk vinkel på amplitudeberegninger. Nu kunne geometriske betingelser bruges som argumenter for forenklinger og som en direkte motivation for nye forslag til beregningsmetoder uden brug af Feynman-diagrammer.

Blandt væsentlige fremskridt kan nævnes såkaldte 'on-shell' metoder, hvor amplituder med  $m$  start- og  $v$  sluttilstande kan genbruges direkte i beregningen af en ukendt  $(m + v - 2)$ -partikeltilstand, den såkaldte Britto-Cachazo-Feng-Witten rekursion [5]. Derved spares mange udregninger og gentagelser i beregningen, da tidligere udregnede og forsimplede udtryk for amplituder kan genbruges i nye udregninger.

Wittens ideer har også ledt til forskellige nye teorier såsom twistor-strengteorier og Arkani-Hameds forslag om 'The Amplituhedron' [6], se figur 9. Ved at kombinere supersymmetri i for eksempel twistor og 'on-shell' amplitudeberegninger kan man nemt finde ud af at bytte gluoner ud med andre typer af stof. Derved kan man bruge de samme udtryk til at udregne mange forskellige typer af fysiske processer på samme tid.



**Figur 9.** Arkani-Hameds skitse af en 8 partikel amplitude, udregnet via Amplituhedronteknikken.

Det er også muligt at bruge amplituder uden selvvekselvirkninger til at udregne selvvekselvirkende loop-amplituder via en egenskab, som kaldes unitaritet. Unitaritet er en konsistensbetingelse, hvor vi kan bruge bestemte egenskaber af amplituden uden selvvekselvirkninger til direkte at beregne loop-amplituden uden brug af Feynman-diagrammer [7].

### Kvantegravitation

Mange af disse metoder kan også finde anvendelse i tilfælde af flere end ét loop. Det har ledt til nye beregninger i kvantegravitation, hvor man fx bruger ideer fra strengteori til at udregne udtryk for amplituder i kvante-gravitationsteorier ved at kvadrere amplituder i kvantekromodynamikken (stærke kernekrafter) [8, 9]:

$$\text{Tyngdekraft} \sim (\text{Stærke kernekrafter})^2$$

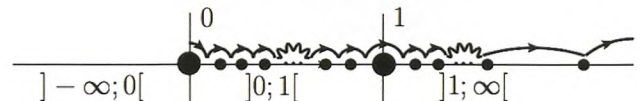
Hvis man bare tænker på Feynman-diagrammer, virker dette fuldstændigt fantastisk. Vi forstår endnu ikke fuldt ud denne forbindelse mellem amplituderne i kvante-gravitationsteorier og i kvantekromodynamikken. Strengteorien giver os et vink om at sådanne relationer *eksisterer*, men det forklarer ikke klart, hvorfor sådanne relationer holder for feltteorier.

### Nye symmetrier

Ved at studere udtryk for amplituder har vi også fundet mange nye symmetrier for amplituder.

De fleste af sådanne symmetrier er totalt uforståelige når man tænker på amplituden via Feynman-diagrammer, men når man skriver amplituden op på bestemte måder via nye teknikker bliver symmetrierne tydelige fra begyndelsen af beregningen.

Med hensyn til overvejelser af nye symmetrier kan man drage fordel af strengteoriens kompakte formalisme eller dens store arsenal af matematiske muligheder for omskrivninger. Et godt eksempel på en omskrivning, som også afklarar symmetrier er de såkaldte monodromier af amplitudeudtryk [10], se figur 10.



**Figur 10.** Monodromirelationer for en  $n$  partikel amplitude. Monodromirelationer er et begreb i den komplekse funktionsteori, der dækker over, at man kan omskrive udtryk for integraler via omformninger af komplekse integrationskonturer.

Det viser sig, at man kan relatere en lang række amplitudeudtryk for processer via en teknik, som er kendt matematisk som monodromi. Det er fordi strengteori giver mulighed for at skrive amplituder som integraler, som derefter kan relateres til hinanden via omformninger af konturintegraler i den komplekse plan. Når man tager den grænse, hvor strengteori leder til feltteori, følger disse utrolige relationer for amplituderne med!

En af de nyeste metoder til beregning af amplituder er brugen af såkaldte spredningsligninger. Sådanne ligninger lader til direkte at ligge bagved alle typer af spredningsprocesser i feltteorier [11]. Via strengteorien kan man give mening til en del af formalismen [12].

### Praktiske anvendelser i analyser af LHC-data

I det praktiske arbejde som omgiver analysen af de data, som kommer fra LHC, er mange af de meget mere effektive amplitudeteknikker blevet inkorporeret, se for eksempel [13], men der foregår stadigvæk et stort arbejde med at gøre teknikkerne endnu bedre og sideløbende udvikle nye metoder til beregninger. Det er klart at man ved at bruge effektive amplitudeteknikker, langt bedre kan lave fortolkninger af for eksempel *baggrunde* (dvs. den forventede opførsel med hensyntagen til kendte partikler) for bestemte processer i standardmodellen og dermed også bedre forstå signaler for nye partikler. Det giver en klart bedre detaljeringsgrad og analyse af de data som tilvejebringes ved LHC.

I de seneste år er det forskningsfelt, der arbejder med beregninger af amplituder, blevet det mest interessante spændingsfelt midt imellem strengteori, feltteori og analyser af eksperimentelle data fra LHC. Uden de helt utrolige beregningsfremskridt indenfor amplitudefeltet i de sidste år ville det ikke være muligt med samme høje præcision at sammenligne teoretiske forudsigelser med de eksperimentelle data, der strømmer fra LHC.

Der er i amplitudefeltet en evig konkurrence om hvordan forskellige beregninger kan forenkles, analyseres og fortolkes bedre. Alle mulige forskellige teknikker fra helt forskellige områder af fysikken tages her i brug og anvendes på helt nye måder. Her i København ved Niels Bohr Institutet, er vi et helt team (CAMP) som både beregner amplituder til LHC og også udvikler nye metoder til beregning af amplituder og spredningsprocesser.

Ved at kombinere viden og ideér på tværs af mange felter, bl.a. strengteori, feltteori og twistor matematik, er vi kommet meget længere i vores forståelse af begrebet 'kvanteamplitude'. Det har revolutioneret den måde som vi tænker og laver udregninger på i den teoretiske højenergifysik, og det har potentiale til at føre til fremtidige store landvindinger i vores forståelse af kvantemekanikken på de mindste skalaer og højeste energier og giver dermed inspiration til nytænkning og udvikling af nye fundamentale teorier.

## Litteratur

- [1] R. P. Feynman, Space-time approach to nonrelativistic quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **20** (1948) 367.
- [2] Z. Bern and D. A. Kosower, The Computation of loop amplitudes in gauge theories, *Nucl. Phys. B* **379** (1992) 451.
- [3] S. J. Parke and T. R. Taylor, An Amplitude for  $n$  Gluon Scattering, *Phys. Rev. Lett.* **56** (1986) 2459.
- [4] E. Witten, Perturbative gauge theory as a string theory in twistor space, *Commun. Math. Phys.* **252** (2004) 189 [arXiv:hep-th/0312171].
- [5] R. Britto, F. Cachazo and B. Feng, New recursion relations for tree amplitudes of gluons, *Nucl. Phys. B* **715** (2005) 499 [arXiv:hep-th/0412308].
- [6] N. Arkani-Hamed and J. Trnka, The Amplituhedron, [arXiv:1312.2007 [hep-th]].
- [7] Z. Bern, L. J. Dixon, D. C. Dunbar and D. A. Kosower, Fusing gauge theory tree amplitudes into loop amplitudes, *Nucl. Phys. B* **435** (1995) 59 [arXiv:hep-ph/9409265].
- [8] H. Kawai, D. C. Lewellen and S. H. H. Tye, A Relation Between Tree Amplitudes of Closed and Open Strings, *Nucl. Phys. B* **269** (1986) 1.
- [9] N. E. J. Bjerrum-Bohr, P. H. Damgaard, T. Sondergaard and P. Vanhove, The Momentum Kernel of Gauge and Gravity Theories, *JHEP* **1101** (2011) 001 [arXiv:1010.3933 [hep-th]].
- [10] N. E. J. Bjerrum-Bohr, P. H. Damgaard and P. Vanhove, Minimal Basis for Gauge Theory Amplitudes, *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 161602 [arXiv:0907.1425 [hep-th]].

- [11] F. Cachazo, S. He and E. Y. Yuan, Scattering of Massless Particles: Scalars, Gluons and Gravitons, [arXiv:1309.0885 [hep-th]].
- [12] N. E. J. Bjerrum-Bohr, P. H. Damgaard, P. Tourkine and P. Vanhove, Scattering Equations and String Theory Amplitudes, [arXiv:1403.4553 [hep-th]].
- [13] C. F. Berger, Z. Bern, L. J. Dixon, F. Febres Cordero, D. Forde, T. Gleisberg, H. Ita and D. A. Kosower *et al.*, Precise Predictions for  $W + 4$  Jet Production at the Large Hadron Collider, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 092001 [arXiv:1009.2338 [hep-ph]].



Emil Bjerrum-Bohr leder 'Computations of Amplitudes Group (CAMP)' ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, der er støttet af Lundbeckfonden med et 'Junior Group Leader Fellowship'. Hans forskning omhandler de forskellige aspekter af højenergifeltet, der drejer sig om amplitudeberegninger, herunder praktiske anvendelser af amplitudeberegninger ved LHC ved CERN.

**PFEIFFER VACUUM**

**Vacuum kamre**



**Fremstillet efter kundens design**

Tlf. 4352 3800    Fax 4352 3850  
[Erik.Fieldgaard@pfeiffer-vacuum.dk](mailto:Erik.Fieldgaard@pfeiffer-vacuum.dk)  
[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

# Foreningsnyt – foredrag i efteråret 2014

| Dato        | Tid   | Foredragstitel                                                   | Foredragsholder               | Forening  |
|-------------|-------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| <b>Sep.</b> |       |                                                                  |                               |           |
| 1/9         | 19.15 | Solsystemet: Vores kosmiske hjem                                 | <i>Ib Lundgaard Rasmussen</i> | AS (Kbh)  |
| 8/9         | 19.30 | Solsystemet: Vores kosmiske hjem                                 | <i>Ib Lundgaard Rasmussen</i> | AS (Aarh) |
| 15/9        | 19.30 | Havets usynlige liv                                              | <i>Thomas Kiørboe</i>         | SNU       |
| 22/9        | 19.15 | Planetary atmospheres: The way towards finding life elsewhere    | <i>Vincent Van Eylen</i>      | AS (Kbh)  |
| 29/9        | 19.30 | Planetary atmospheres: The way towards finding life elsewhere    | <i>Vincent Van Eylen</i>      | AS (Aarh) |
| <b>Okt.</b> |       |                                                                  |                               |           |
| 6/10        | 19.30 | Hvor mange fisk er der i havet?                                  | <i>Ken Haste Andersen</i>     | SNU       |
| 20/10       | 19.15 | Mars: Vores nabo i solsystemet                                   | <i>Morten Bo Madsen</i>       | AS (Kbh)  |
| 27/10       | 19.30 | Mars: Vores nabo i solsystemet                                   | <i>Morten Bo Madsen</i>       | AS (Aarh) |
| 27/10       | 19.30 | Zooplankton-hydrodynamik                                         | <i>Anders Peter Andersen</i>  | SNU       |
| <b>Nov.</b> |       |                                                                  |                               |           |
| 3/11        | 19.15 | Kepler: En revolution i studiet af exoplaneter                   | <i>Hans Kjeldsen</i>          | AS (Kbh)  |
| 10/11       | 19.30 | Kepler: En revolution i studiet af exoplaneter                   | <i>Hans Kjeldsen</i>          | AS (Aarh) |
| 17/11       | 19.30 | Havets mikroskopiske kødædende planter                           | <i>Per Juel Hansen</i>        | SNU       |
| 24/11       | 19.15 | Spektroskopiske observationer af varme gaskæmper i høj opløsning | <i>Henriette Schwarz</i>      | AS (Kbh)  |
| <b>Dec.</b> |       |                                                                  |                               |           |
| 1/12        | 19.30 | Spektroskopiske observationer af varme gaskæmper i høj opløsning | <i>Henriette Schwarz</i>      | AS (Aarh) |
| 8/12        | 19.30 | Oceans, Climate and Carbon Pumps                                 | <i>Andre W. Visser</i>        | SNU       |

**AS (Kbh):** Astron. Selskab (København), Auditorium 4, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø ([www.astronomisk.dk](http://www.astronomisk.dk)).

**AS (Aarh):** Astron. Selskab (Aarhus), Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Auditorium D2, 8000 Aarhus C.

**SNU:** Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K ([www.naturvidenskab.net](http://www.naturvidenskab.net)).

## Selskabet for Naturlærens Udbredelse

SNU fejrer 190 års jubilæum og UNF 70 års jubilæum sammen den 19. august, læs mere på bagsiden af bladet.

