
Tidsskrift for Fysik og Astronomi 27. årgang

**ALMEN
RELATIVITETSTEORI
FYLDER 100 ÅR**

- DFS ÅRSMØDE 2016
- LYSETS ÅRS FORMIDLINGSPRIS
- GRAVITATIONELLE LINSER I GALAKSEHOBE
- TYNGDEBØLGER OBSERVERET FOR FØRSTE GANG
- INNOVATION SOM UNDERVISNINGSMETODE I STX-FYSIK
- AT BRINGE EN BEMANDET RUMKAPSEL TIL SIKKER LANDING
- EMMY NOETHER OG FYSIKKENS BEVARELSSESLOVE
- NORDSTJERNEN – EN SPÆNDENDE STJERNE
- AKTUELLE BØGER
- KVANT-NYHEDER
- FORENINGSNYT

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook  : 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
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Emilie Gehl Skulberg
Julie Søgaard,
Astronomisk Selskab
Torben Westerberg (korrektur)

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 (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2300 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 (tlf. 22 67 26 42).

Tryk

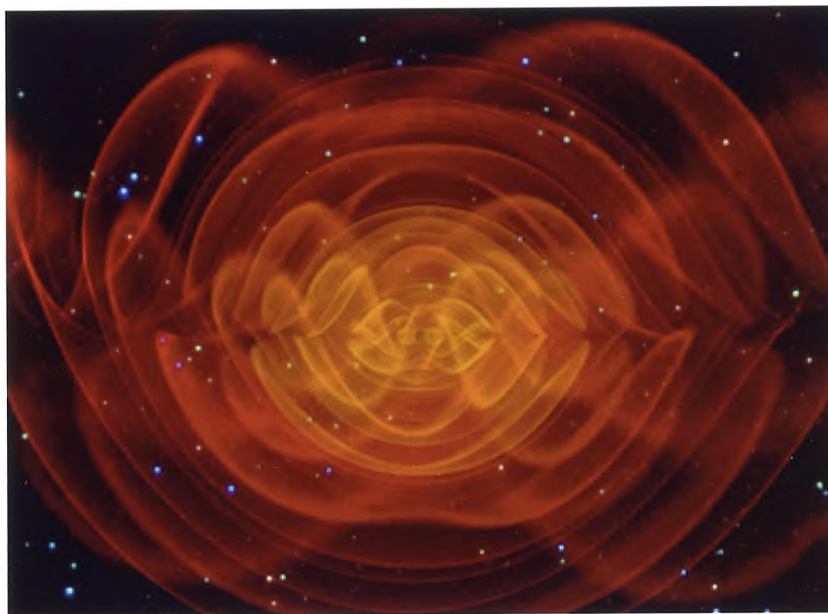
Vestergaards Bogtrykkeri ApS.
Oplag: 2200.

Produktionsplan

Nr. 2-16 udkommer ca. 15. maj
Nr. 3-16 udkommer ca. 15. september
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Innovation som undervisningsmetode i STX-fysik <i>Niels Erik Wegge</i>	3
Tyngdebølger observeret for første gang <i>Jens Olaf Pepke Pedersen og Michael Cramer Andersen</i>	8
Aktuelle bøger <i>John Rosendal Nielsen, Michael Cramer Andersen, Anja Skaar Jacobsen og Finn Berg Rasmussen</i>	12
Gravitationelle linser i galaksehobe <i>Michael Hansen</i>	15
Foreningsnyt – foredrag i foråret 2016	19
Nordstjernen – en spændende stjerne <i>Michael Quaade</i>	20
KVANT-nyheder <i>Sven Munk</i>	22
At bringe en bemanded rumkapsel til sikker landing <i>Mads Stenfatt</i>	24
Emmy Noether og fysikkens bevarelseslove <i>Else Høyrup</i>	30
DFS Årsmøde 2016 og Lysets års formidlingspris <i>Dansk Fysisk Selskab</i>	Bagsiden



Billedet på forsiden viser en kunstners opfattelse af tyngdebølger. Læs om den første direkte måling af disse i artiklen “Tyngdebølger observeret for første gang”. Med denne artikel og artiklen om “Gravitationelle linser i galaksehobe” fortsætter vi markeringen af 100-året for Einsteins almene relativitetsteori. Illustration: NASA.

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), DTU Nanotech, DTU Fotonik og DTU Fysik.

Innovation som undervisningsmetode i STX-fysik

Af Niels Erik Wegge, Birkerød Gymnasium, HF, IB & Kostskole

Denne artikel handler om innovation som undervisningsmetode i STX-faget Fysik. Den handler altså ikke om valgfaget "Innovation". Artiklen præsenterer et undervisningsforløb på 6 timer, hvor en fysikklasse først lærer nogle grundlæggende idegenereringsmetoder og dernæst benytter disse til at finde innovative løsninger på en problemstilling inden for varmelære. Eleverne (og læreren) vurderede bagefter, at der havde været et substantielt fysikfagligt udbytte af forløbet – ikke på trods af innovationselementet, men netop på grund af det. I januar spurgte jeg klassen, om der var nogen som kunne hjælpe til med at præsentere sjove, klassiske fysikforsøg ved gymnasiets orienteringsaften. Ja, svarede adskillige, hvis vi også må fortælle om vores innovationsforløb!

De præsenterede innovationsideer og -metoder er i al væsentlighed baseret på "Den Kreative Platform", som er udviklet af Aalborg Universitet [1].

Innovation i STX

Lad os starte med (som mange i STX-verdenen gør det) kort og fyndigt at definere "INNOVATION" ved triaden "NYT – NYTTIGT – NYTTIGGJORT".

Altså: innovation er, når man finder på en mere eller mindre *ny* måde at løse en given problemstilling på; en måde som har værdi for andre (er *nyttigt*), og som realistisk kan lade sig gøre (kan *nyttiggøres*). Det er nok en forenkling af innovationsbegrebet, men er til gengæld til at have med at gøre i STX-sammenhæng, hvor den kan bruges i fag-faglighedens ærinde. Det kræver ofte at "NYTTIGGJORT" blødes lidt op: Selvom den innovative løsning i princippet skal færdigudvikles for at være af værdi, kan man sjældent forvente at eleverne i praksis kan (eller har tid til at) virkeliggøre deres ideer. Men det gør heller ikke noget, at elevernes løsningsforslag kun er anvisninger. Erfaringen (bl.a. fra Danske Sciencegymnasiers kurser om "Innovation i Naturvidenskab" [2]) synes at vise, at eleverne under alle omstændigheder lærer en masse og udvider/styrker deres faglighed i løbet af processen.

Det kunne være rimeligt at overveje, hvorfor man overhovedet skal gøre sig den ulejlighed at indføre innovation som del af undervisningen i de enkelte STX-fag. I STX-bekendtgørelsens overordnede §1 stk. 4 står der "Uddannelsen skal tillige udvikle elevernes kreative og innovative evner og deres kritiske sans", men det er de færreste fag, der nævner innovation i læreplanen. Kan man nå både at lære eleverne den nødvendige faglighed og arbejde innovativt? Lad mig som svar nøjes med at fortælle, at jeg selv har oplevet at innovation som undervisningsmetode i fysikfaget virker godt! Eleverne er gode til innovation; der kommer spændende ideer frem, som læreren aldrig selv havde kunnet finde på; eleverne får større ejerskab til deres faglighed; og så er det simpelthen sjovt. Det behøver ovenikøbet ikke tage specielt lang tid at gennemføre et innovationsforløb med solid faglighed, og de opsatte faglige læringsmål sikres nemt gennem en afsluttende skriftlig opgave. I fysik er der mange emner, der egner sig til en innovativ tilgang (se boks 1).

Boks 1. Innovationsforløb i fysik

Ideer fra deltagere i DASG-kurserne om "Innovation i Naturvidenskab".