Foredragene i efteråret har temaet *Livet i havet*. Hvordan vil livet i oceanerne blive påvirket af ændringer i miljø og klima, og hvordan influerer disse ændringer på vores mulighed for at udnytte havets ressourcer? Det er de overordnede spørgsmål i SNU's kommende foredragsrække, der gives af forskere med tilknytning til forskningscenteret Centre for Ocean Life, VKR Centre of Excellence.

Foredragsrækken præsenterer den spændende biologi for livet i havet, der er fundamentalt anderledes end livet på landjorden, og som spænder fra de mindste mikroskopiske plankton-organismer til de største hvaler. Samtidig beskriver foredragsrækken, hvordan viden om organismene og deres vekselvirkninger på individniveau kan hjælpe os til, at udvikle bedre modeller af havets økosystemer og forhåbentlig gøre os i stand til, at forudsige konsekvenserne af menneskeskabte påvirkninger.

## Astronomisk Selskab

Foredragenes tema er *Studiet af planetsystemer: En videnskabelig revolution*. Få gange per århundrede oplever vi videnskabelige revolutioner i hvilke vores forståelse af Universet tager store spring fremad. Lige nu er studiet af planetsystemer, vores eget, men specielt

omkring andre stjerner, midt i en sådan revolution – og danske forskere er med helt fremme.

Foredragene afholdes i samarbejde med Folkeuniversitetet og er tilrettelagt af Johan Fynbo og Ole Eggers Bjælde.

### Solformørkelse på Færøerne marts 2015

10 dage fra kun 4980,-

Tag med på et krydstogt fra Amsterdam over Newcastle til Færøerne eller flyv til Færøerne fra København og oplev et af Universets mest spektakulære begivenheder under den totale solformørkelse på Færøerne i 2015.

En total solformørkelse er ét af de smukkeste og mest mærkværdige naturfænomener man kan opleve. Har man først én gang set Solens korona under gode betingelser bliver man nemt grebet af en stærk trang til at rejse afsted for at opleve det igen. Såfremt vejret er klart, venter der deltagerne en fantastisk oplevelse. Solen er højaktiv, hvilket vil give en flot korona.

I får også mulighed for at opleve Newcastle og det nordlige England på en sightseeing til Hadrians Mur, der er ét af romernes største kulturelle levn i England. Ombord på skibet er der daglige foredrag om astronomiske emner. Foredragsholderne er nationale og internationale eksperter indenfor astronomi og fysik. På Færøerne arrangerer vi daglige udflugter til nogle af øernes smukkeste seværdigheder.

Du kan finde alle oplysninger på: [www.hj-rejs.dk](http://www.hj-rejs.dk).

# Fysik og Teknologi-Camp d. 27.-28. september 2014

Gratis camp for gymnasieelever med interesse i akustik, optik og nanoteknologi

Deltagerne får inspiration til SRP, faglige oplæg og mulighed for at møde andre unge med samme interesse. De skal lave problemformuleringer, som de selv skal besvare – og så får de lov til at arbejde i universitetets laboratorier.

Campen har seks projektspor, som deltagerne kan melde sig på efter eget ønske:

- Jordskælvssikring af bygning
- Optisk datatransport
- Nanofabrikeret magnetfeltssensor
- Konstruktion af blæseinstrumenter
- Elektromagnetisk kanon
- Akustik i en multiarena.

Deltagelse inkluderer gratis mad, drikke og overnatning. Der er 30 pladser (efter først-til-mølle-princippet).

Campen finder sted på SDU i Odense og er arrangeret af studerende, som læser til civilingeniør i Fysik og Teknologi.



Oplægsholder fra CERN, forsøg i SDU's laboratorier, quiz og aftenhygge.

Læs mere om projekterne, programmet og tilmelding på [www.sdu.dk/fysikogteknologi/camp](http://www.sdu.dk/fysikogteknologi/camp)

For yderligere information kontakt Randi Hærup Poser på [rahp@tek.sdu.dk](mailto:rahp@tek.sdu.dk) eller 6550 7326.

INGENIØRUDDANNELSERNE PÅ  
SYDDANSK UNIVERSITET.DK

## CANDSCIENT.NU

**FÅ NATURVIDENSKABELIG  
VIDEN  
OG SPAR PENGE  
PRØV DET GRATIS I 3 MÅNEDER**

Bliv en del af vores store netværk for cand.scient.er. Vi styrker dig og din karriere med viden, rådgivning og økonomiske fordele. Bliv klogere på [candscient.nu](http://candscient.nu)

# Centrifuge og tehvirvel – breddeopgave 58 og 59 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC.

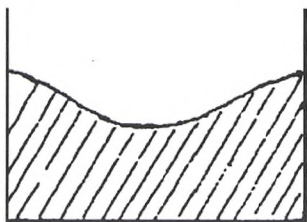
Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere.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

Her bringes løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af KVANT var disse breddeopgaver (nr. 58 og 59 i rækken her i KVANT):

## Breddeopgave 58 og 59. Centrifuge og tehvirvel

*Hvilken form har overfladen af en væske i en centrifuge? Begrund svaret.*

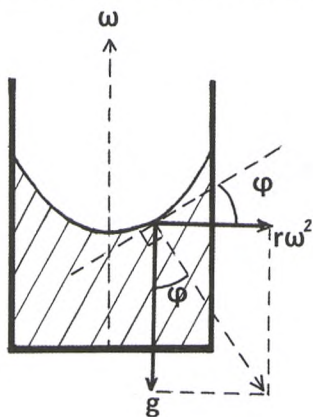
*Når der røres rundt i en kop te eller et glas vand, stiller overfladen sig typisk som antydte på figuren:*



*Hvad viser det om væskebevægelserne? Begrund svaret.*

### Løsning

**58.** Vi anskuer problemet fra et koordinatsystem, der følger med centrifugen i dens rotation. I forhold hertil står væsken stille med en overflade vinkelret på det resulterende kraftfelt i det roterende system. Idet centrifugen antages at rotere om en lodret akse, er det resulterende kraftfelt sammensat af det homogene tyngdefelt  $g$ , rettet nedad, og centrifugalfeltet  $r\omega^2$ , rettet udad, som det er vist på figur 1 ( $\omega$  er vinkelhastigheden af centrifugen,  $r$  afstanden fra centrifugeaksen).



Figur 1. Centrifuge analyseret i det medroterende system.

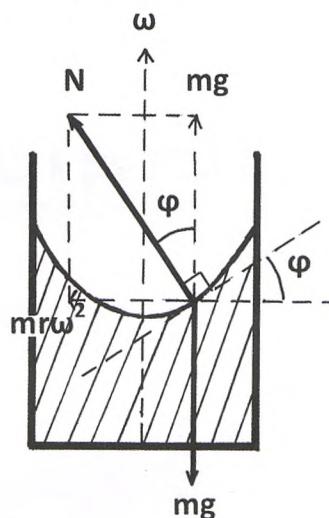
Af figur 1 fremgår det, at tangens til vinklen  $\varphi$  både er lig med  $r\omega^2/g$  og hældningskoefficienten af væskeoverfladen i afstanden  $r$  fra aksen. Kaldes højden af væskeoverfladen som funktion af  $r$  for  $h(r)$  har vi derfor:

$$\frac{dh(r)}{dr} = \frac{r\omega^2}{g}, \quad (1)$$

som ved integration giver:

$$h(r) = h(0) + \frac{r^2\omega^2}{2g}. \quad (2)$$

Tværsnittet af væskeoverfladen er altså en parabel. Overfladen af en væske i en centrifuge har således form som en omdrejningsparaboloide.



Figur 2. Centrifuge analyseret i inertialsystemet.

**59.** Opgave 58 kunne også være løst i inertialsystemet. En massedel  $m$  af væskeoverfladen bevæger sig anskuet herfra i en jævn cirkelbevægelse rundt om centrifugeaksen med vinkelhastigheden  $\omega$ . På massedelen virker tyngdekraften  $mg$ , rettet nedad, og normalreaktionen  $N$  fra de omgivende væskedele.  $N$  er vinkelret på væskeoverfladen. I modsat fald har overfladen ikke stabiliseret sig endnu, hvilket vi antager den har. Ifølge Newtons II lov skal vektorsummen af tyngdekraften og normalreaktionen være lig med massen  $m$  gange accelerationen  $r\omega^2$ , rettet imod aksen, i den jævne cirkelbevægelse for massedelen  $m$  i afstanden  $r$  fra

aksen. Som vist på figur 2 betyder det, at den lodrette komponent af  $N$  har størrelsen  $mg$ , medens den vandrette komponent af  $N$  har størrelsen  $mr\omega^2$ . Herefter kan ligning (1) igen aflæses af figuren og opgave 58 løses som gjort ved brug af figur 1.

Opgave 59 lader sig også besvare ved hjælp af figur 2. Af figuren kan vi aflæse sammenhængen imellem hældningen af overfladen og vinkelfrekvensen for rotationen i afstanden  $r$  til at være givet ved:

$$\tan \varphi = r\omega^2/g. \quad (3)$$

Tegningen af overfladen i tekoppen viser et udseende i retning af centrifugens paraboloide i midten af koppen. Ved kanten af koppen er overfladen derimod vandret. Opgavefiguren tyder således ifølge ligning (3) på, at teen roterer med den frekvens den blev omrørt med i midten af koppen, medens den er i hvile ved kopens overflade på grund af gnidningen imod overfladen.

### Kommentar

Hvis der er blade i teen, når der røres rundt i den, vil de ende med at samle sig på bunden midt i koppen. Man kan spørge, hvorfor de ikke centrifugeres udad til kanten af koppen i betragtning af deres større massefylde end teens? Forklaringen er først givet af A. Einstein i 1926. Det er igen gnidningen der er i spil. Men nu imod kopens bund. På grund af gnidningen deltager væskelaget umiddelbart over bunden ikke i rotationen. Derfor vil det på grund af den imod centrum aftagende tyngde af den overliggende væske blive drevet imod centrum. Der opstår en lodret hvirvel, som i en skypumpe, med opstigende væske i centrum og nedadstrømmende væske længere ude i koppen. Og det er denne hvirvel, der samler tebladene i midten. (Ref.: H.H. Jensen, Deformerbare Stoffers Dynamik, Gjellerup 1968, side 74. Sagen har også været genstand for diskussion i *Gamma* nr. 90, 97, 101 og 104 (1992-1996).).

Jeg har modstillet centrifugeopgaven og tehvirvelopgaven som illustration af vigtigheden af at kunne vælge beskrivelsessystem efter, hvad der i sammenhængen er hensigtsmæssigt. Centrifugen lader sig nemmest forstå i det medroterende system, selvom det, som gjort, også kan lade sig gøre i inertialsystemet. Omvendt er tehvirvlens overfladeform nemmere at forklare i inertialsystemet, som gjort, selvom tolkningen også kan gives ved henvisning til varierende medroterende systemer lokalt ud igennem koppen. Endelig er Einsteins forklaring på samlingen af tebladene bundet til kopens system.

De to opgaver giver mig også anledning til at kommentere ordvalgene "fiktive kræfter", "centripetalkraft" og "tyngdeacceleration" i lærebogslitteraturen i fysik.

Ved den skriftlige eksamen ved breddekurset i sommeren 2007 var en af opgaverne:

*Fysikeren Jens Martin Knudsen lod engang så karse på en stor roterende skive for overfor de studerende at demonstrere, at de såkaldte fiktive kræfter ikke er så fiktive endda. Hvordan groede karsen i de 14 dage skiven roterede? Begrund svaret.*

Demonstrationsforsøget viste, at karsen gror imod det resulterende kraftfelt i det medroterende system. For karsen er centrifugalkraften som følge af rotationen af underlaget, den gror på, og tyngdekraften fra Jorden lige reelle og lige lidt fiktive. På samme måde som det er tilfældet for væskedelene i centrifugen. Ordet "fiktiv" om centrifugalkraften er derfor uheldig valgt. I min undervisning i elementær mekanik bruger jeg ordene *naturkræfter* om kræfter, hvor der henvises til et naturfænomen som kilde, og *systemkræfter*, når kilden til kræfterne er accelerationen af koordinatsystemet, hvori bevægelsen beskrives.

Ifølge min erfaring er det vigtigt i introducerende mekanikundervisning at fastholde den begrebslige forskellighed imellem de to sider af Newtons II lov. På den ene side af ligningen står det, der kan måles ved f.eks. at indskyde fjedre, kræfterne. På den anden side står en beskrivelse af bevægelse, der kan måles ved hjælp af ure og meterstokke. Bevægelsen er naturligvis bevægelse i forhold til noget med deraf afledte konsekvenser for, hvilke kræfter der skal medtænkes. Men uanset, hvad bevægelsen beskrives i forhold til, giver det mindst forvirring at tænke på Newtons II lov, ikke som en matematisk identitet, men som en erfaringslov.