- **Lys.** Find på en totalløsning til forbedring af belysningen i et konkret klasseværelse. (El-lære, energiomsætning, lyspærers virkemåde, atomteori, lysintensitet, lysspektre, farveblanding.)
- **Lyd.** Opfind et "nyt" musikinstrument. (Bølgelære, stående svingninger, resonans, overtoner.)
- **Bevægelse.** Find ud af hvilke kørende forlystelser der kunne blive plads til ude på parkeringspladsen, hvis den blev omdannet til et mini-tivoli. Der skal være *rides* med f.eks. 4g-påvirkninger. (Fart, acceleration, kræfter, cirkelbevægelse, mekanisk energi.)
- **Energilagring.** Kom med forslag til hvordan man ville kunne lagre tilstrækkeligt meget energi fra solfangerne på et konkret hus fra sommer til vinter. (Varmelære, solarkonstant, effektivitet, husholdningens energiforbrug, varmeledning.)
- **Varmetab.** Find ud af hvordan man kan øge elkedlers effektivitet. (Energiomsætninger, el-lære, varmeledning, varmestråling, sorte legemer.)
- **Undervisning.** Det er et problem, at mange piger i Danmark mister interessen for naturvidenskab, når de er mellem 10 og 13 år. Gad vide hvorfor det er sådan og hvordan man genindfanger dem? Vælg et fysikemne og find på en ny måde at præsentere det for disse piger på.
- **Rumkolonier.** Det overvejes at bygge en koloni nær Månens sydpol. Foreslå hvordan en sådan koloni skal indrettes. (Tyngdekraft, solindstråling, kosmisk stråling, atmosfæretryk, energiforsyning.)
- **Energibesparelse** (gennemgås nedenfor). Kom med forslag til hvordan du sparer x % på omkostningerne til dit brusebad. (Varmelære, energiomsætninger, kilowatttime, strømningshastighed, målemetoder.)

Hvordan lærer man eleverne at arbejde innovativt?

Ligesom man ikke kan forvente, at en gruppe elever kan lave godt gruppearbejde om et fagligt emne uden i forvejen at have lært, hvordan man laver godt gruppearbejde, så kan man heller ikke bede elever arbejde innovativt uden de i forvejen har lært og trænet metoder til innovation. Blandt de mange kompetencer, der indgår i et fuldt udfoldet innovationsforløb, er det min vurdering, at man i en innovations-startpakke skal fokusere på den allervigtigste: kunsten hurtigt at generere et væld af ideer. Denne såkaldte "åbnefase" er altafgørende, og den kræver at både elever og lærere lærer en række teknikker. De to andre faser i "åbne/lukke-modellen" (se figur 1) fortjener også opmærksomhed og opbygning af teknikker, men jeg foreslår altså, at man for at komme i gang med innovation i undervisningen sætter hovedfokus på åbnefasen.



Figur 1. Den gængse åbne/lukke-model for innovationsprocesser. I åbnefasen genereres et væld af ideer uden skelen til deres værdi eller anvendelighed eller realiserbarhed. I overblikfasen analyserer og kategoriserer man ideerne, så man i lukkefasen kan udvælge og videreudvikle en enkelt blandt de mange ideer.

Da det er ambitiøst at lære fundamentalt nye arbejdsmetoder samtidig med at man lærer ny faglighed, er det mit innovationspædagogiske credo, at innovation som metode i STX-undervisningen skal gennemføres i tre trin: LÆRE-ØVE-BRUGE.

Trin 1: Innovationsmetoder læres fra bunden i en lettilgængelig, ikke-faglig sammenhæng:

- Hvordan man genererer massevis af ideer ("åbne", mest tid bruges her).
 - være kreativ på kommando
 - være åben over for potentialet i alle ufærdige ideer
 - arbejde videre med egne og andres ideer
- Hvordan man analyserer og vælger blandt de mange ideer ("overblik").
- Hvordan man færdigudvikler en idé ("lukke").

Trin 2: Innovation øves på en relativt simpel enkelt-faglig problemstilling (f.eks. i fysik):

- Læreren etablerer den minimalt nødvendige faglige for forståelse for problemstillingen.
- Eleverne finder på mange innovative løsningsforslag ved at bruge metoderne fra Trin 1, skaber overblik over dem og udvælger én, som videreudvikles.
- Undervejs i dette trin holdes der hele tiden metafokus på metoderne fra Trin 1 ("hvad er det, vi har gang i lige nu?").

- Efterbehandling: en skriftlig opgave sikrer, at forløbets faglige læringsmål bliver opfyldt for alle trods deres forskellige veje gennem forløbet.

Trin 3: Innovation bruges i flerfaglig sammenhæng:

- Enten god, gammeldags tværfaglighed eller et forløb i STX-faget Almen Studieforbereelse.
- Eleverne bruger (med lethed!) de trænedes innovationsteknikker fra Trin 2 og kan nu fokusere helt på faglighederne.

På Birkerød Gymnasium har vi indført en STX-progressionsmodel, hvor trin 1 og 2 udliciteres til et egnet fag i starten af 2g (f.eks. fysik), hvorefter trin 2 gentages så ofte som muligt i nogle af klassens andre fag. Ved slutningen af 2g har eleverne en god værktøjskasse med adskillige innovationsredskaber, som uden videre kan bringes i anvendelse i en flerfaglig problemstilling. Trin 3 lægges derfor i et forløb med Almen Studieforbereelse i starten af 3g.

Nedenfor beskriver jeg et undervisningsforløb, hvor 26 elever i en 2g STX klasse gennemførte trin 1 og trin 2 med få dages mellemrum. Trin 3 har mine elever endnu til gode.

En fysikklasse på Birkerød Gymnasium lærer at arbejde innovativt

Trin 1: Innovationsmetoder læres.

Vi brugte et dobbelt-modul til dette trin, i alt 3 timer. Der var ikke noget "frikvarter" undervejs: Aktiviteterne foregik både indendørs og udendørs og var så afvekslende i sig selv at ingen følte behov for en pause. Forløbet var inspireret af Jesper Bruun-Schmidt (Mulernes Legatskole), og er grundlæggende baseret på metoder og ideer fra Den Kreative Platform [1].

Den ikke-fysikfaglige problemstilling var: "Det er et problem at eleverne på Birkerød Gymnasium får rørt sig så lidt i løbet af en skoledag".

Der er tre grundfærdigheder, der er vigtige, når man vil generere mange ideer/løsningsforslag: at give sig selv lov til at lave fejl; aldrig at sige nej; at kunne digte videre på andres ideer.

Første grundfærdighed: at fejre sine fejl

I mange fag møder vores elever lukkede problemstillinger, som har ét bestemt svar, og eleverne bedømmes på deres evne til at nå frem til dette korrekte facit. Når elever er fokuseret på at finde "den rigtige løsning", går de nødtigt ad nye veje. Nye veje kunne ellers muligvis føre til nye og måske bedre løsninger, men eleverne vil ikke risikere at svare "forkert". Derfor startede vi med at øve os i at acceptere, ja ligefrem fejre fejlslagne forsøg: eleverne blev sat til at lege sten-saks-papir to og to og med armene i vejret begejstret råbe "YES, vi har lavet en fejl!", hver gang de ikke slog det samme som makkeren. I starten var eleverne lidt generte, men det blev en fest efterhånden.



Figur 2. YES, vi har lavet en fejl!

Anden grundfærdighed: aldrig at sige nej

Det var ikke nemt! Det ligger åbenbart dybt i de fleste, at man er kritisk over for det, man får foreslået. “Nej, det synes jeg er en dårlig ide”. “Nej, det kan jo slet ikke lade sig gøre”. “Nej, det er nok for besværligt”. Eller man siger måske “Ja, det kunne vi godt, men...”.

Både “Nej, ...” og “Ja, men...” er forbudt i den indledende innovationsfase, hvor det gælder om at få masser af ideer på banen og holde dem i live. Man må derfor kun sige “Ja, og...”. Som øvelse lavede vi ferieplanlægning to og to. Den ene makker siger “Vi kunne tage til [indsæt sted/by/land]!”, og den anden skal så sige “Ja, og så kunne vi [indsæt aktivitet]”. Til dette siger den første “Ja, og så [indsæt hvad der så kunne ske]”. Osv.

Tredje grundfærdighed: at videreudvikle ideer – også andres ideer

Dette blev allerede øvet i forrige aktivitet: man skulle jo gribe makkerens forslag og arbejde videre med det. Nu fortsatte vi med at lave historiefortælling i nye makkerpar. Vi forestillede os, at vi bevægede os fra billede til billede i en tegneserie. Den ene elev starter med at beskrive, hvad der sker i historiens første billede. Det skal gøres malende, så man virkelig kan forestille sig scenen. De to elever går nu et par skridt hen i det næste billede, som det så er makkerens tur til at beskrive. Og så videre.

Denne øvelse lavede vi udenfor, hvor der var god plads til at alle klassens makkerpar kunne gå fra “billede” til “billede”. Det virkede befordrende for fantasien, at man ikke sad på en stol og digtede historien, men rent fysisk bevægede sig fra den ene forestillede scene til den næste.