Centrifugalkraften hører til på kraftsiden af Newtons II lov. Anderledes forholder det sig med *centripetalkraften*. Formelt set er det den resulterende kraft, uanset hvad den skyldes, der forårsager en jævn cirkelbevægelse. Så langt så godt. Men når centripetalkraften herefter identificeres med  $mr\omega^2$ , giver det efter min erfaring anledning til begrebsforvirring hos de studerende tenderende til, at der på figur 2 skal indtegnes tre kræfter på væskedelene (Som der, i modsætning hertil, godt kunne være gjort på figur 1). Størrelsen  $mr\omega^2$  på figur 2 er ikke en kraft. Den er en matematisk følge af beskrivelsen af bevægelsen som en jævn cirkelbevægelse. Ifølge erfaringsloven er størrelsen lig med den resulterende kraft. Hvis den derimod identificeres med den resulterende kraft er Newtons II lov gjort til en definitions-ligning og ikke en erfaringslov. Uanset den eventuelle justering af statussen af Newtons II lov senere i deres fysikstudier er det efter min erfaring et dårligt udgangspunkt for studerende til at lære Newtons mekanik. I min undervisning forsøger jeg helt at undgå at bruge udtrykket centripetalkraft.

Tilsvarende er "tyngdeaccelerationen" et uheldigt ordvalg for tyngdefeltstyrken. Ved brug af Newtons II lov kan det udregnes, at accelerationen ved et frit fald i tyngdefeltet er lig med tyngdefeltstyrken. Det er imidlertid forstyrrende for forståelsen af Newtons II lov, at ordet tyngdeacceleration bruges som betegnelse for tyngdefeltstyrke.

### Breddeopgave 60. Fisk

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra sommereksamen 2009, nr. 60 i rækken her i KVANT):

*Som tommelfinger regel svømmer store fisk hurtigere end ligedannede små fisk. Forklar hvorfor.*

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.

# På studietur til CERN

Af Michael Cramer Andersen og 2x, Christianshavns Gymnasium

Ét af de steder som er oplagt at besøge, når man rejser på studietur med fysik, er det europæiske partikelfysikcenter CERN, der ligger ved Geneve i Schweiz. Her berettes om to dages besøg i april 2014.

Når den store accelerator "Large Hadron Collider" (LHC) kører, er der ingen adgang under jorden pga. strålingen. Det er derfor heldigt, at LHC er ved at blive opgraderet netop i disse år, så CERNs officielle guidetur også inkluderede en rundvisning på ét af eksperimenterne (typisk ATLAS eller LHCb). Den skal bestilles adskillige måneder i forvejen [1]. Derudover er der gratis adgang til to udstillinger, den lidt ældre "Microcosm" og en nyere i "The Globe". De har dog ikke så stort fagligt niveau. Der skal derfor arrangeres foredrag og rundvisninger fx med nogle af de danske forskere som er ved CERN. De er ofte positive overfor at fortælle om deres arbejde, men har omvendt svært ved at lave bindende aftaler lang tid i forvejen. Det er derfor en god idé at satse på flere aftaler.

Programmet for de to dage på CERN bestod den første dag af udstillingen Microcosm, besøg på Datacentret, frokost i CERNs lille kantine samt foredrag om ATLAS' triggersystem og forevisning af ATLAS-kontrolrummet. Den anden dag var der forevisning af Antibrint-eksperimentet Alpha, foredrag om teoretisk partikelfysik og kosmologi samt CERNs officielle introduktion og forevisning af LHCb-eksperimentet.

Som forberedelse til turen skrev eleverne en avis med artikler om forskellige aspekter af CERNs forskning. Det følgende er bearbejdet ud fra elevernes egne indtryk, taget fra de resuméer af turen de skulle skrive.

## Udstillingerne Microcosm og The Globe

Første dag gik turen til CERN. Vi startede med at se en udstilling om hvad CERN går ud på, og hvilke ting der arbejdes med. Der var for eksempel illustrationer af atomets opbygning og de fire fundamentale kræfter blev forklaret med interaktive modeller. Der var en stor flot model af LHC-acceleratoren, der bl.a. viste de mange små og nøjagtige detaljer ved maskinen. Vi kiggede kun kort på udstillingen i den store kuppel, "The Globe". Den omhandlede stjerner og Universets fødsel og der var skærme overalt på væggene og i loftet, hvor bl.a. Big Bang blev simuleret.

## CERNs datacenter

Vores guide, *Lars Holm Nielsen*, hentede os ved receptionen og gav os derefter en kort rundvisning på noget af CERN inkl. deres datacenter, hvor han selv arbejdede med "CERNopenlab". Han fortalte om datalagringen som blev foretaget af 90.000 computere, der tilsammen behandlede ca. 1 petabyte data om dagen. Udover det fortalte han om datakommunikation mellem landene, "The Grid", samt uddannelsesmuligheder på CERN,

der er meget gode. Der er bl.a. sommerkurser for naturvidenskabelige kandidater og fellowships.



**Figur 1.** Datacentret ved CERN, hvor bl.a. verdens første World Wide Web-server blev installeret. Her ankommer og fordeles også dataene fra LHC til et netværk af store datacentre forbundet i "The Grid". Forskerne kan derefter hente data og analysere dem, som om det var én computer med enorm regnekraft og lagerkapacitet.

## ATLAS-detektoren

Om eftermiddagen tog *Gorm Galster* over. Han viste os det store auditorium og fortalte om sit arbejde ved ATLAS-eksperimentet. Han har studeret både fysik og datalogi og var nu fellow ved CERN, hvor han skrev master-projekt (speciale) og han skal senere skrive ph.d. Gorm fortalte om "triggersystemet", der er et slags filter, som kan sortere de uinteressante data fra. Han brugte en fotofælde som metafor: De eneste biler man er interesseret i at registrere, er de biler, der kører for hurtigt. Tilsvarende vil man kun gemme data fra kollisioner, hvor der sker noget interessant. Bagefter viste han os ATLAS-kontrolrummet og et stort vægmaleri, der viste hvordan de forskellige lag i detektoren kunne registrere de forskellige partikler. Vi lærte bl.a. at ATLAS er én af de to store detektorer ved LHC, der kan undersøge alle partiklernes egenskaber. Det er bl.a. med den at Higgs-partiklen er fundet. ATLAS leder også efter tegn på ekstra dimensioner og kan måske give svar på spørgsmålene om det mørke stof – "dark matter". Gorm fortalte derudover om det sociale liv på CERN.



**Figur 2.** En bygning der er malet så den ligner ATLAS-detektoren. Den rigtige detektor ligger ca. 100 m under jorden og er 2,5 gange større!

### Antibrint-eksperimentet

Da vi var på CERN igen lagde vi ud med at få rundvisning og foredrag om antibrintforsøget, "Alpha". Her forsøger fysikerne at finde den bedst mulige måde at fremstille antistof på (her brint) samt at kunne fastholde det og undersøge det. De benytter CERNs Antiproton Decelerator (AD) og magnetiske fælder. Det kræver meget teknik og utrolig stor præcision. Alene at styre de mange tusinde processer kræver omfattende programmering.



**Figur 3.** Antibrint-eksperimentet Alpha blev forklaret af *Lars Varming Jørgensen* (billedet) og *Niels Madsen*. Her er det lykkedes at opbevare nogle få antibrintatomer i hele to måneder uden et eneste henfald i en overraskende lille metalcylinder (nederst).

### Teoretisk partikelfysik

Efter frokost fik vi et meget spændende foredrag af den danske forsker *Peter Zeiler Skands*. Han fortalte om sin karriere, der efter studierne i København havde ført ham til først Lund, hvor han skrev ph.d., og senere til Fermilab i USA og derefter til CERN. Han fortalte overordnet om CERN og hvorfor disse partikler er så spændende at undersøge. LHC-projektet blev sat ind i et større perspektiv i forhold til det tidlige univers. Han fortalte om Higgs-partiklen og funktionen og meningen med Higgs-feltet og gik i dybden med kvarkerne, som er ét af hans specialer. Foredraget endte med en perspektivering til stadig uløste problemer indenfor fysikken, bl.a. hvad mørkt stof og mørk energi er og om man kan fremstille den kvante-tyngdekrafts-teori.



**Figur 4.** Teoretisk partikelfysiker *Peter Zeiler Skands* fortæller om Universets uløste mysterier.

### LHCb-eksperimentet

Sidste punkt på programmet var en "Official Guidet Tour", hvor vi var under jorden og se LHCb-eksperimentet, der er specielt indrettet til at studere forskelle på stof og antistof. Det er ikke en "multi-purpose"-detektor som fx ATLAS, men fremstillet helt specielt til at måle vinkler i dannelsen af b- og anti-b-kvarker. Vi fik en rundvisning og et foredrag om hvordan netop denne detektor fungerer og hvilke partikler den havde opdaget. Der var en kæmpe elektromagnet, som enten tiltrak eller frastødte ladede partikler og derved kan man vide, om partiklerne er positivt eller negativt ladede. Efterfølgende rejste partiklerne igennem forskellige lag, der standser først elektroner og siden tungere partikler som fx protoner og neutroner. Her blev det meget konkret i forhold til detektorernes lagvise opbygning og de forskellige partiklers vandring gennem detektoren. En overvældende afsked med CERN.



**Figur 5.** LHCb-eksperimentet. Efter en noget tidskrævende sikkerhedskontrol førte en elevator os hurtigt de ca. 100 m ned under jorden sammen med vores guider.

### En lærerig tur

Klassen har matematik på A-niveau og enten fysik + kemi B eller biotek A. Det blev allerede besluttet i 1.g, at klassen skulle til Schweiz, med CERN som én af hovedattraktionerne. Udover to dages besøg ved CERN inkluderede fysikdelen også et atomkraftværk og vandkraftværk i Mühleberg. Det andet fag var historie. På de to dages besøg ved CERN fik vi et indblik i både teoretiske og praktiske aspekter af forskningen. Det var især spændende, med egne øjne, at opleve de enorme instrumenter. Det gør partikelfysikken meget konkret. De utroligt rare og passionerede fysikere, vi mødte gjorde hele oplevelsen af CERN helt fantastisk. Tak for det!

### Litteratur

[1] Visit CERN, <http://outreach.web.cern.ch/outreach/>

# Fremtidige accelerators

Af Mogens Dam, Discovery Center, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Med Large Hadron Collider har CERN et banebrydende fysik-program, der strækker sig omkring to årtier frem i tiden. Sideløbende arbejdes der med planlægning og udvikling af næste generation af accelerators. Opdagelsen af Higgs-bosonen har givet et nyt vigtigt pejlemærke for valg af næste acceleratorprojekt. Præcise studier af den nye partikel vil kunne afdække dens natur og dermed muligvis afdække *ny fysik*, altså fysik hinsides partikelfysikkens Standardmodel. Meget peger på, at den næste store accelerator bliver en elektron-positron-collider. Hvor man i lang tid er gået ud fra, at dette ville blive en lineær collider, har den forholdsvis lave masse af Higgs-bosonen åbnet overvejelser om, hvorvidt en cirkulær collider ville være at foretrække.

Udviklingen af partikelaccelerators over de seneste otte årtier har været afgørende for udforskningen af den subatomare verden. Mange teknologiske skridt har ledt fra den første 10 cm store cyclotron til CERNs Large Hadron Collider (LHC), som i dag danner basis for omkring 8000 forskeres videnskabelige arbejde. I denne artikel vil jeg forsøge at kigge lidt ud i fremtiden til næste generation af mulige partikelaccelerators. Ligesom LHC, vil fremtidens accelerators være store og kostbare og vil derfor skulle konstrueres i et tæt internationalt samarbejde. Der må nødvendigvis prioriteres hårdt, og langt fra alle muligheder vil blive implementeret.

## Fortid og nutid: LEP og LHC

Før vi kaster os over fremtiden vil vi i dette afsnit tage et kig på den seneste generation af accelerators ved CERN, nemlig LEP og LHC.

De første overvejelser omkring LEP (Large Electron-Positron Collider), som dannede ryggrad i CERNs fysikprogram fra 1989 til 2001, daterer tilbage til midten af 1970'erne. I 1978 besluttedes det således at starte konstruktionen af en maskine med en omkreds på ca. 30 km, og med en maksimal stråleenergi på 90 GeV, som ville kunne opgraderes til 130 GeV, når superledende accelerationsenheder ville blive tilgængelige. Sideløbende opstod der hurtigt planer om at installere en meget energirig proton-accelerator – Large Hadron Collider – i LEP-tunnellen.

LHC har leveret proton-proton-kollisioner siden 2009, og der foreligger idag planer om – først ved øget energi, senere ved øget rate – at køre acceleratoren helt frem til midten af 2030'erne for at udnytte dens fulde potentiale.