Så gik vi i gang med det egentlige problem: at eleverne rørte sig så lidt i skolen. Eleverne blev i nye makkerpar sendt ud på en kort “walk-and-talk” med det formål at finde på så mange løsningsideer som muligt. Ideerne skulle ikke arbejdes igennem, men der skulle være mange! Grundfærdighed 2 og 3 kom i sving. Alle ideer blev skrevet ned på små sedler og lagt frem for hele klassen. Blandt disse ca. 80 ideer måtte hver elev (i tavshed) tage en seddel med en ide, som umiddelbart virkede tiltalende.



Figur 3. Eleverne vælger blandt de mange ideer.



Figur 4. Ideerne videreudvikles i gruppen.

Eleverne blev delt i grupper på 4-5 og gik i gang med at videreudvikle de 26 valgte ideer. Her var det vigtigt at have god plads, så vi brugte A3-papir at tegne og skrive på. Jeg gik rundt og mindede grupperne om grundfærdighederne: I må ikke sige nej, I skal holde ideerne i live, der er ikke noget forkert endnu, og “fejl” kan ende med at være produktive.

Boks 2. Nogle af de 26 ideer grupperne arbejdede videre med:

1. bytte plads i løbet af timen
2. undervise ude i naturen
3. mere idræt
4. en forhindringsbane ude på gangen som man er nødt til at kravle/hoppe igennem
5. indføre fravær for inaktivitet
6. kun optage elever der bor i cykelafstand og så kræve at alle cykler i skole
7. udskifte stolene med motionscykler
8. lægge metalvægte ind i undertøj
9. tilbyde gratis kakao et sted langt væk på skolens område

Nu var der gået knap to timer af de tre, der var til rådighed, og de 26 videreudviklede ideer blev båret ind i åbne/lukke-modellens næste fase: overbliksfasen. Eleverne tog hver deres A3-ide med ind i nye grupper

(6-7 elever), hvor man fandt frem til en placering i et todimensionalt værdikompas (se figur 5). Man kan finde på mange parametre at måle ideerne med, men jeg havde valgt de to akser:

*nyttigt for få ↔ nyttigt for mange
nemt at implementere ↔ svært at implementere*



Figur 5. Ideerne analyseres i forhold til et værdikompas.

Efter at have skabt et hurtigt overblik begyndte lukke-fasen. Hver storgruppe udvalgte to ideer til videreudvikling, og så blev der endelig åbnet for skabet med alle de Bonos hatte; også nej-hatten og den realistisk/kritiske hat kom i brug! Der findes meget materiale på nettet om de Bonos tænkehatter [3], og der kan bruges meget tid på at øve brugen af dem. Mine elever fik kun en ultrakort introduktion, og vi gik ikke særligt dogmatisk til værks med disse hatte. Jeg gik bare rundt og hjalp grupperne til at blive bevidste om hvilken hat, de havde på.

Gruppens to færdige ideer blev beskrevet og tegnet fint op på A3-papir, men kun den bedste af de to blev udvalgt til fremlæggelse for resten af klassen. Til sidst valgte klassen ved afstemning to favoritter:

- Idé 1: Opstilling af motionscykler i skolens fællesområder. Brug af cyklerne udløser værdikuponer, som kan indløses til kakao eller andre varer i skolens kantine. (Videreudvikling af idé 7 fra boks 2.)
- Idé 2: Trapperne erstattes af rulletrapper, der kører den forkerte vej. Der indføres ensretning, som gør at man bliver nødt til at løbe op ad den nedadrullende trappe, når man skal ovenpå, og vice versa. (Videreudvikling af idé 4 fra boks 2.)

Trin 2: Innovation øves på et fysikfagligt problem: Hvordan sparer vi på prisen for et brusebad?

Dette trin blev gennemført få dage efter det forrige og varede ligeledes to moduler (3 timer). I min undervisningsplan indgik forløbet som repetition af varmelæren.

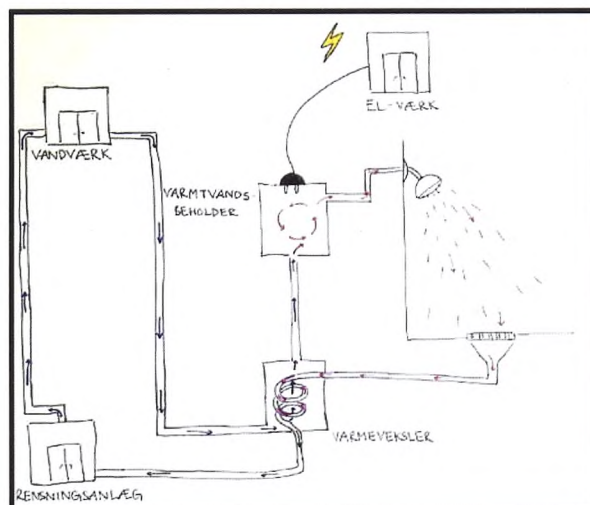
Er det et problem, at det er så dyrt at tage brusebad? Det viste sig, at ikke alle eleverne var bevidste om, at det koster penge at tage bad, så vi startede med i fællesskab at gennemregne et tænkt brusebad. Med 5 liter vand pr. minut i 12 minutter bliver det til 60 liter, som koster ca. 50 kr/m³. Hvis vandet skal opvarmes elektrisk fra vandværkets 10 °C til behagelige 40 °C,

koster det energien $Q = mc\Delta T$, som ved 100 % effektivitet bliver 2,1 kWh. Med en kWh-pris på ca. 2 kroner koster brusebadet altså i alt ca. 7,20 kr.

Eleverne var nu blevet opmærksomme på de forskellige parametre, der påvirker badets pris, og så gik innovationsprocessen i gang med samme skridt som i trin 1. Vi brugte igen længst tid på åbne-fasen (walk-and-talk i par, individuel ide-udvælgelse, gruppeudvikling af ideerne) for at bevare en åbenhed for nye ideer og løsninger gennem længere tid. Herefter valgte grupperne to favoritideer, som blev færdigudviklet og præsenteret for hele klassen. Med til den kvalitative præsentation hørte en kvantitativ beregning af besparelsen på både vand- og elregningen i forhold til de 7,20 kr, vi havde regnet ud i starten.

Efter de tre timer stod klassen med to vindere:

- Idé 1: Man kunne indrette brusekabinen ligesom en bilvask, hvor man på ca. et minut blev spulet og børstet ren.
- Idé 2: Man kunne genvinde varme fra afløbsvandet og bruge denne energi til gennem en varmeveksler at forvarme vandet til bruseren.



Figur 6. Brusebadet kan gøres billigere ved at genvinde varme fra afløbsvandet.

Disse ideer er da herlige! Er de også innovative? Ja, det synes jeg. Hvert løsningsforslag er i hvert fald NYT og NYTTIGT. Og begge kunne vel også nyttiggøres gennem en længere udviklingsproces, hvis det skulle være. Blandt klassens andre ideer var der mere "fantasiløse" som f.eks. at sætte en flow-reduktion på bruseren eller bare skære ned på badetiden. Det er måske ikke så innovativt, men gav stadig anledning til gode udregninger og overvejelser af, hvilke fysikparametre der får prisen til at stige mest.

Afslutning på det fysikfaglige innovationsforløb – og på artiklen

Har alle eleverne nu lært innovation som metode? Ja, men de kan sagtens blive dygtigere. Dette forløb skal følges op af andre enkeltfaglige innovationsforløb (trin 2 gentaget), og værktøjskassen skal udvides. Jeg kunne f.eks. godt tænke mig at der kom nogle konkrete brainstorm-redskaber ned i kassen.

Kunne vi have brugt tiden bedre, hvis vi havde lavet traditionel undervisning i stedet for dette fysikinnovationsforløb? Nej, i betragtning af hvor sjovt eleverne havde det, hvor meget fysik de havde gang i, og hvor mange aha-oplevelser de fik, så var det bestemt de to moduler værd.

Har alle eleverne fået lært "hvad de skulle"? Måske ikke, så derfor stillede jeg afslutningsvis en individuel skriftlig opgave med titlen "Gå billigere i bad" (se boks 3).

Boks 3. Gå billigere i bad

Afsluttende skriftlig opgave på 3-5 sider.

1. **Gør rede** for dit vand- og energiforbrug til bad. Hvor meget vand og hvor meget energi bruger du? Kræver egne målinger af vandmængde og temperatur (dokumenteres med fotos).
2. Gør rede for og **analysér** din innovationsgruppes idé til at spare på vand- og energiforbruget i forbindelse med dit bad. Hvor mange procent kan du spare? (Antag: Vandet opvarmes elektrisk med strøm fra elværket, og der er ikke varmetab fra varmtvandsbeholderen.)
3. **Vurdér** hvordan du vil kunne skære dine omkostninger til bad ned med 40 %. Du behøver ikke bruge din gruppes idé.