Både LEP og det, vi hidtil har set fra LHC, har udgjort yderst succesrige fysikprogrammer. Gennem præcise målinger ved kollisionsenergier omkring Z-boson-massen afgjorde LEP-eksperimenterne allerede tidligt et af Naturens store spørgsmål: Der findes tre og kun tre elementære fermion-generationer i Naturen; altså tre generationer af stofflige partikler. Gennem talrige præcisionsmålinger udsattes partikelfysikkens Standardmodel – den altomfavnende teori for Naturens elementære bestandele – for en sand bygeregn af angreb gennem LEP-programmets løbetid. Standardmodellen kom ud sejrende og stod bagefter stærkere end nogensinde tidligere. Ved udnyttelse af Standardmodellens

beregnbare indre bindinger, lykkedes det ved denne proces i første omgang at fastlægge top-kvarkens masse, før denne partikel var eksperimentelt påvist, og i anden omgang at påvise, at Higgs-bosonen måtte være forholdsvis let, en forudsigelse som blev bekræftet ved den spektakulære opdagelse af Higgs-bosonen ved LHC i 2012. LEP/LHC-programmet udgør et smukt eksempel på, hvordan veltilrettelagt infrastruktur – i dette tilfælde acceleratortunnelen og dens installationer – kan danne basis for banebrydende forskning over adskillige årtier.



**Figur 1.** LEP/LHC-tunnelens placering i landskabet omkring CERN udenfor Geneve. Foto: CERN.

For at forstå betydningen af LEP/LHC-tunnellen dvæler vi et øjeblik ved dens geometri: Der er tale om en cirkulær tunnel med en omkreds på 27 km, som skitseret på figur 1. Cirkulær, fordi man derved kan udnytte de accelererede partikler igen og igen: Ved hver kollision vekselsvirkende kun en forsvindende brøkdel af hver stråle; den resterende del kommer tilbage én omgang senere parat til en ny kollision. Tunnellens store omkreds har to forskellige forklaringer: én for LEP (elektroner og positroner) og én for LHC (protoner). I en elektron-ring kæmper man mod energitab gennem synchrotronstråling, altså det faktum at ladede partikler, der afbøjes, udstråler fotoner. Energitabet er proportional med forholdet mellem partiklernes energi og masse i fjerde potens og invers proportional med afbøjningsradius,  $(E/m)^4/R$ . Det stiger derfor meget stejlt for de meget lette elektroner. Ved en stråleenergi på 104,5 GeV – den højeste, der blev opnået ved LEP – var energitabet per omgang således på omkring 4%. Som kompensation måtte der tilføres en kontinuert accelerationsenergi på omkring 20 MW. For protonerne

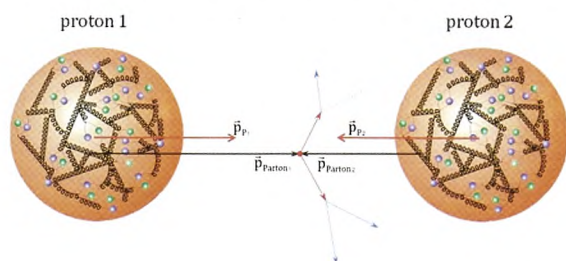
i LHC kan der opnå langt højere energier. Når design-energien nås i 2015, vil hver stråle have en energi på 7 TeV (7000 GeV), altså 70 gange højere end ved LEP. Synchrotronstrålingen vil da stadig være forsvindende, idet protoner jo er næsten 2000 gange tungere end elektroner. Hvad der derimod her begrænser energien er styrken af dipolmagnetene, der holder protonerne i deres cirkulære baner. Gennem anvendelse af superledende magneter har man opnået en dipolstyrke på 8,3 Tesla, som er nødvendig for at nå designenergien. Figur 2 viser LHC-acceleratoren med dens voluminøse superledende dipolmagneter.



Figur 2. Et glimt af LHC-acceleratoren. Foto: CERN.

### Kollisioner: Elektron-positron eller proton-proton

Som det vil fremgå af det ovenstående, så er det ikke muligt ved en cirkulær elektron-ring at opnå energier, som væsentligt overstiger LEP-energiene: Synchrotronstrålingen aftager kun invers med radius, så en fordobling af energien kræver ikke mindre end en 16-dobling af acceleratorens størrelse for at holde energitabet på samme niveau. Det er således ofte blevet fremført, at LEP var den ultimative cirkulære elektron-positron-collider, hvis energi aldrig ville blive overgået. Fremtiden synes dermed åben for proton-proton-collider, hvis energi udelukkende er begrænset af dipolstyrken, altså et rent teknologisk problem.



Figur 3. Protoner er sammensatte objekter bestående af kvarker, anti-kvarker og gluoner. Proton-proton-sammenstød er i virkeligheden sammenstød mellem disse bestanddele. Grafik: CERN.

For mange studier er der imidlertid gode grunde til at holde fast i elektron-positron-sammenstød. I modsætning til elektroner og positroner, som er elementære partikler, er protoner sammensatte objekter bestående af kvarker, anti-kvarker og gluoner. Sammenstød mellem protoner er dermed i virkeligheden sammenstød mellem protonernes bestanddele, se figur 3. Og idet

disse bestanddele vekselvirker med hinanden via den stærke kraft, mens de reaktioner, vi er interesserede i, typisk skyldes den svage kraft, så er forholdet mellem raten af interessante hændelser (*signal*) og uinteressante hændelser (*baggrund*) typisk som én til en milliard. Proton-proton-sammenstød kaldes derfor "beskidte". I modsætning hertil kaldes elektron-positron-sammenstød "rene": Her vekselvirker de kolliderende partikler ikke stærkt, men udelukkende via den elektromagnetiske og den svage kraft, og derfor er stort set alle hændelser interessante. Yderligere vil protonernes kolliderende bestanddele ikke bære den fulde stråleenergi, men kun en stokastisk fordelt andel af denne. De elementære sammenstød foregår altså ved energier, som typisk er betydeligt lavere end acceleratorens pålydende energi.

### Lineære collidere

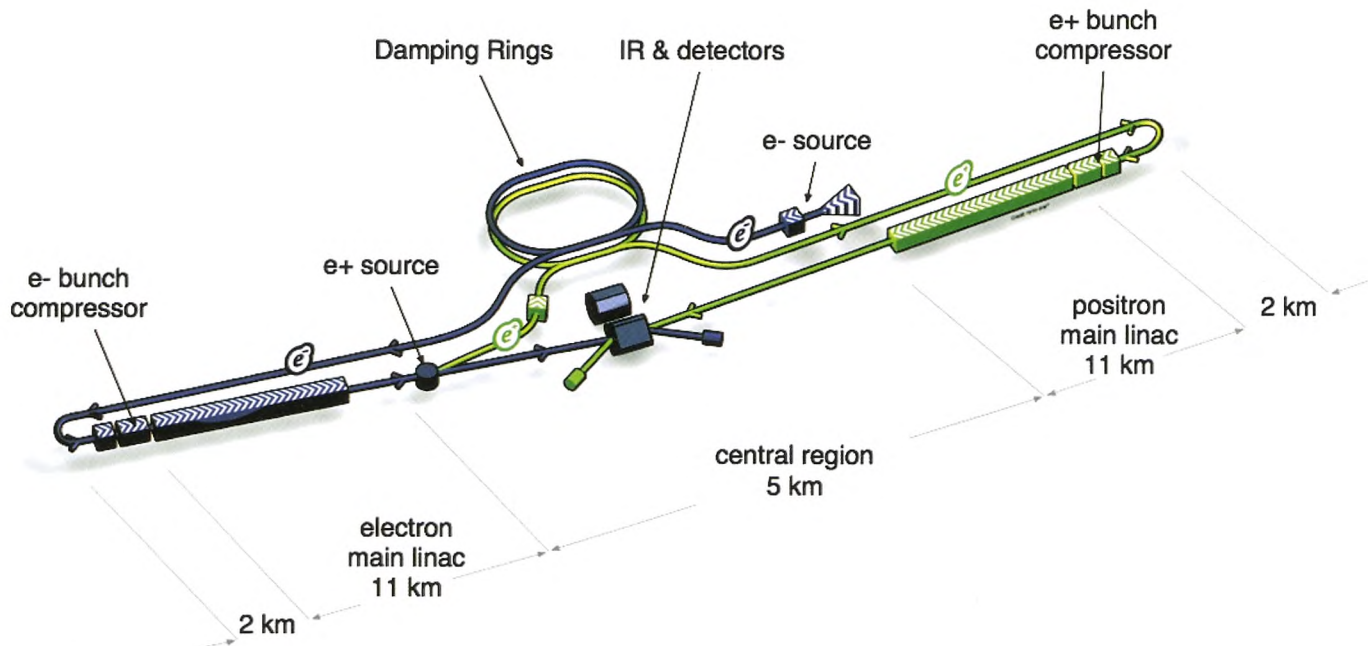
Ønsket om højenergetiske elektron-positron-sammenstød har ledt til studie og udvikling af lineære collidere. Princippet i disse er, at man retter to lineære systemer af meget kraftige accelerationsenheder mod hinanden, accelererer elektroner op i det ene system, positroner i det andet, og lader de to stråler kolliderer på midten, som skitseret på figur 4.

Ved en lineær accelerator undgår man begrænsningen fra synchrotronstråling, men der opstår til gengæld en del nye teknologiske udfordringer, som alle hænger sammen med det faktum, at man her, i modsætning til i det cirkulære tilfælde, kun benytter de samme accelererede partikler én gang. De største udfordringer er:

**Accelerationsgradient:** For at accelerere partikler til fx 250 GeV må de gennemløbe en spændingsforskel på 250 GV. Ved anvendelse af superledende accelerationsenheder, som opererer ved radiofrekvens, kan man i dag oppebære en gradient på godt 30 MV/m, hvorfor det tager mere end 8 km at nå den ønskede energi.

**Fokusering:** For at udnytte de accelererede partikler optimalt, må man sørge for, at så stor en andel som muligt faktisk vekselvirker. For at opnå dette, fokuseres strålerne til et ekstremt lille tværsnitsareal før kollision. I praksis planlægger man at fokusere strålerne til nogle få nanometers højde og nogle få hundrede nanometers bredde.

Der findes i dag to bud på en fremtidig lineær collider [1, 2]: i) International Linear Collider (ILC), som tager sigte på en kollisionenergi på 500 GeV (opgraderbar til 1000 GeV), og ii) Compact Linear Collider (CLIC), som tager sigte på en kollisionenergi på i første omgang 1000 GeV, senere 3000 eller endda 5000 GeV. Hvor ILC er baseret på superledende accelerationsenheder, som de lader sig bygge i dag, så sigter CLIC mod en større accelerationsgradient på 100 MV/m ved anvendelse af et dobbeltstrålesystem, hvor den egentlige stråle accelereres op via en parallelløbende stråle med højere intensitet og lavere energi. Denne teknologi er stadig ikke fuldt udviklet.



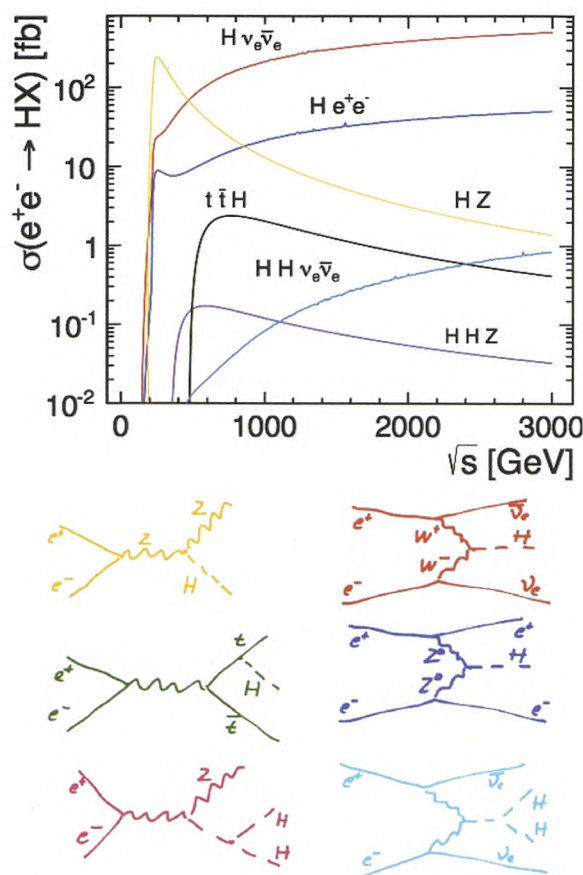
Figur 4. Designskitse af den foreslåede International Linear Collider, ILC. Elektroner accelereres op fra venstre, positroner fra højre. Tegning fra [1].

### TLEP: en ny cirkulær elektron-positron-collider

Opdagelsen af Higgs-bosonen ved en forholdsvis lav masse på 125 GeV har betydet en genfødsel af overvejelserne om at bygge en ny stor cirkulær elektron-positron-collider, uofficielt kaldet TLEP [3]. Hovedformålet er at foretage højstatistikmålinger af Higgs-bosonen under rene eksperimentelle forhold. Projektet omtales derfor ofte som en *Higgs factory*, altså en Higgs-fabrik.

Spørgsmålet er, om Higgs-bosonen på alle måder opfører sig som forudsagt af Standardmodellen. Populære udvidelser af Standardmodellen, såsom teorier indeholdende supersymmetri, ekstra dimensioner, eller andet, forudsiger i almindelighed, at Higgs-bosonen vil opføre sig en smule anderledes. Typisk er afvigelserne på procentniveau. En signifikant måling kræver en præcision betydeligt bedre end dette, hvorfor man har brug for at studere af størrelsesorden en million Higgs-henfald.