Med denne opgave trænes elevernes eksperimentelle kompetence gennem hjemme-forsøget, samtidig med at de bevidstgøres om fysikken i deres dagligdag.

Bemærk at opgaven naturligt falder i tre dele svarende til de tre taksonomiske niveauer, vi tit tænker gymnasieopgaver i: redegørelse, analyse, vurdering. Bemærk også at der i opgaven både skal regnes "ligefrem" (hvor meget sparer du?) og "baglæns" (hvad skal parametrene sættes til, for at en bestemt besparelse opnås?).

Eleverne skrev nogle flotte besvarelser, og det gav anledning til livlig diskussion i klassen, da jeg fortalte at badetiderne (før innovativ besparelse) varierede fra 2,5 minutter helt til 25 minutter; at vandflowet gik helt fra 2 til 12 liter pr minut, og de årlige badeomkostninger fra 300 kr til 3400 kr!

Til slut blev eleverne opfordret til at indgå en kontrakt med deres forældre: "jeg lover at spare 40 % på mine brusebade det næste år – hvis I udbetaler mig halvdelen af besparelsen".



Figur 7. Eleverne har stillet sig i rækkefølge efter hvem der bruger mest vand på et brusebad.



Figur 8. Hurtig, uformel evaluering af innovationsforløbet: "Hvor meget har I fået ud af dette forløb på en skala fra lav til høj?"

Litteratur

- [1] Den Kreative Platform;
www.uva.aau.dk/Den+Kreative+Platform/
- [2] Danske Science Gymnasier (DASG);
www.science-gym.dk
- [3] For en overkommelig introduktion til de Bonos tænkehatte, se f.eks.
www.janfjordbak.dk/sixhat.htm



Niels Erik Wegge underviser i matematik og fysik på Birkerød Gymnasium, HF, IB & Kostskole. Han er kursusleder på DASG-kurserne "Innovation i Naturvidenskab".

Inge Lehmanns Legat af 1983

Administreret af Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab.

Legatet skal fortrinsvis anvendes til længerevarende forskningsophold eller videregående forskningsuddannelse i udlandet for forskere på ph.d.-niveau, dog ikke til finansiering af det obligatoriske miljøskifte.

Legatet tildeles (1) forskere inden for **geofysik** – primært til studier af jordens indre og dens overfladelag – eller (2) forskere inden for empirisk psykologi.

Ansøgning skal dreje sig om et forskningsprojekt, der specifikt kan udføres ved udlandsopholdet.

Der skal benyttes et ansøgningsskema, som udfyldes via www.royalacademy.dk, hvor yderligere information også kan findes (eller kontakt sekretær Mette Danielsen: mda@royalacademy.dk). Ansøgningsfrist: fredag den **1. april 2016**.

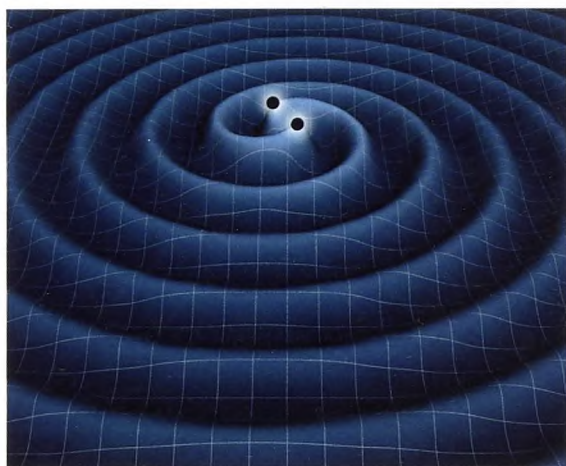
Tyngdebølger observeret for første gang

Af Jens Olaf Pepke Pedersen og Michael Cramer Andersen, KVANT

Begejstringen var stor blandt fysikere verden over, da det blev annonceret den 11. februar 2016 [1, 2], at tyngdebølger for første gang var observeret direkte. Forskere ved det amerikanske LIGO-eksperiment (LIGO = Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) havde observeret tyngdebølger fra sammenmeltningen af to sorte huller i en fjern galakse. Nyhedsmedierne kogte over og eksperter vurderede det som en historisk opdagelse, der fortjener en nobelpris. Selvom der ikke var megen tvivl om, at tyngdebølgerne eksisterede, blev det sammenlignet med et nyt vindue til Universet, som blev åbnet. Vi vil her gennemgå lidt af historien bag tyngdebølgerne, som er forudsagt af Einsteins almene relativitetsteori, og beskrive hvordan målingen af det svage signal kunne lade sig gøre.

Forudsagt af Einstein

Tyngdebølger udsendes af et varierende tyngdefelt, lidt på samme måde som elektromagnetisk stråling udsendes fra accelererede elektriske ladninger. Tyngdebølger er meget svage bølger i selve rumtiden, og det er kun kompakte masser, der krummer rumtiden meget, og som ændrer sig fx i et binært system, der vil resultere i detekterbare bølger i rumtiden, se figur 1.



Figur 1. To kompakte stjernerester, der kredser om hinanden, udsender en spiralformet tyngdebølge i rumtiden. Rumtiden er meget stiv, så tyngdebølgerne er uhyre svage (NASA).

Tyngdebølger i rumtiden blev første gang diskuteret af Einstein i 1916 og 1918. I 1936 udarbejdede Einstein en artikel, sammen med Nathan Rosen, som blev indsendt til *Physical Review*. I artiklen med titlen "Do Gravitational Waves Exist?" viste forfatterne, at der ikke kunne eksistere nogle regulære periodiske tyngdebølger uden singulariteter (uendeligheder), og svaret på spørgsmålet i titlen var således negativt. En kritisk anonym referee påpegede dog flere fejl i artiklen og Einstein trak artiklen tilbage – fordi han ikke brød sig om anonymt peer review [3].

Einstein indsendte derefter artiklen til *Journal of the Franklin Institute*, der ikke brugte anonyme referees. Men da artiklen udkom, var den alligevel omskrevet og konklusionen var nu positiv! Einstein var blevet klogere, fordi han ad omveje var blevet gjort opmærksom på fejl i argumentationen af den selvsamme anonyme referee [3]. De uønskede singulariteter var kun tilsyneladende og kunne fjernes ved passende valg af koordinater, så tyngdebølger burde være mulige.

Til trods for, at mange derefter mente, at tyngdebølger eksisterede, så var det ikke teknisk muligt at detektere dem. Einstein mente faktisk at de var så svage, at de aldrig ville blive målt.

I 1957 argumenterede Richard Feynman imidlertid for, at en passerende tyngdebølge ville kunne få en perle til at flytte sig på en stang og derved afsætte energi [4], og i 1962 blev princippet om interferometre beskrevet. I 1968 rapporterede Joseph Weber, at han havde detekteret tyngdebølger, hvilket dog skulle vise sig at være fejlagtigt, men året forinden havde Rainer Weiss fået ideen til LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory).

Tyngdebølger målt indirekte med pulsarer

I 1974 blev den første pulsar i et binært system opdaget – "PSR B1913+16" – af astronomerne Russell Hulse og Joseph Taylor. Systemet består af to neutronstjerner, hvor den ene kan observeres som en pulsar, der udsender radiostråling. Afstanden fra Jorden er ca. 21.000 lysår og omløbstiden er 7,75 timer. Ved at observere omløbstiden meget præcist opdagede Hulse, at omløbstiden ændrede sig med omkring 7 millisekunder pr. århundrede. Dvs. systemet tabte langsomt energi, som netop kunne forklares med, at der blev udsendt tyngdebølger (se figur 1). Læs fx mere i [5].

Dette var den første *indirekte* bekræftelse af tyngdebølgers eksistens. Opdagelsen resulterede i en nobelpris til Hulse og Taylor i 1993 [6]. Med Einsteins almene relativitetsteori kan man ret præcist beregne, at systemet vil udstråle den gravitationelle energi i banerne på 301 mio. år, mens neutronstjernerne spirallerer ind mod hinanden og til sidst kolliderer. Selv om tyngdebølgerne ikke er observeret direkte, følger de ca. 15 dobbelte neutronstjernesystemer, der er observeret, samme mønster og de er meget stærke indicier på tyngdebølgernes eksistens. Herunder den eneste kendte *dobbelt-pulsar* ("PSR J0737-3039"), opdaget i 2003, som har en forventet levetid på 85 mio. år.

LIGO og andre detektorer

I 1992 grundlagde Kip Thorne, Ronald Drever og Rainer Weiss "LIGO-observatoriet" og ti år senere indledtes første fase (2002-2010), der ledte efter tyngdebølger fra kompakte objekter i Mælkevejen eller andre galakser. Der blev imidlertid ikke observeret nogen signaler, der hævdede sig over baggrundsstøjen fra fx jordrystelser eller instrumentfejl.



Figur 2. Luftfoto af LIGO-dektoren ved Hanford i Washington (LIGO).

Efter flere års ombygning og opgradering åbnede “Advanced LIGO” i september 2015. Den består af to avancerede detektorer – den ene i Livingston, Louisiana, og den anden i Hanford, Washington (se figur 2), hver med to “arme” på 4 km. De har en indbyrdes afstand på 3002 km. Det var med disse instrumenter, at tyngdebølgerne blev målt den 14. september 2015, deraf navnet “GW150914”. LIGO har siden 2007 samarbejdet med den tilsvarende men lidt mindre detektor “Virgo”, med to 3 km-arme, nær Pisa. Derudover findes der flere mindre detektorer i bl.a. Tyskland og Japan.

Måling af tyngdebølgerne “GW150914” og den astrofysiske fortolkning

LIGO har som nævnt ledt efter tyngdebølger siden 2002 og undervejs gennemgået et antal opgraderinger og forbedringer. Da tyngdebølgerne ankom den 14. september 2015 var det faktisk inden observationskampagnen officielt var gået i gang, men heldigvis var instrumenterne i fuld funktion. Signalet varede en femtedel af et sekund, se figur 3 nederst, og tyngdebølgerne passerende i øvrigt først igennem Jorden.

Det var nok til, at det kunne lade sig gøre at regne ud, at bølgen med stor sandsynlighed stammede fra to sorte huller, der stødte sammen i en afstand af ca. 1,3 mia. lysår (410 ± 170 Mpc, hvor 1 pc (parsec) = 3,26 lysår).

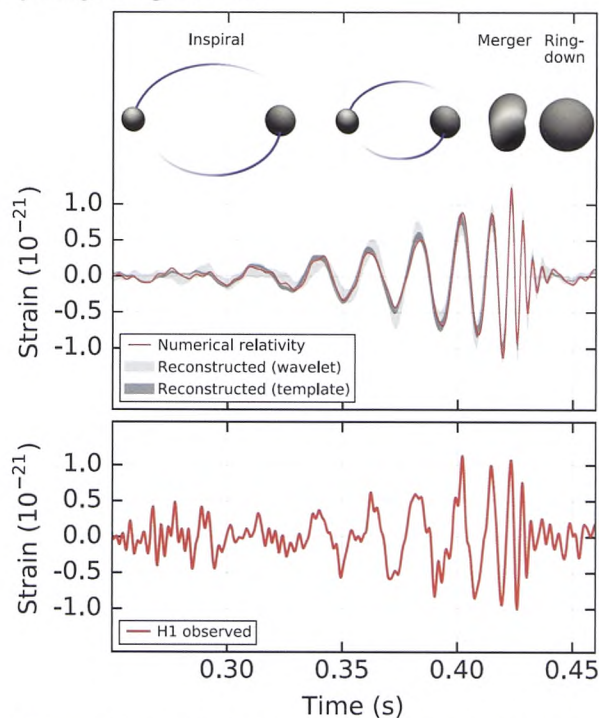
Ifølge Einsteins almene relativitetsteori vil et system af to sorte huller tabe energi ved at udsende tyngdebølger, og når de kolliderer, udsendes en del af massen også som tyngdebølger. Det observerede signal kan opdeles i tre faser (se tegningerne øverst på figur 3):

1. Indspirallering
2. Sammensmeltning (“merging”)
3. Dæmpning (“ring down”)

Den første fase (indspirallering) ses først tydeligt i de allersidste 5-7 omløb før sammensmeltningen. Dette skyldes, at tyngdebølgerne skal have en vis styrke (amplitude) og høj nok frekvens, før de kan træde frem over baggrundsstøjen.

Signalet i Livingston-dektoren ligner Hanford-signalet meget. Tyngdebølgerne blev registreret i begge detektorer med en tidsforskel på 7 ms, altså indenfor de maksimale 10 ms, som er afstanden mellem detektorerne (3002 km) divideret med lyshastigheden. Dette

udelukker, at det kan skyldes en lokal seismisk forstyrrelse, hvilket der heller ikke blev registreret. Ud fra tidsforskellen kunne man, ved hjælp af triangulering, nogenlunde angive retningen, som bølgen kom fra, til et sted omkring “Den Store Magellanske Sky” – dog betydeligt længere væk!



Figur 3. Øverst: Model (simulering) af tyngdebølgerne fra sammensmeltningen af to sorte huller, sammen med tegninger af de tre faser. Nederst: Signalet fra Hanford-detektoren efter en række filtreringer, der undertrykker baggrundsstøj udenfor detektorens optimale frekvensområde på 35-350 Hz. “Strain” (h) er givet ved ligning (1). (Figur modificeret fra [7] figur 1 og 3).

Mulige signaler fanges løbende ved, at der sammenlignes med 250.000 forudberegnete modeller (“templates”), der er resultatet af (omfattende) beregninger, bl.a. indenfor “Numerisk Relativitetsteori”. Disse modeller forudsiger, hvordan signalet fra tyngdebølger fra forskellige kilder vil se ud i detektorerne. I modellerne anvendes mange astrofysiske parametre¹.

Signalet fra GW150914 er vist i figur 3 (nederst) efter en række filtreringer med bl.a. mange instrumentafhængige parametre. Dette er sammenlignet med ca. 20.000 mere detaljerede astrofysiske modeller, hvor den model der passer bedst er vist i figur 3 (øverst).

Modellen viser [7, 8], at de to sorte huller før sammensmeltningen havde masser på omkring 36 og 29 solmasser samt, at afstanden mellem dem var få hundrede km, da tyngdebølgerne var detekterbare. De to sorte hullers udstrækning beskrives ved deres Schwarzschild-radius, som var omkring 90-100 km.

Beregningerne viser også, at der efter sammensmeltningen blev dannet ét stort sort hul med en masse på 62 solmasser, og da den samlede masse af de to oprindelige sorte huller var 65 solmasser, betyder det, at en energimængde på ca. 3 solmasser er blevet udløst i tyngdebølgerne: $E = 3M_{\odot} \cdot c^2 \approx 5 \cdot 10^{47}$ J.

¹Parametrene beskriver bl.a. de to masser og deres spin (impulsmoment), afstanden imellem dem, excentriciteten af banen af det binære system, vinklen af baneplanet set fra Jorden, systemets afstand fra Jorden samt kildens position på himlen (to koordinater), der skal sammenholdes med detektorarmenes placering og orientering på observationstidspunktet. Læs mere om parametrene i [8].

Størstedelen af denne energi blev udsendt i det tidsrum på $\Delta t = 0,2$ s, hvor tyngdebølgen var synlig med LIGO og en mindre del blev udsendt under indspiralleringen. En grov udregning af effekten giver $P = 10^{48}$ W, eller ca. 10^{22} gange Solens effekt ($3,6 \cdot 10^{26}$ W). Dette svarer til udstrålingen fra samtlige stjerner i samtlige galakser i det synlige univers! Men det meste af energien udsendes i form af tyngdebølger. Det er dermed den kraftigste begivenhed, mennesket endnu har observeret i Universet, bortset fra resterne fra Big Bang. Da effekten fordeles over en kugleoverflade med radius $R = 1,3$ mia. lysår $= 1,3 \cdot 10^{25}$ m, indeholdt tyngdebølgerne, da de nåede Jorden, kun en beskedne energi pr. m^2 .

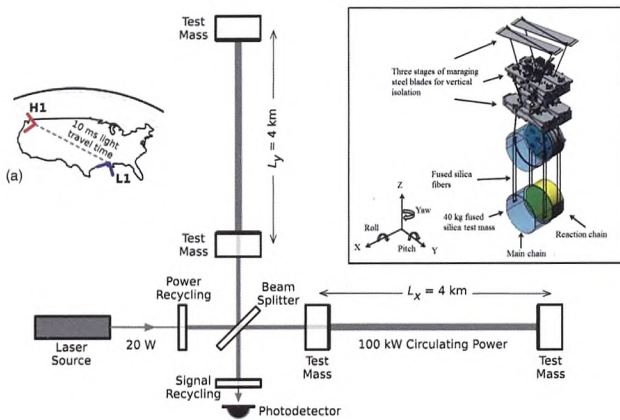
Hvordan virker interferometeret?