Som vist på figur 5 er sandsynligheden for at producere en Higgs-boson forholdsvis stor for kollisionsenergier omkring 250 GeV. En sådan energi ville man faktisk kunne have nået i LEP-tunnellen, hvis man havde været parat til at acceptere en fordobling af energitabet via synchrotronstråling. Der har kortvarigt været tanker om at vende tilbage til LEP-tunnelen efter LHC-programmets afslutning, det såkaldte LEP3-projekt. Med TLEP går man imidlertid andre veje og er i færd med at undersøge muligheden af at konstruere en accelerator, der kan levere ekstremt høje begivenhedsrater, i en ny tunnel med en omkreds på 80-100 km i området omkring CERN, se figur 6.

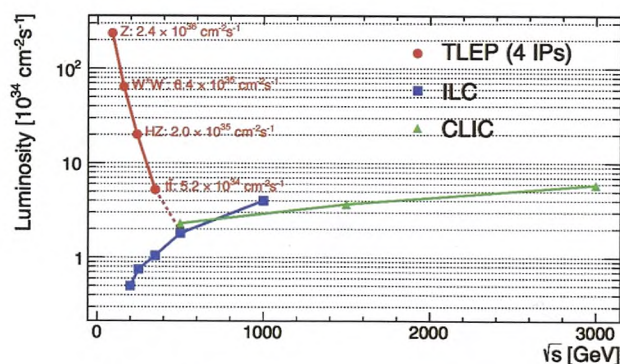


Figur 5. Øverst, tværsnittet (proportional med sandsynligheden) for Higgs-produktion i elektron-positron-sammenstød som funktion af kollisionsenergien. De forskellige kurver svarer til forskellige processer, som skitseret nederst med samme farvekode. For lave energier, er den vigtigste proces den, hvor Higgs-bosonen stråles af fra en Z-boson (gul). For højere energier produceres Higgs-bosonen hyppigst ved fusion af to W-bosoner (rød). Figurer: Frank Simon, Max-Planck-Institute for Physics.



**Figur 6.** Mulig placering af en 80 km tunnel (stiplet linje), som kan huse CERNs FCC-projekt (se senere) og dermed TLEP. En 100 km tunnel (fuld optrukket linje) studeres ligeledes. Den hvide cirkel repræsenterer LHC-tunnellen. Fotografi: [4].

Argumenterne for at gå til en større tunnel er mange: Blandt andet åbnes der hermed mulighed for at gå til noget højere energier, og man slipper for at vente på LHCs afslutning før konstruktionen kan påbegyndes.



**Figur 7.** Den instantane luminositet for TLEP, ILC og CLIC som funktion af kollisionens energi. Den instantane luminositet er et mål for kollisionens rate. Fra [4].

Hvorfor TLEP er interessant, kan forstås ved at betragte figur 7, der giver et mål proportional med kollisionens rate som funktion af energien for TLEP sammenlignet med ILC og CLIC. Kollisionens rate for TLEP falder dramatisk med energien, men for enhver energi under 500 GeV leverer TLEP langt højere rater end de lineære collidere. Afsat på TLEP-kurven er fire punkter svarende til planlagte fysikprogrammer.

**Z:** Omkring 90 GeV foretages studier af Z-bosonen ( $10^{12}$  Z-bosoner).

**$W^+W^-$ :** Omkring 180 GeV foretages studier af W-bosonen ( $10^8$  W-bosoner).

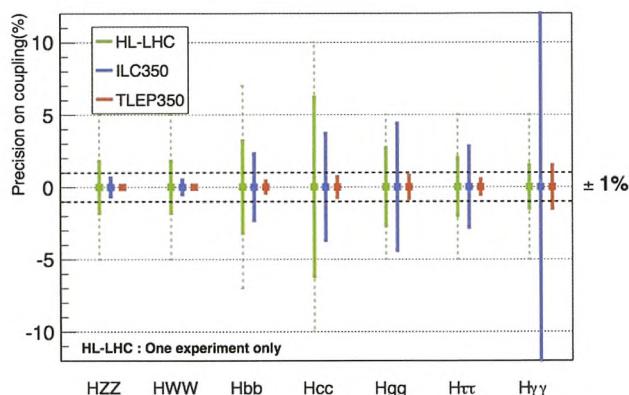
**HZ:** Omkring 240 GeV foretages studier af Higgs-bosonen ( $10^6$  Higgs-bosoner).

**$t\bar{t}$ :** Omkring 350 GeV foretages studier af top-kvarken ( $10^6$  top-kvarker).

Som det fremgår, vil alle studier være kendetegnet ved en meget høj statistisk præcision. De to førstnævnte studier udgør en gentagelse af LEP-programmet, men med fem størrelsesordner højere statistik. Populært sagt vil man kunne gentage hele 1990'ernes LEP-program på mindre end en halv time. Det samlede fysikprogram vil have en varighed på omkring 15 år.

Med dette program, vil TLEP levere særdeles præcise målinger af Higgs-bosonens egenskaber, som vist på figur 8. Generelt ligger usikkerhederne komfortabelt inden for det teoretisk mest interessante område på  $\pm 1\%$ . Imidlertid er den del af TLEP-målingerne, der ikke er direkte relateret til Higgs-bosonen, ligeledes af stor interesse. I særdeleshed vil masserne af W-bosonen og top-kvarken kunne bestemmes til en præcision, der er én til to størrelsesordner bedre end i dag. Dette indebærer en overordenlig præcis test af Standardmodellens konsistens.

På samme måde som LEP-eksperimenterne kunne forudsige Higgs-bosonens masse i et område over det, der var direkte tilgængeligt, vil man med en sådan præcision kunne udtale sig om den eventuelle eksistens af nye partikler og/eller fænomener op til høje energier. Faktisk er præcisionen så god, at man vil være følsom helt op til en masseskala omkring 30 TeV; altså næsten 100 gange højere end TLEPs kollisionseenergi.



**Figur 8.** Forudsagt præcision på målingen Higgs-bosonens kobling til andre partikler for forskellige fremtidige faciliteter: HL-LHC (grøn) svarer til LHC ved 14 TeV med en 100 gange større datamængde end hidtil indsamlet (stiplede versus fuldt optrukne linjer svarer til forskellige antagelser omkring systematiske usikkerheder); ILC350 (blå) svarer til den samlede planlagte kørsel af ILC ved 250 og 350 GeV; samme for TLEP350 (rød). Det teoretisk mest interessante område svarende til  $\pm 1\%$  usikkerhed er fremhævet. Fra [4].

## CERNs FCC-program

I februar dette år søsatte CERN det såkaldte FCC-program, hvor FCC står for *Future Circular Colliders*. Programmet skal under ét studere potentiale og muligheder for at konstruere nye cirkulære collidere ved CERN [5, 6]. Studiet inkluderer dermed både TLEP (som hermed officielt er omdøbt til FCC-ee) og en ny stor proton-proton-collider, FCC-hh. De to maskiner skal kunne huses i samme 80–100 km lange tunnel. Målet for FCC-hh er at nå en kollisionseenergi på 100 TeV for studier af Higgs-bosonen og for direkte søgning efter *ny fysik* op til ekstremt høje masseskalaer. Hvor TLEP stort set kan bygges med kendt teknologi, så vil det for FCC-hh kræve udvikling af kraftigere dipolmagneter: En feltstyrke på 20 Tesla er nødvendig for en 80 km tunnel, mens man kan “nøjes med” 16 Tesla for en 100 km tunnel. Hvor både fysik- og designstudier for TLEP allerede er forholdsvis fremskredne [4], så er overvejelserne omkring FCC-hh foreløbigt langt mindre modne. FCC-studiet arbejder hen imod at udarbejde en *Conceptual Design Report* inden 2018.

## Hvad bliver bygget?

Før man giver sig i kast med at konstruere en ny accelerator, er det en god idé at gøre sig klar, hvad man ønsker at bruge den til. Lad os derfor betragte det partikelfysiske landskab her, fire år efter LHCs opstart. Meget kort opsummeret er status den, at Higgs-bosonen er blevet afdækket, mens ingen af talrige søgninger efter

*ny fysik* op til den masseskala, hvor LHC indtil videre er følsom – generelt op til omkring 1000 GeV – har båret frugt. Netop nu gennemgår LHC udbedringer, som fra næste år skal gøre den i stand til at operere ved design-energien på 14 TeV; næsten en fordobling i forhold til det hidtidige. Yderligere forventes den indsamlede datamængde at fem-dobles inden 2018. Tilsammen vil dette betyde en fordobling af masse-skalaen, op til hvilken LHC er følsom over for *ny fysik*. Det er altså muligt, at vi med LHC netop nu står på tærsklen til nye store opdagelser!

Valget af næste accelerator vil givetvis afhænge af udfaldet af de kommende få års LHC-kørsel. Vi ved allerede at Higgs-bosonen er her og venter på at blive studeret. Hvad, vi ikke ved, er, om LHC vil afdække hints af *ny fysik* i masse-området, som er interessant for ILC og/eller CLIC. Skulle dette være tilfældet, vil interessen for en lineær collider givetvis vokse. I modsat fald må man nøje opveje TLEPs højere præcision for studiet af kendte partikler, inklusive Higgs-bosonen, mod en lineær colliders højere energi-rækkevidde. Beslutter man at anlægge TLEP, vil dette kunne være første skridt i det fulde FCC-program, som med ekstremt højenergetiske proton-proton-sammenstød vil kunne afdække et masseområde, langt højere end det, der er tilgængelig ved nogen lineær collider. Med en sådan beslutning ville CERN have et spændende fysik-program, som rækker betydeligt ind i anden halvdel af dette århundrede.

## Litteratur

- [1] International Linear Collider (ILC), <http://www.linearcollider.org>
- [2] Compact Linear Collider (CLIC), <http://clic-study.org>
- [3] Tera-LEP (TLEP), <http://cern.ch/fcc-ee>
- [4] M. Bicer et al. (2014), First Look at the Physics Case of TLEP, *JHEP* **01** (2014) 164, <http://arxiv.org/abs/1308.6176>
- [5] Future Circular Colliders (FCC), <http://cern.ch/fcc>
- [6] Michael Benedikt og Frank Zimmermann (2014), The Future Circular Collider study, *CERN Courier* den 28. marts 2014, <http://cerncourier.com/cws/article/cern/56603>

*Mogens Dam* er lektor ved Niels Bohr Institutet og har tidligere arbejdet ved CERNs LEP-collider (med præcise efterprøvnings af Standard-modellen) og HERA-B-eksperimenter på DESY (med konstruktion af apparatur til real-time filtrering af begivenheder). Nu arbejder han ved ATLAS-eksperimentet ved LHC, med målinger af Higgs-bosonen i henfaldskanaler, som indeholder tau-leptoner. Det seneste år har han sideløbende været engageret i planlægningen af en ny stor cirkulær elektron-positron-collider, TLEP, ved CERN.

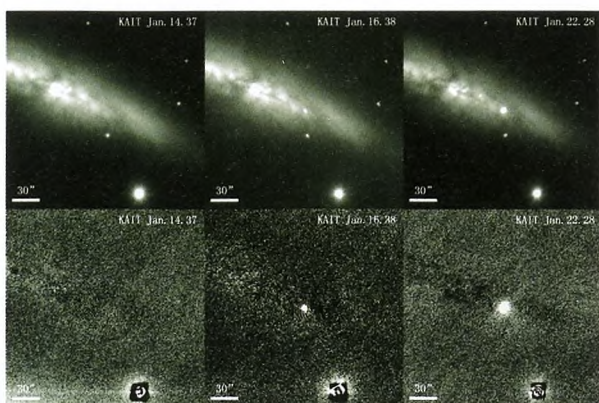


# Supernova i Messier 82

Af Michael Quaade, Niels Bohr Institutet

I januar 2014 eksploderede en supernova type Ia i galaksen Messier 82, der “kun” befinder sig 11-12 millioner lysår fra Mælkevejen. Det er en kærkommen lejlighed til at studere detaljerne ved denne type supernova-eksplosioner, der benyttes som standardlyskilde i kosmologien.

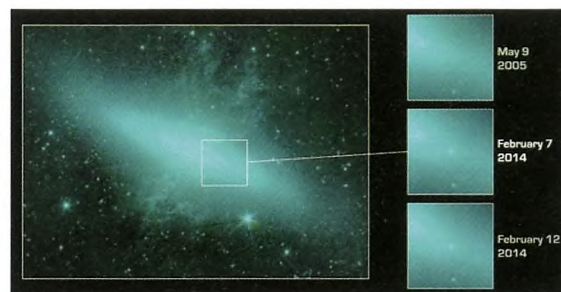
I januar 2014 eksploderede en supernova i galaksen Messier 82. Den blev opdaget af Steve Fossey fra London University Observatory sammen med fire af hans studerende: Ben Cooke, Guy Pollack, Matthew Wilde and Thomas Wright. De optog billeder af Messier 82 med en 35cm Celestron kikkert om aftenen den 21. januar som led i en observationsøvelse [1]. Supernovaen har fået betegnelsen SN2014J, den tiende supernova opdaget i 2014.