Styrken af en tyngdebølge er karakteriseret ved dens amplitude h , som er givet ved

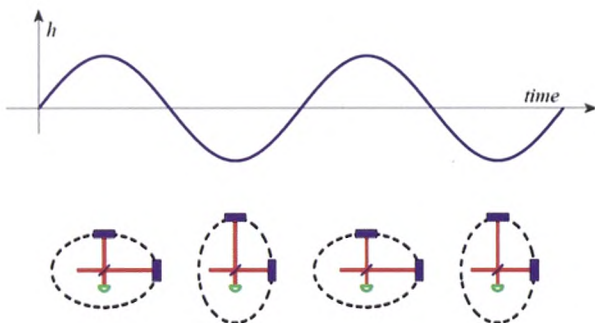
$$h = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

hvor ΔL er ændringen i afstanden L mellem to masser (her $L = 4$ km). Selv meget voldsomme begivenheder i Universet giver imidlertid kun anledning til små værdier af h og for at se fx to neutronstjerner, der støder sammen, skal man kunne måle værdier af h på 10^{-22} i tidsrum på omkring 1 ms.

LIGO er opbygget som et L-formet Michelson laserinterferometer [7], hvor en laserstråle splittes i to og sendes mod to spejle, se figur 4.



Figur 4. Opbygningen af LIGO-interferometeret. Den indsatte tegning t.v. viser placeringen af Hanford (H1) og Livingston (L1). Tegningen t.h. viser et spejl med ophæng, som dæmper rystelser. (LIGO).



Figur 5. Figuren viser, hvordan de to arme i interferometeret strækkes og komprimeres ved tyngdebølgers passage.

De reflekterede stråler samles igen, og hvis spejlenes afstand ændrer sig, vil det vise sig ved en ændring i faseforskellen mellem lyset i de to dele af laserstrålen. I det specielle tilfælde, hvor tyngdebølgerne er planpolariseret i samme plan som interferometeret, vil den, når den passerer forbi, på skift strække den ene arm og komprimere den anden arm i interferometeret, som vist på figur 5.

I LIGO er de to arme 4 km lange, og man skal derfor kunne måle en afstand mellem to spejle med en nøjagtighed på $\Delta L = 4 \cdot 10^{-19}$ m, jævnfør ligning (1) med $L = 4$ km og $h = 10^{-22}$. Størrelsen på en proton er ca. 10^{-15} m, så der skal måles en forskel i afstand på under 1/1000 af diameteren af en proton! Det stiller naturligvis ekstreme tekniske krav til den eksperimentelle opstilling, som det først har været muligt at realisere indenfor de senere år og efter mange års udviklingsarbejde. Det er kun muligt, fordi laserlyset måler gennemsnitsafstanden mellem et meget stort antal atomer på overfladen af testmasserne (spejlene).

Da detektionen bygger på faseforskellen mellem de to laserstråler, der returnerer fra hver arm, er et oplagt spørgsmål derfor, hvordan man i det hele taget kan måle tyngdebølgerne eftersom laserlyset jo på samme tid også strækkes og komprimeres? Svaret er, at selvom laserlyset bliver enten rød- eller blåforskuet, skal det stadig bevæge sig med lyshastigheden, og derfor vil den rødforskudte del af lyset være længere tid om at bevæge sig gennem sin arm end den blåforskuet [9].

De første fotoner, der kommer ud af interferometeret, lige efter at tyngdebølgerne har påvirket spejlene, vil ikke være faseforskudte, men efterhånden som de efterfølgende fotoner ankommer til detektoren, vil faseforskellen vokse, indtil laseren har leveret "nye" fotoner til interferometeret. Den tid, som laserlyset "lagres" i interferometeret vil være ca. $\tau_s = 2L/c = 27 \mu\text{s}$.

Man kan i princippet øge følsomheden ved at forlænge interferometeret og gøre L i ligning (1) større, men den må heller ikke blive så stor, at tyngdebølgerne når at skifte fortegn, mens de første fotoner stadig bevæger sig ned gennem armene. Hvis tyngdebølgerne har en karakteristisk tid på 10 ms (figur 3), vil en optimal længde være ca. 1.000 km, og det kan man opnå ved at "fold" lyset i resonatoren (se nedenfor).

LIGO benytter en "Nd:YAG"-laser med en bølglængde på $\lambda = 1064$ nm (i det infrarøde). Den faseforskelle man skal måle, svarer derfor til brøkdelen $\Delta L/\lambda = 4 \cdot 10^{-13}$ af en enkelt bølge. Hvis man justerer spejlene, således at der er destruktiv interferens ved detektoren, vil den ikke registrere noget lys og en ændring af afstanden mellem spejlene vil vise sig ved, at der kommer en smule lys. Signalet vil så være næsten lineært med faseforskellen $\Delta\phi$. I praksis har man dog et lille "offset" i justeringen, så detektoren hele tiden måler en smule lys. Passagen af tyngdebølgerne åbnede op for mange fotoner. Det er altså ikke en egentlig længdemåling, med en nøjagtighed på 10^{-19} m, man har foretaget, men virkningen i et interferometer, når to bundter af kohærente bølger, der er indstillet til næsten at udslukke hinanden ved destruktiv interferens, kommer en smule mere ud af modfase, så der åbnes op

for flere fotoner.

For at øge faseforskellen $\Delta\phi$ har man indsat en "Fabry-Perot resonator" i interferometerets arme, der har den samme virkning, som hvis man kunne folde laserlyset i interferometeret. Resonatoren består af et sæt delvist reflekterende spejle, som øger den vejlængde laserlyset tilbagelægger ca. 280 gange og dermed følsomheden med omtrent samme faktor, således at det svarer til en vejlængde på 1120 km. Dermed skal man nu "kun" måle en faseforskel svarende til $280 \cdot 4 \cdot 10^{-13} = 10^{-10}$. Derudover holdes laserens effekt og bølgelængde ekstremt stabile så lyset løber inde i de 2×4 km lange vakuumrør og spejlene er poleret til en præcision indenfor få atomers nøjagtighed.

Opgaven med at måle en lille bevægelse af spejlene er nu omdannet til at måle ændringen i antallet af fotoner på en detektor meget præcist, og her sætter fotonernes statistiske fordeling en grænse for nøjagtigheden. På et tidspunkt bliver fluktuationer i fotonernes strålingstryk på spejlene, som er proportional med antallet af fotoner, imidlertid begrænsende i stedet for. LIGO cirkulerer ca. 100 kW laserlys i de to arme og ved beamsplitteren, der sender lyset ud i de to arme, er effekten ca. 700 W (eller over 10^{21} fotoner pr. sekund).

En forudsætning for at kunne måle den lille faseforskel er, at spejlene holdes i nærmest perfekt stilstand, for ellers vil små seismiske bevægelser og selv bølgeslag mod fjerne kyster kunne bevæge spejlene.

Dæmpningen sker i førte omgang aktivt, hvor detektorer registrerer bevægelser i undergrunden omkring spejlene og sørger for at bevæge holderne til spejlene (med ét sæt elektromagneter) i modsat retning, så de holdes mest muligt i ro^2 . De 40 kg tunge spejle er desuden ophængt i lange tynde fibertråde med en diameter på under en halv millimeter, der især dæmper spejlens termiske uro, se figur 4. Tilsammen dæmper den aktive og passive del alle svingninger over 10 Hz med 10 størrelsesordener, således at spejlene kan holdes i ro indenfor 10^{-19} m.

Med et andet system af magneter kan man *simulere* tyngdebølgesignaler. En række små magneter kan skubbe på spejlene og simulere, hvordan et signal fra en tyngdebølge ser ud i interferometeret og dermed kan man teste opløsningen af hele systemet.

Kontrol af baggrundsstøj

For at overvåge forstyrrelser fra omgivelserne er hvert observatorium udstyret med et arsenal af sensorer og accelerometre (som måler seismiske forstyrrelser), mikrofoner, magnetometre, radiomodtagere, vejrstationer og detektorer til kosmisk stråling. Ved passagen af tyngdebølgerne blev der ikke registreret betydelige forstyrrelser i de to detektorer samtidigt.

LIGO kan sammenlignes med en stor antenne, der er følsom overfor tyngdebølger i et stort frekvensinterval. Man kan vise, at ved lave frekvenser (under ca. 50 Hz) er det de seismiske bevægelser, der sætter grænsen for følsomheden og ved højere frekvenser (over 150 Hz) er det kvantefluktuationer, den såkaldte "shot noise", der skyldes fotonernes statistiske fordeling, som er den

dominerende støjkilde. I mellemområdet dominerer en række andre kilder, blandt andet termisk støj i de tråde, som spejlene er ophængt i (se figur 4, indsat tegning). En udmærket gennemgang af de mange detaljer i detektoren og jagten på tyngdebølgerne findes i [10].