**Figur 1.** Optagelser med KAIT teleskopet tre dage i januar. På den nederste række billeder er en referenceoptagelse trukket fra, så supernovaen træder tydeligere frem. Det er tydeligt at der ikke er nogen supernova at se på det første billede, mens den bliver klarere og klarere på de to følgende billeder. Foto: KAIT, Lick Observatory.

På det tidspunkt var supernovaen tydelig på optagelserne. I de foregående dage var den også kommet med på optagelser foretaget med *Katzman Automatic Imaging Telescope* (KAIT) med en diameter på 76cm og af Koichi Itagaki på *Itagaki Astronomical Observatory* i Japan med en 50cm kikkert. De første optagelser, hvor supernovaen kunne ses var fra 16. januar og den var ikke at se på optagelser fra 14. januar. Nærmere analyse af disse optagelser tyder på, at det første lys fra supernovaen var fra 15. januar kl. 18 UT [2].

KAIT er med i *Lick Observatory Supernova Search*, en automatiseret søgning efter supernovaer, som bl.a. observerede M82 hver anden dag. Den undgik uheldigt nok at blive fanget af de algoritmer, der “gennemgår” optagelserne efter tegn på supernovaer. Det skyldes manglen på passende sammenligningsstjerner i den del af himlen og den ujævne og lysstærke baggrund fra galaksen selv [3].



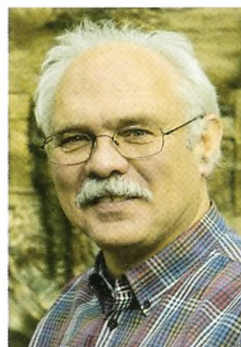
**Figur 2.** Infrarøde optagelser af M82 optaget med Spitzer rumteleskopet. De viser at supernoven var begyndt at aftage i lysstyrke midt i februar. Foto: NASA/JPL.

Supernovaen i Messier 82 var nem at få øje på i en kikkert, bl.a. fordi tre forgrundsstjerner i vore egen Mælkevej dannede en linie, der pegede på den. De var nogenlunde lige så lysstærke som supernovaen, da den var på sit højeste i starten af februar, omkring 10-11 størrelsesklasse. I Wieth-Knudsens Observatoriets 40cm kikkert kunne den skimtes helt hen i slutningen af marts.

Der er tale om en Supernova type Ia – en hvid dværg, der eksploderer efter at have trukket masse til sig fra en ledsagerstjerne. Med en afstand på kun 3-4 Mpc, eller 11-12 millioner lysår, er det den nærmeste supernova af denne type, der er observeret i mange år. Det har givet en kærkommen lejlighed til at studere detaljerne ved en supernova type Ia. Supernovaer af denne type spiller en vigtig rolle fordi de dels er så lysstærke at de kan ses på lang afstand og dels allesammen er nogenlunde lige lysstærke, så de kan bruges som standardlyskilder til afstandsbestemmelse.

## Litteratur

- [1] Supernova in Messier 82 discovered by UCL students, press release 22 Jan. 2014, <http://www.ucl.ac.uk/maps-faculty/maps-news-publication/maps1405/>
- [2] A. Goobar et al. (2014), The rise of SN2014J in the nearby galaxy M82, <http://arxiv.org/abs/1402.0849>
- [3] KAIT pre-discovery detection of SN 2014J in M82, [http://astro.berkeley.edu/bait/public\\_html/2014/sn2014J.html](http://astro.berkeley.edu/bait/public_html/2014/sn2014J.html)



*Michael Quaade* er kommunikationsmedarbejder ved Niels Bohr Institutet og arbejder primært med initiativer overfor gymnasie- og folkeskoleelever. Han har i en årrække været formand for Astronomisk Selskab.

# Jordskælvsrisiko i Danmark? – forslag til fremtidige studier

Af Søren Gregersen, *De geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)*

Spredt i de nordlige dele af Danmark sker der små jordskælv uden sammenhæng til den lokale geologi, og vi må skønne, at der kun vil ske små til moderate jordskælv inden for overskuelig fremtid. Ved jordskælvsstudierne har hver af de tre videnskabelige discipliner seismologi, geologi og geodæsi forskellige styrker og svagheder i tidshorisont, nøjagtighed og entydighed. Disse bør samarbejdes endnu mere end i dag. Det giver anledning til de 6 nedenstående umiddelbare forslag til forbedret bedømmelse af jordskælvsrisiko. Ud fra eksisterende oplysninger ser det ud til, at der ikke er bestemte geologiske zoner, hvor jordskælvene sker. Dette bør verificeres eller falsificeres.

Instrumentelle seismologiske data eksisterer intet sted på kloden fra seismografer før 1889. Om lidt ældre jordskælv eksisterer der i Danmark historiske, nedskrevne beretninger tilbage til år 1073 [1], altså kun knap tusind år. Så også her er der en kort tidshorisont. Palæoseismologiske undersøgelser, hvor man har indkredset en aktiv forkastning, og gravet den igennem og observeret rystelsesvirkninger i de omliggende sedimenter, kan rundt omkring i verden give overbevisende indikationer på jordskælv i ung geologisk tid, hundredtusinder af år tilbage. Nær Danmark findes der rapporter fra Norge [2] og fra Sverige [3]. Den slags oplysninger har ingen indtil nu skaffet penge til at grave efter i Danmark. Altså kan der være fornuft i et:

**Forslag nr. 1.** En palæoseismologisk undersøgelse af et af de kritiske steder i Danmark, som seismologerne kan udpege.

I jordskælvsegne som Californien og Japan samarbejdes seismologiske instrumentelle og historiske oplysninger med geodætiske og geologiske deformationsoplysninger i forsøg på at opnå større sikkerhed i risikoanalyse.

Den geodætiske tidshorisont ligner den seismologiske. Instrumentelle målinger går hundrede år tilbage. Der eksisterer historiske oplysninger tilbage i tiden om hyppigheden af oversvømmelser samt arkæologiske oplysninger om vandstanden nogle få tusinde år tilbage, se fx [4] og [5]. Både for palæo-seismologi og for den tilsvarende palæo-geodæsi er undersøgelserne i virkeligheden geologiske. Geologien har sin referenceramme fra i dag til millioner af år tilbage i tiden. Undersøgelser af gamle jordskælv giver gode muligheder for samarbejdsprojekter mellem seismologi og geologi.

Både seismologiske tid-og-sted-studier og geodætiske kortlægninger af bevægelser har en nøjagtighed og entydighed, som er afhængig af tætheden af instrument-netværk. I de senere år er steds-nøjagtigheden af jordskælvs-lokaliseringerne kommet ned på få kilometer/tiere af kilometer, så det er indenfor rækkevidde, at afdække sammenhængen mellem geologiske strukturforskelle og fysiske deformationsmålinger. Figur 1 viser, at jordskælvsoplysningerne for Danmark ikke med noget nær entydighed kan sættes sammen med kystlinier eller med de overordnede geologiske forskellighedszoner (Tornquist-zonen og Ringkøbing-Fyn-højderyggen). Prøver man at se på figurens jordskælvs-

mønster uden linier i kortet, ser man ikke andet end, at der er større jordskælvsaktivitet mod nord, inde i det Fennoskandiske Skjold, end mod sydvest, uden for skjoldet. I øst er der færrest instrumenter og derfor færrest lokaliserede jordskælv. I Danmark er der størst aktivitet syd for den norske aktivitet. Der er mindre aktivitet over mod Sverige, og slet ingen mod sydvest. Danmark ligger i overgangszonen fra lille aktivitet til nærmest ingen aktivitet. Også mod sydøst fra Danmark er fortsættelsen af Tornquist-zonen, i Polen og længere sydpå, uden nævneværdig jordskælvsaktivitet.

For bedre bedømmelse af jordskælvsrisiko i forskellige egne af landet er der behov for:

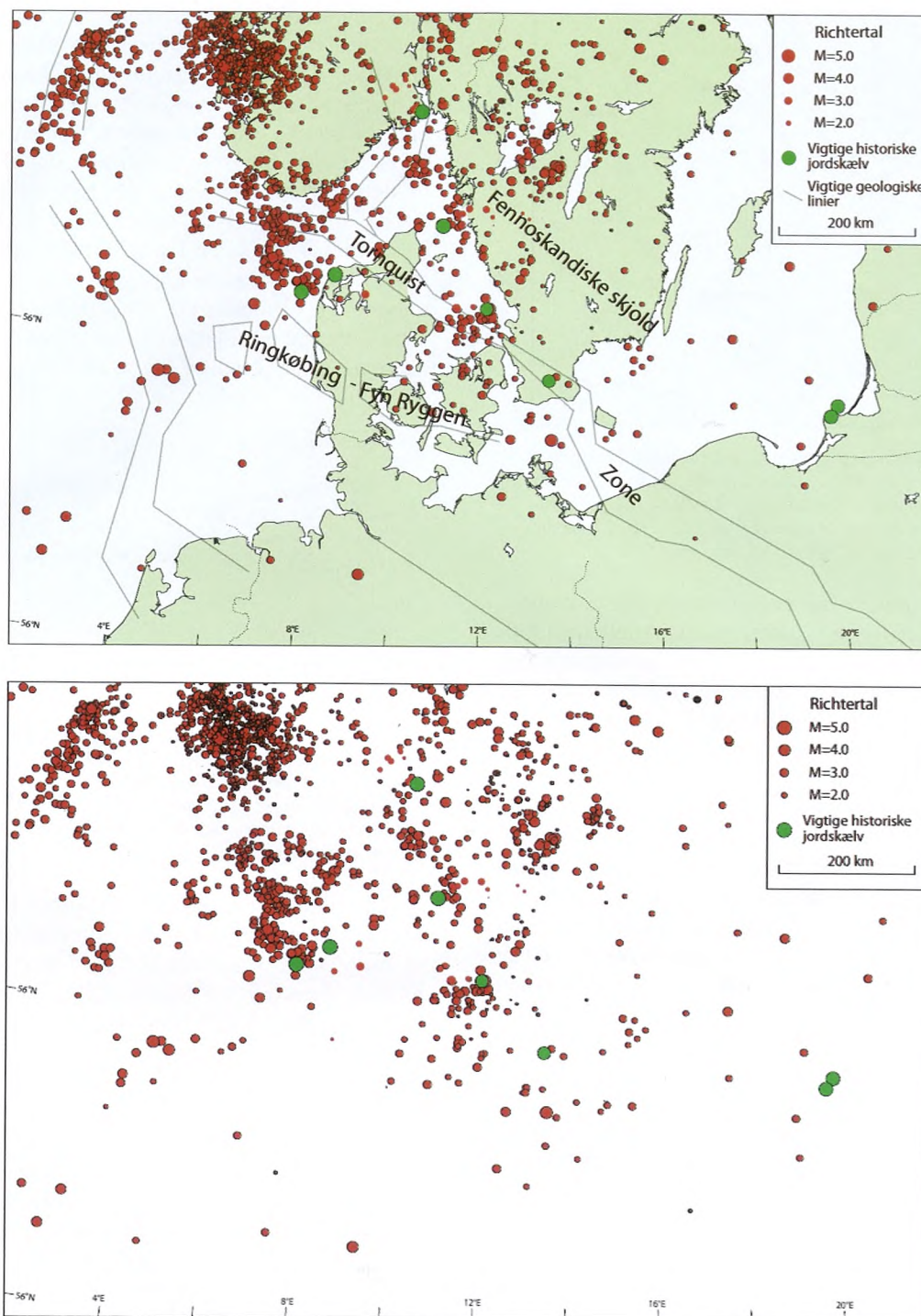
**Forslag nr. 2.** Endnu bedre geografisk dækning af seismografer, så den geografiske lokalisering forbedres.

Den nyeste geodætiske kortlægning af op-ned-bevægelser i Danmark har ikke bedre steds-opløsning end 50-100 km, så det kan ikke skelnes om Tornquist-zonen eller Ringkøbing-Fyn-højderyggen træder frem, som særlig bevægelig. Det skandinaviske samarbejdscenter i Onsala nord for Göteborg stiller i udsigt, at beregningerne snart kan fortættes. Hvis der kan findes ressourcer kan man drømme om:

**Forslag nr. 3.** Fortætning/større opløsning af de geodætiske beregninger af deformationerne af jordoverfladen både i højde og sted, ud fra eksisterende permanente GPS-stationer.

**Forslag nr. 4.** Et satellitprojekt med InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar, der kan identificere deformation af jordoverfladen mellem mange gange gentagne satellitmålinger i udvalgte områder som for eksempel de overordnede geologiske zoner.

Hidtil er sådanne InSAR-målinger på grund af store omkostninger kun foretaget i meget begrænsede, udvalgte områder. Den teknologiske udvikling skrider sådan frem, at ovenstående forslag kan gennemføres, hvis tilstrækkelige ressourcer sættes ind både til køb af instrumenter og køb af satellit-data og til forskningsmæssig databehandling.

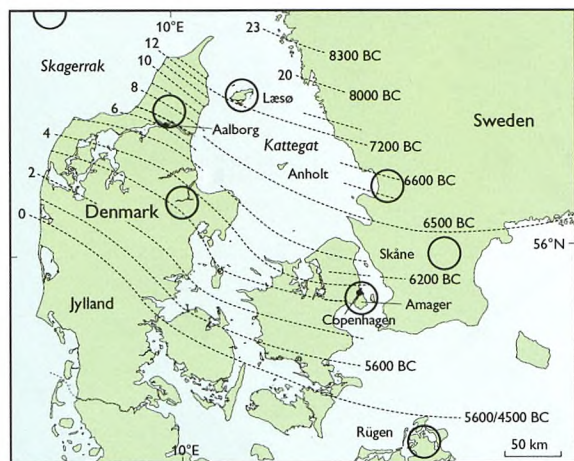


**Figur 1.** Jordskælvsaktiviteten i og omkring Danmark. Den instrumentelt registrerede aktivitet 1929-2008 er i begge kort vist med røde prikker. I det ene kort (nederst) er kystlinierne og de geologiske linier fjernet. Jordskælvets størrelse = Richtertallet er angivet ved størrelsen af prikkerne. Med grønne prikker er angivet de vigtigste følte jordskælv inden for de sidste 250 år.

Deformation kan i nogle tilfælde skelnes i ung geologi. En udfordring er at udskille unge geologiske bevægelser fra ældre bevægelser, der nu ses som strukturforskel i sedimenterne, i skorpen og i lithosfæren henover de overordnede geologiske zoner. Spørgsmålet er ikke, om der er sket store forskydninger, men om disse zoner deformeres nu? Den danske jordskælvsaktivitet, vist som de røde punkter i figur 1, er den sydlige begrænsning af norsk og svensk, svag aktivitet. De lidt større jordskælv i nærheden af Danmark med Richtertal oppe nær 5,5, ved Oslo 1904 og Kaliningrad 2004 [5]

skete inde i det Fennoskandiske Skjold (grønne punkter i figur 1). Sådanne jordskælv må man formode også kan ske i Danmark. Ganske som i andre intra-plade-regioner som Canada og Australien kan det uventede ske. Påstanden her er, at de overordnede geologiske zoner ikke er særlig udsatte.

I den videnskabelige litteratur findes der kun to konkrete geologiske udpegninger af fortidige jordskælv i Danmark. De er begge vist på figur 2 – ét i Københavnsområdet og et ved Læsø. De er begge tvivlsomme.

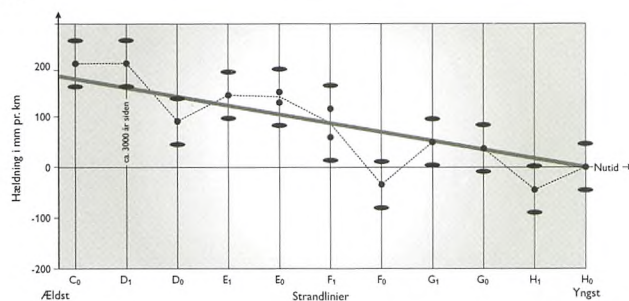


**Figur 2.** Generaliseret geologisk/arkæologisk hævningsmønster i det sydvestlige Skandinavien. Kurverne viser hævningsmønsteret i meter siden kurven var en kystlinie for Litorinahavet, dvs. efter Istiden. Aldre angivet BC, f.Kr. Cirklerne viser positioner, som er nævnt i teksten. Fra [5].

I 1930'erne omtalte geologiprofessor Rosenkrantz i flere omgange en mulig sammenhæng mellem 1930-jordskælvet i Øresund og Carlsbergforkastningen i Københavns-området [6]. Det er en geologisk skillelinie, der går gennem Carlsbergs grund i det sydlige København, sydpå gennem Amager og nordpå til Furesøen. Det kan ikke skelnes, om et jordskælv er sket på den ene eller den anden forkastning. Det skyldes simpelthen en stor usikkerhed i den seismologiske beregning af, hvor jordskælvet er sket. Det gælder især for gamle jordskælv. Det kan bemærkes, at der i undergrunden er mange flere tegn på skred i sedimenter end der er på jordskælv. De argumenter, Rosenkrantz brugte om, at der var konstateret geodætiske deformationer af Amager betvivles af nutidens geodæter. De hævder, at Amager-målingerne mest sandsynligt ikke viser deformation af undergrunden, men derimod skred af geodætiske målepunkter, der ellers er tilstræbt stabilt opbygget [5]. En observation, der peger i denne retning, er, at de geodætiske afstands-målinger har vist forskellige tal fra 1838 til 1911 uden jordskælv, men viser overensstemmelse fra 1911 til 1933, henover tiden for det Københavnske 1930-jordskælv [5]. Geodæternes argument er, at der er konstateret en hældning af det ene af de geodætiske fundamenter, så de målte forskelligheder tydes som skred af fundamenter snarere end tektoniske bevægelser. Heller ikke de Københavnske niveaumålinger viser systematiske tektoniske bevægelser. Det skal her tilføjes, at adskillige geologer har observeret revner i huse langs Carlsbergforkastningen [7]. Men ingen af dem har foretaget en kortlægning, som viser værre revner i forkastningszonen end i området omkring. Altså kan disse observationer ikke tages som evidens for bevægelse i Carlsbergforkastningen.

Det andet konkrete jordskælv, som har været nævnt i den geologiske litteratur, var på Læsø [8] og [9]. Der er blevet fremført overbevisende argumenter om, at der aldrig var et Læsø-jordskælv, i de nylige publikationer af Gregersen & Voss [5] og [10]. Indikationen for jordskælv var en stejl forkastning på 4 meter for

omkring 4.000 år siden. Men der er ikke fundet tegn på rystelser i omliggende sedimenter. Så denne forkastning adskiller sig ikke fra andre unge forkastninger, hvor man må tyde, at der er sket skred i sedimenterne snarere end jordskælv i undergrunden. Og som det ses i figur 2 passer den højeste strandlinie, der ikke er påvirket af dette skred, fint ind i det regionale mønster med en hævnings på 11-12 meter. Som konsekvens af, at Læsø hæver sig siden Istiden er der opbygget en serie strandlinie-volde på nogle kyststrækninger helt op til de nævnte 11-12 meter. De ses som trappetrin på en bred strand, der på grund af størst hævnings mod nord hælder mere og mere jo ældre, og altså jo højere liggende, de er.



**Figur 3.** Figur 5 fra [8] med standardafvigelse introduceret. Med den rette linie gennem standardafvigelses-intervallerne illustreres, at vipningerne kan forklares ved en nær regelmæssig ændring over tid. Det konkluderes, at springene i hældning er insignifikante, regelmæssighed er en lige så god forklaring på hældningernes ændring og det passer bedre i det regionale hævningsmønster.

De målte gennemsnitshældninger er illustreret i figur 3. En zig-zag-linie, der forbinder målepunkterne, er brugt som argument for geologisk kortvarige vipninger, eventuelt så øjeblikkelige, så de kan kaldes jordskælv [8] og [9]. Men de viste hældningsmålinger kan meget vel, som det vises i figur 3, tydes som en gradvis vipning, eventuelt med små ujævnheder, når usikkerheden på målingerne tages i betragtning. De præsenterede originale målinger er fra figur 5 i reference [8]. Disse originale gennemsnits-målinger har jeg suppleret med en skønnet standardafvigelse ud fra de præsenterede niveaumålinger, som må skønnes at have standardafvigelse omkring en kvart meter på grundlag af omkring ti målinger hver. Det kan konstateres, at der skønnes netop samme standardafvigelse i undersøgelser af strandlinier på Anholt [10].

Diskussionen om lille eller megen uregelmæssighed i hævnings- og vipnings-udviklingen er intens. Fænomenet bør belyses af:

**Forslag nr. 5.** En sammenlignende geologisk og geofysisk undersøgelse, inklusive aldersbestemmelse af sammenlignelige strandlinier på Læsø, Anholt, Frederikshavn og svenskekystens Laholm-bugt og Hallandsåsen.

Der er foretaget spændende undersøgelser på hvert af disse steder med både målinger af hævnings siden Istiden og tilhørende tidsbestemmelser [5], [8] og [11].

Men de er ikke bedømt i samme system, hvad angår de nødvendige oplysninger om nøjagtighed og entydighed af tid og højde. Jordskælvet på Læsø må siges at være ikke-eksisterende. Men der kan være god grund til at undersøge, hvor nøje den mindre dramatiske tektoniske hævnings siden Istiden hænger sammen henover Læsø og Anholt fra den danske til den svenske kyst.

En ny artikel om strandlinierne på Læsø [4] indeholder en fortolkning om forskydning i Danmarks undergrund længere sydpå. I de sidste 100 års hævningsmønster tydes en uregelmæssighed som en diskontinuitet ved sydsiden af Ringkøbing-Fyn-højderyggen (se figur 1). Med usikkerheden taget i betragtning, som i overvejselsen om standardafvigelse diskuteret i figur 3, må denne forskydning ses som et usandsynligt forslag, der er fremkommet ved ikke at tage den manglende jordskælvsforskydning i betragtning. Den valgte databehandling i [4] udpeger en statistisk insignifikant diskontinuitet, som ikke er i overensstemmelse med det seismologiske eller geodætiske regionale mønster [12].

I figur 2 er der, foruden de foregående nævnte jordskælvstyndinger, afmærket fem andre lokaliteter, som skal nævnes i diskussionen om jordskælv:

- Omkring Ålborg er der hævdet enten et knæk eller en bøjning af jordoverfladen. I tidsskriftet *Geologisk Nyt* blev det omkring nytår 2000/2001 diskuteret. Min egen involvering får mig til at konkludere, at der ikke er signifikant evidens for et knæk i unge bevægelser, snarere en jævn bøjning som forventet i kanten af den Skandinaviske hævnings siden Istiden.

- Skåne-positionen henviser til en svensk undersøgelse med gentaget GPS. Vores svenske geodætiske kolleger accepterer ikke, at nøjagtigheden er god nok til at understøtte en konklusion om speciel lokaliseret deformation.

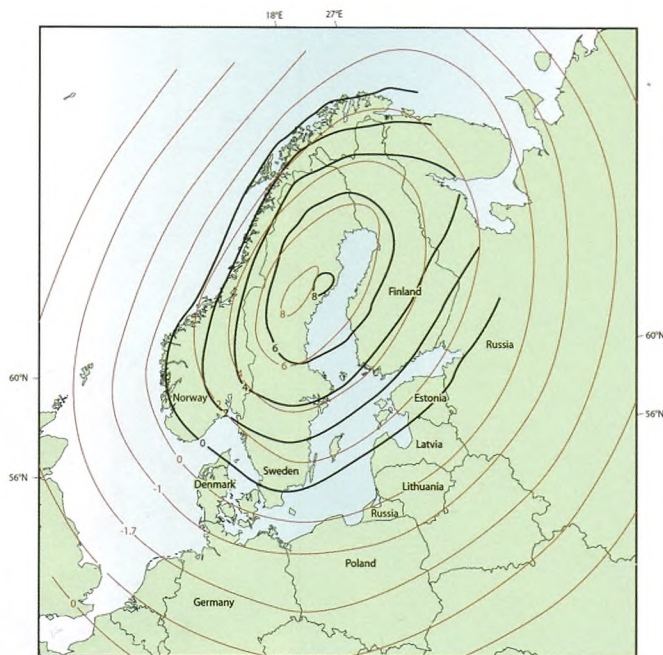
- Rügen-observationen ligner den geodætiske del af Ålborg-observationen. Der er lidt deformation af nivellements-linierne på Rügen, og det skal undersøges i fremtiden, om det er signifikant.

- I Midtjylland er observeret en ung forkastning. Det diskuteres, om den er forbundet til unge undergrundsbevægelser, men det er usikkert at skelne disse fra sedimentdeformationer. Det samme gælder ældre sedimentobservationer længere inde i Jylland.

- For svenskekysten nær Hallandsåsen (figur 2) er der udpeget adskillige geologiske indikationer på jordskælv: Forkastninger, strandlinier, der ikke passer sammen, sten- og jordskred, mange brud i stenblokke, liquefaction (forstyrrelser af vandfyldte sediment) og tsunamis sediment [11]. Hver enkelt af disse indikationer kan godt tydes som bevægelse uden jordskælv.

Derfor er der fornuft i:

**Forslag nr. 6.** Gennemgang i felten af disse svenske indikationer med geologiske og seismologiske kolleger, der har erfaring med palæo-seismologi, ganske som den foretaget for Norge, for nogle år siden [2]. Der bør bygges videre på geologiske ekskursioner, senest i 2008, og fra en seismologisk ekskursion med mig selv som arrangør i 2013 [10].