GW150914 blev målt indenfor et frekvensinterval på ca. 30-350 Hz, og forholdet mellem signal og støj var omkring 24 (under sammensmeltningen af de sorte huller).

Et nyt vindue til Universet er åbnet med et "splosh"

LIGO giver anledning til begejstring på flere områder. Dels er der den tekniske udvikling, der har gjort detektoren mulig og dels har vi fået bekræftet Einsteins relativitetsteori for tyngdefelter. Endelig er der den store nyskabelse med instrumentet, at vi ikke længere alene kan studere Universet med elektromagnetisk stråling, kosmisk stråling, neutrinoer og meteoritter. Nu er der åbnet for at måle på – selv meget fjerne – kompakte stjerne rester, gennem de tyngdebølger de udsender.

Tilsvarende signaler fra tusindvis af andre kompakte binære stjernesystemer vil "synges" med andre frekvenser. Det er denne "tyngdebølge-musik", der nu reelt åbnes op, for og astronomer, der fx jagter supernovaer og gammaglimt, vil være parate til at følge op med deres instrumenter. Fermi-teleskopet observerede faktisk gammastråling med en fotonenergi på over 50 keV, omkring 0,4 s efter tyngdebølgerne ankom, i et område der overlapper positionen af GW150914, se [11]. Denne observation er dog omdiskuteret og nogle forskere mener, at signalet er støj [12].

Man kan selvfølgelig ikke høre en tyngdebølge, der forplanter sig i rumtiden uden andet medium. Svingningen i tyngdebølgerne er ikke desto mindre – som en illustration – blevet omsat til en lyd, så vi også kan bruge høresansen til at fortolke signalet.



Figur 6. Michael Linden-Vørnle forklarer, hvordan tyngdebølgerne blev udsendt, da to sorte huller kolliderede og sagde "splosh". (DR).

Nyheden om tyngdebølgerne tiltrak mange mediers interesse, og kendte formidlere hjalp til at nyheden kom bredt ud i befolkningen (se figur 6). I det amerikanske talkshow "The Late Show with Stephen Colbert" demonstrerede Brian Greene målingen med en opstilling af et laserinterferometer i studiet. I klippet, der kan ses på YouTube [13], afspilles også "sploshet".

Blandt de over 1000 forfattere til artiklerne om opdagelsen er den danske postdoc Alex Nielsen, der arbejder ved Albert-Einstein-Institutet ved "Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik" i Hannover.

²En lignende teknik, kaldet "adaptiv astronomi", benyttes i astronomien til at korrigere for lufturo.

Han fortæller om målingen: “Det var en overraskelse. Vi havde forventet at se noget, men ikke så tidligt, ikke så højt og ikke så tydeligt. Vi var heldige på flere måder. Denne opdagelse tyder på, at antallet af sort-hul-systemer, der kan ses med LIGO-detektorerne, er højere end vi forventede, og det betyder, at vi kommer til at lære rigtig meget om disse objekter i de kommende år. Jeg var heldig, at efter de ca. én milliard år signalet var undervejs, ankom det til Jorden i den europæiske formiddag, så jeg var, sammen med mine kolleger på instituttet i Hannover, en af de første der så signalet. En dag jeg aldrig glemmer.”

Det europæiske rumfartsagentur ESA opsendte i december 2015 satellitten “LISA Pathfinder”, der afprøver teknikker til at bestemme afstanden mellem to fritsvævende terninger meget præcist. Omkring 2034 planlægges opsendelsen af tre mere avancerede satellitter, “eLISA”, der skal måle tyngdebølger ved hjælp af fire masser, som er placeret flere millioner km fra hinanden, og som danner to uafhængige arme, og som vil kunne dække et andet frekvensområde. Man forventer dermed at se tyngdebølger fra langt flere kilder i Universet [14].

Tak til Alex Nielsen, Thomas Tauris, Søren Brandt og Svend Erik Rugh for mange frugtbare kommentarer til artiklen.

Litteratur

- [1] LIGO (2016), Gravitational Waves Detected 100 Years After Einstein's Prediction, News Release Feb. 11, 2016, <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211>.
- [2] LIGO-Virgo (2016), Observation of Gravitational Waves From A Binary Black Hole Merger, <http://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/index.php>.

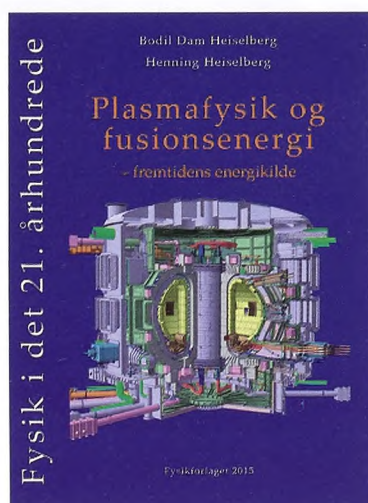
- [3] D. Kennefick (2005), Einstein versus the Physical Review, *Physics Today*, sept. 2005; <http://dx.doi.org/10.1063/1.2117822>.
- [4] J. Preskill og K.S. Thorne (1995), forord i: Feynman Lectures on Gravitation. Westview Press (2002); <http://www.theory.caltech.edu/~preskill/pubs/preskill-1995-feynman.pdf>.
- [5] Den engelske Wikipedia har udmærkede introduktioner til “PSR B1913+16” og “Gravitational wave”; https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave.
- [6] Russell A. Hulse (1993), Nobel Lecture: The Discovery of the Binary Pulsar. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014; http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/hulse-lecture.html.
- [7] B. Abbott m.fl. (2016), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys.Rev.Lett.* **116**, 061102; https://dcc.ligo.org/public/0122/P150914/014/LIGO-P150914_Detection_of_GW150914.pdf.
- [8] B. Abbott m.fl. (2016), Properties of the binary black hole merger GW150914; <https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500218/public/main>.
- [9] P.R. Saulson (1997), If light waves are stretched by gravitational waves, how can we use light as a ruler to detect gravitational waves?, *Amer. J. Phys.* **65**, 01; <http://arxiv.org/abs/1209.0667>.
- [10] K. Riles (2013), Gravitational Waves: Sources, Detectors and Searches, *Prog.Part.Nucl.Phys.* **68**, p. 1-54; <http://arxiv.org/abs/1209.0667>.
- [11] V. Connaughton m.fl. (2016), Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914; <http://arxiv.org/abs/1602.03920>.
- [12] V. Savchenko m.fl. (2016), INTEGRAL upper limits on gamma-ray emission associated with the gravitational wave event GW150914; <http://arxiv.org/abs/1602.04180>.
- [13] Video: Gravitational Waves Hit The Late Show. Brian Greene stops by to demonstrate an exciting new scientific discovery; <https://www.youtube.com/watch?v=ajZojAwfEbs&feature=youtu.be>.
- [14] ESA's eLISA-projekt; <https://www.elisascience.org>.

Aktuelle bøger

Af John Rosendal Nielsen, Michael Cramer Andersen, Anja Skaar Jacobsen og Finn Berg Rasmussen

Kan man skrive en god lærebog til “Fysik i det 21. århundrede”?

Bodil Dam Heiselberg og Henning Heiselberg, “Plasmafysik og fusionsenergi”. Fysikforlaget 2015, lmfk.dk. 97 sider, 125 kr (ved køb af mindst 10 stk. er prisen 100 kr/stk.).



Hvert tredje år bliver der meldt et emne ud til Fysik A-niveau undervisningen i gymnasiet fra undervisningsministeriet. Emnet går under betegnelsen “Fysik i det 21. århundrede”. De tidligere emner har været “Lasernen”, “Dynamiske stjerner”, og “Universets byggesten”, dvs. partikelfysik med fokus på CERNs LHC. Det nye emne er “Fusion og plasma” og det skal løbe de næste 3 år.

Til hvert emne har fysikforlaget udgivet en lærebog, som gerne skulle dække pensum. Tidligere har jeg haft den tvivlsomme fornøjelse at undervise i emnerne Dynamiske stjerner og Om Partikelfysik, og bøgerne til disse emner var – hvis man bruger fodboldjargon – desværre enten skudt ved siden af eller langt over mål. Det var derfor med en del ængstelse, da jeg blev bedt om at læse den nye bog.