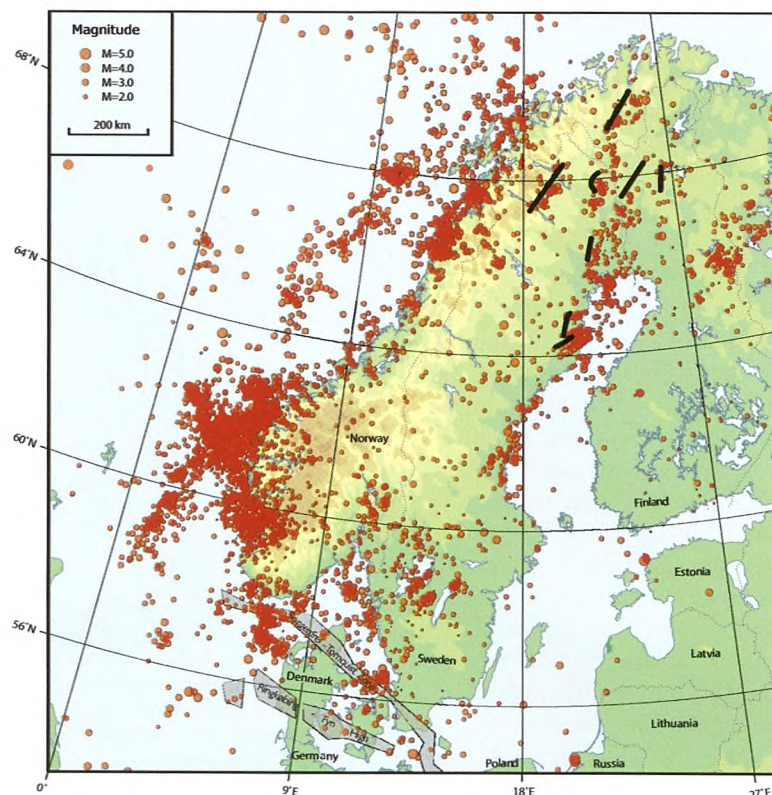


**Figur 4.** Hævning og omgivende sænkning i tidsskala 10-100 år fra geodæsi og i tidsskala 100-1000-10.000 år fra geologi. De geodætiske kurver (sorte) viser millimeter pr. år. De geologiske kurver (røde) viser hundreder af meter siden den sidste istid for cirka 9.000 år siden. Fra [13].

Ser man samlet på alle oplysningerne kommer man frem til et billede af en ung geologisk udvikling med meget nær regelmæssig hævnings siden Istiden (figur 2 og 3). I figur 4 ses, at geometrien i hævningsbilledet er den samme for geologiske og geodætiske målinger. Disse hævningskurver er udledt helt uafhængigt i de to videnskabelige discipliner. Fra generel geofysik forventes langsommere hævnings henover årtusinderne. I de generaliserede geologiske kurver indgår observationer om strandlinier og skøn over havstigninger, der gik frem og tilbage flere gange efter smeltningen af Istidens store isbjælke. Det geodætiske billede indeholder vandstandsmålinger i mange havne, geodætiske højdemålinger med sigteinstrumenter, samt moderne GPS-målinger.

Palæo-seismologiske undersøgelser i det nordlige Skandinavien viser, at der lige efter Istiden skete store jordskælv deroppe [3] og [13] forårsaget af aflastningen fra ismasserne (figur 5). Jordskælvsudløsningen nutildags skyldes derimod den absolutte pladebevægelse med tryk fra den Midatlantiske Ryg og kollision med pladerne syd for Europa i Alperne og Karpaterne [1] og [10].

De geodætiske og de geologiske oplysninger kan med tiden give ekstra oplysninger om jordskælvsaktiviteten i Danmark, ganske som det sker i Californien, Japan og andre aktive zoner. De giver i dette øjeblik ikke anledning til et andet syn på jordskælvsaktiviteten i Danmark end det, der kommer fra instrumentel seismologi og historiske beretninger. Seismologi og geodæsi er i gang med at supplere med bedre steds-opløsning. Jeg har en drøm om et sammenlignende geologisk og geofysisk dansk-svensk studium henover Kattegat.



**Figur 5.** Jordskælvsgeografien for Skandinavien 1970 til 2004. Jordskælvs-kataloget fra Helsinki Universitet er suppleret i Danmark med GEUS' katalog. Magnitude = Richtertal angivet. De meget tykke linier i det nordlige Skandinavien viser postglaciale forkastninger, som via mange indikationer, som fx forstyrrede omliggende sedimenter og sten- og jordskred, er tydet som jordskælv for cirka 9.000 år siden. Fra [13].

## Litteratur

- [1] Gregersen, S., Hjelme, J. & Hjortenberget, E. (1998), Earthquakes in Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* **44**, 115-127.
- [2] Olesen, O., et al. (2004), Neotectonic deformation in Norway and its implications: a review. *Norwegian Journal of Geology*, **84**, 3-34.
- [3] Lagerbäck, K. (1990), Late Quaternary faulting and paleoseismicity in northern Scandinavia, with particular reference to the Lansjärv area, northern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* **112**, 333-354.
- [4] Hansen, J.M., Aagaard, T. & Binderup, M. (2011), Absolute sea levels and isostatic changes of the eastern North Sea to central Baltic region during the last 900 years. *Boreas* 10.1111/j.1502-3885.2011.00229.x.
- [5] Gregersen, S. & Voss, P.H. (2012), Efforts to include geological and geodetic observations in the assessment of earthquake activity in Denmark. *GEUS bulletin* **26**. Review of survey activities 2011 (eds. Bennike, O., Garde, A.A. and Watt, W.S.), 41-44. GEUS København.
- [6] Nielsen, L. & Thybo, H. (2004), Location of the Carlsberg Fault zone from seismic controlled-source fan recordings, *Geophysical Research Letters*, **31**, L07621, doi: 10.1029/2004GL019603.
- [7] Ovesen, N.K., Blem, H., Gregersen, S., Møller, H.M.F. & Frederiksen, J.K. (2002), Recente terrænbævelser i København. *Dansk Geoteknisk Forenings Bulletin*, **19**, 183-192.
- [8] Hansen, J.M. (1980), Læsøs postglaciale udvikling i relation til den Fennoskandiske Randzone. *Dansk Geologisk Forening, Årsskrift for 1979*, 23-30.
- [9] Hansen, J.M. (1986), Et forhistorisk jordskælv. *Museumsforeningen for Læsø. Årbog for 1985*, 17-23.
- [10] Gregersen, S. & Voss, P.H. (2014), Review of some significant claimed irregularities in Scandinavian postglacial uplift on timescales of tens to thousands of years – earthquakes in Denmark? *Solid Earth* **5**, 109-119.
- [11] Möner, N.-A. (2003), Paleoseismicity of Sweden. A novel paradigm. JOFO Grafiska AB, Stockholm.
- [12] Knudsen, P., Engsager, K. & Khan, S.A. (2012), Dokumentation for beregning af ny uplift-model 2011. Intern rapport DTU Space. København.
- [13] Gregersen, S. & Voss, P. (2010), Irregularities in Scandinavian postglacial uplift/subsidence in time scales tens, hundreds, thousands of years. *Journal of Geodynamics* **50**, 27-31.



Søren Gregersen er adjungeret statsseismolog i De geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland og adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet.

# 2015 bliver lysets år

Af Jørgen Schou, formand for Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskabs årsmøde, den 22.-23. januar 2015, åbner *Lysets år*. UNESCO vedtog i december 2013 en resolution, hvormed 2015 blev gjort til det Internationale Lysets År. Mens fysikkens år 2005 og astronomiens år 2009 begge havde stærkt fokus på det videnskabelige, har UNESCO ønsket, at lysets år også skulle have et stærkt samfundspræget islæt.

En af de ivrigste aktører for at få det *Internationale Lysets År* vedtaget har været det Europæiske Fysiske Selskabs formand John Dudley [1] og arbejdet begyndte faktisk allerede i 2010, hvor laserens 50-år jubilæum blev fejret. 2015 er ikke et jubilæumsår på samme måde, men det falder dog nogenlunde sammen med vigtige årstal for optik og udforskningen af lysets egenskaber, se tabellen.

| År   | Begivenhed                                                             |
|------|------------------------------------------------------------------------|
| 1015 | Ibn al-Haytham udgiver bøger om optik                                  |
| 1815 | Fresnel og lysets bølgenatur                                           |
| 1865 | Maxwell og elektromagnetiske bølger                                    |
| 1915 | Einsteins almene relativitetsteori: lys i rum og tid                   |
| 1965 | Kosmiske mikrobølge baggrund<br>Charles Kao og optisk fiber teknologi. |

I resolutionens tekst nævnes også lys-baserede teknologier, hvilket giver fysik og alt, hvad der har med elektromagnetiske bølger at gøre, en vigtig rolle i året. En lang række organisationer, fx APS (American Physical Society) og OSA (Optical Society of America) er derfor også gået med i resolutionen.



For UNESCO har det været vigtigt at indregne den store samfundsmæssige rolle lys og brug af lys spiller. Adgang til internet er en selvfølge i Europa (75 % har adgang), mens kun 16 % har adgang i Afrika. Dertil kommer at studier og enhver uddannelse efter mørkets frembrud i mange ulande er umulig – noget der især går ud over kvinders muligheder for at få en uddannelse. Året skal også være med til at øge kvinders uddannelse og engagement i naturvidenskab. Endvidere

ønsker UNESCO at gøre verdens befolkning opmærksom på den stigende lysforurening og spild af energi med overforbrug af lys. Endelig skal resolutionen også medvirke til at styrke en bæredygtig udvikling.

## Dansk Fysisk Selskabs aktiviteter i Det Internationale Lysets År

Dansk Fysisk Selskab forskyder sit årsmøde fra november 2014 til starten af 2015, for dermed ligesom Det Europæiske Fysiske Selskab at fejre årets start med et stort møde. Det vil i samarbejde med DTU Fotonik finde sted på DTU i Lyngby den 22.-23. januar fra kl. 13, hvor vi forhåbentligt kan få ekstraordinært gode foredragsholdere. Det nordiske møde for de fysiske selskaber vil stadig finde sted i Trondheim den 9.-12. juni 2015 (følg med på [www.dfs.nbi.dk](http://www.dfs.nbi.dk)). Generalforsamlingen 2014 vil finde sted i løbet af efteråret i forbindelse med et debatmøde.

Dansk Fysisk Selskab har desuden oprettet en national komité for Det Internationale Lysets år med repræsentanter for både universitetsinstitutter og andre organisationer, der arbejder med lys såvel videnskabeligt, teknisk og undervisningsbetonet. Den får en hjemmeside [2] med arrangementer og direkte link fra DFS' hjemmeside. Komiteen koordineres af undertegnede Jørgen Schou. Det Internationale Lysets År er en enestående chance for at promovere dansk og international fysik, optik og fotonik. Denne chance får vi kun én gang og den skal vi udnytte!

## Litteratur

- [1] European Physical Society, International Year of Light 2015, [http://www.eps.org/?page=event\\_iyol](http://www.eps.org/?page=event_iyol)
- [2] National komité for Det Internationale Lysets år (under udvikling), [www.dfs-lysets-år.fotonik.dtu.dk](http://www.dfs-lysets-år.fotonik.dtu.dk)



Jørgen Schou er gruppeleder ved DTU Fotonik. Arbejder med hvordan man kan bruge laserlys til at fremstille nye materialer. Formand for DFS 2005-2010 og 2012-2014.

SNU og UNF fejrer jubilæum den 19. august 2014 på DTU

# UNF KØBENHAVN SNU



## JUBILÆUM

**Program:**

- Science slam
- Uddeling af Kirstine Meyers legat
- SNUs historie de sidste 25 år
- UNF i Danmark og København
- Fortællinger fra KVANT
- Jubilæumsreception

Læs mere og tilmeld dig som slammer på:  
[kbh.unf.dk/scienceslam](http://kbh.unf.dk/scienceslam)

TID: Kl. 12-17:30  
STED: DTU Bygning 303A  
Læs mere og tilmeld dig på:  
[kbh.unf.dk/jubilæum](http://kbh.unf.dk/jubilæum)

## SNU

Selskabet for Naturlærers Udbredelse – i daglig tale kaldet SNU – blev stiftet af H.C. Ørsted i 1824.

SNU formidler det nyeste fra naturvidenskab og teknik via åbne foredrag.

Vi belønner god formidling og forskning med H.C. Ørsted Medaljer og Kirstine Meyers legat.

SNU udgiver bladet KVANT sammen med Dansk Fysisk Selskab og Astronomisk Selskab.

## UNF

Ungdommens Naturvidenskabelige Forening har til formål at udbrede kendskabet til og interessen for naturvidenskab blandt unge.

Det gør vi gennem over 50 foredrag, studieture og workshops om året, målrettet gymnasieelever. Vi har også andre projekter, bl.a. undervisning af folkeskoleelever og ScienceSlam for universitetsstuderende.

UNF blev stiftet i 1944, hvor ungdomsmedlemmer af SNU dannede deres egen forening.

# 190 + 70 = 260 ÅRS JUBILÆUM SNU + UNF

## 19. AUGUST 2014 PÅ DTU

Ungdommens Naturvidenskabelige Forening

København

Selskabet for Naturlærers Udbredelse

[kbh.unf.dk](http://kbh.unf.dk)