Bogen, der er forfattet af to gymnasielærere fra Virum gymnasium, er opdelt i 10 kapitler, som bl.a. dækker fysikken bag fusionsreaktioner og vores forståelse af gasser og plasma. Læserne bliver her introduceret til begreber som reaktionstværsnit og Coulomb-barriere, mens begreber som Q -værdi og bindingsenergi bliver genopfrisket fra undervisningen i kernefysik. Tilstandsligningen for en idealgas og hastighedsfordelingsfunktionen beskrives i detaljer for at forstå plasmaet, og flere begreber som fx magnetisme vil forhåbentligt være et glædeligt gensyn for læserne. Dette krones med en gennemgang af fusionsreaktorer, hvor for-

skellige typer af brændsel og reaktorer bliver forklaret. Disse kapitler – kapitel 2, 3 og 4 – skulle ifølge forlaget dække kernepensum for en A-niveau elev, som kan komme op i fusion og plasmafysik til eksamen.

Der er seks kapitler med supplerende stof, hvor vidt forskellige emner som laserfusion, brintbomben, fusion i stjerner og big bang-kernesyntesen bliver forklaret. Der bliver desuden beskrevet betragtningerne omkring energiresourcer, som man baserer de politiske beslutninger omkring milliardinvesteringerne til fusions- og plasmaforskningen. Kapitel 10 er en lidt rodet affære af forskelligt bonusmateriale, som forfatterne også kalder kapitlet. I dette kapitel er der blevet plads til vidt forskellige emner som fx den semiempiriske masseformel, kvantefysisk tunneleffekt og fusion i Hollywoodfilm. Flere af afsnittene er velegnede til forløb i Almen Studieforbereelse eller studieretningsprojekter, men enkelte afsnit – som fx afsnittet om statistisk fysik og boltzmannfaktoren – kan ikke stå alene, men kræver mere uddybende gennemgang og forklaringer.

I det store hele er denne bog en klar forbedring i forhold til tidligere bøger til emnet Fysik i det 21. århundrede. Det siger dog ikke så meget om denne bog, men mere om den ringe kvalitet som tidligere bøger har haft. Denne bog lider mest af, at forfatterne ville mere end der var afsat sider til. Der er mange eksempler herpå i bogen. Et eksempel er figur 38, hvor en graf af Lawson-kriteriet vises som en figur i marginen. Det kunne man måske leve med, hvis der ikke henvises til grafen i opgave 4.24, hvor læseren forventes at aflæse på grafen. Der er i det hele taget rigeligt med opgaver, og enkelte af opgaverne kunne man måske overveje, om de var nødvendige, da de mest har karakter af matematikopgaver uden større fysisk interesse. Til gengæld savner jeg flere eksempler, hvilket eleverne sikkert ligeledes vil savne. For eksempel har forfatterne ikke ønsket at komme med et eksempel på udregninger med hensyn til reaktionstværsnittet, hvilket eleverne ville have været taknemmelige over at have til den skriftlige eksamen. De manglende eksempler i de fleste fysiklærebøger er desværre en generel tendens. Mange lærebogsforfattere ønsker tilsyneladende ikke, at gøre sig den ulejlighed at skrive nok eksempler.

Alt i alt er bogen glimrende til undervisningsbrug, og man kan kun håbe, at man for fremtiden vil være lige så heldig med at vælge emne, og at man kan koordinere det med skrivning af bogen. Emnet fysik i det 21. århundrede er ikke nemt for lærerne at undervise i, hvis bogen ikke passer til kernepensum, men det synes jeg ikke, at man kan beskyldte denne bog for.

JRN

Ny dansk bog om kosmologi

Holger Nielsen, “Kosmologi – Udforsk Universet”. Forlaget Hax 2016, 288 sider, 340 kr. <http://www.hax.dk>.

Denne bog beskriver en stor del af kosmologien og astrofysikken i et levende sprog og den er rigt illustreret med fotos og pædagogiske figurer. Der er de nødvendige formler og enkelte opgaver, men bogen er lagt an, så den kan læses af enhver der er interesseret.

Det første kapitel, “Universets geografi”, beskriver den nære astronomi, Solen, stjerner, Mælkevejen, galakser og Universets struktur. I det andet kapitel, “Kosmologiens historie”, beskrives udviklingen af planetteorier fra antikken til renæssancen og Newtons gravitationslov samt vigtige bidrag i 1700- og 1800-tallet, sluttende med Kapteyns univers. Her fortælles om de mange berømte astronomer.

Herefter følger et matematisk kapitel, “Krumning og gravitation”, hvor Einsteins almene relativitetsteori bliver introduceret med eksempler på anvendelser, bl.a. gravitationslinser, sorte huller og gravitationsbølger.

I kapitel 4, “Det ekspanderende univers”, fortsættes den kronologiske fortælling om kosmologien i 1900-tallet. Ga-

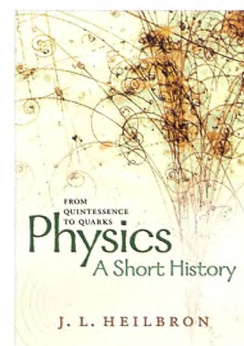
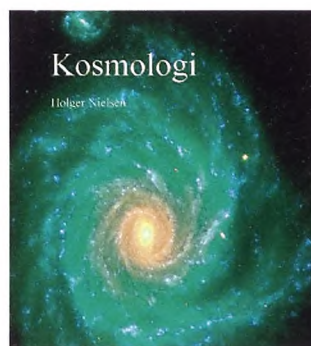
lakserne observeres mere detaljeret, Universets udvidelse erkendes og to konkurrerende teorier udvikles: Big Bang-teorien og Steady State-teorien. De vigtigste observationer diskuteres og bogen beskriver både kosmologiske modeller, mørkt stof, kvasarer og den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling (med resumé af de vigtigste observationer) samt Universets accelererede udvidelse.

Kapitel 5, “Big Bang-teorien”, beskriver bl.a. den tidlige dannelse af grundstoffer (kernesyntesen), inflationsteorien som løser nogle af problemerne med den klassiske Big Bang-teori, strukturdannelse, fortolkning af Big Bang-teorien og modeller for Universet.

Kapitel 6 beskriver “Verdens historie” fra Planck-tiden til i dag. Her beskrives bl.a. nyere teorier for ‘migration i Solsystemet’.

Forfatteren Holger Nielsen har i mange år undervist i matematik, fysik og astronomi i gymnasiet og i astrofysik på Aalborg Universitet. I bogen henvises der mange steder til en række “Godbidder”, der uddyber matematikken og fysikken. Disse findes i et pdf-dokument, som skal købes separat, og det var endnu ikke til rådighed før denne anmeldelse blev skrevet. Bogen er meget opdateret og velskrevet og får en varm anbefaling herfra.

MCA



Fysikhistorie med den brede pensel

J.L. Heilbron, “Physics: A Short History From Quintessence to Quarks”. Oxford University Press 2015, 228 sider, 11 pund (ca. 110 kr).

Denne lille bog af fysikhistoriens nestor John Heilbron kan varmt anbefales. Bogen handler om, hvordan fysikken er blevet til det, den er i dag. Det er historien om fysikkens fremskridt og om formålene med at studere fysik gennem tiderne. Og så er det ikke mindst fortællingen om fysikkens transformationer i omfang og omkostninger. Fysikkens studium er foregået i mange forskellige institutioner, for det meste i vestlige samfund.

Bogens første halvdel dækker de første næsten 2000 år, hvori Aristoteles spillede hovedrollen. Fysikken var også dengang en teori om alting: mekanik, optik, kosmologi, astronomi og astrologi, men der var ingen eksperimenter, og bortset fra i astronomien og astrologien manglede også den matematiske beskrivelse, som karakteriserer fysikken i dag. I middelalderen overtog, oversatte og videreudviklede muslimske lærde den græske viden, som de fandt brugbar i religiøs sammenhæng og i administrationen af det store islamiske imperium, der i en periode strakte sig fra Indien i øst til den spanske halvø i vest. Blandt meget andet blev der opfundet nye astronomiske instrumenter og mængden af observationer af himlen blev øget betragteligt.

Det var et sammenrend af faktorer, der fik naturvidenskab og fysik til at blomstre i den kristne og ikke i den islamiske del af verden på længere sigt. Da korsridderne ødelagde Konstantinopel og forårsagede hjerneflugt til Italien, havde man her netop opfundet universiteterne. Her blev Aristoteles genopdaget og dyrket af lærde, der var påvirket af en ny

social bevægelse, den optimistiske italienske humanisme. Bogen er dejligt fri for historiografisk og videnskabsteoretisk stillads, men Heilbron antyder, at der er sket revolutioner i videnskabens udvikling, når der er opstået et samspil mellem et nyt idékompleks, nye metoder og en institutionel ramme til at varetage dens dyrkelse, på samme måde som i renessancen. Derfor frembragte det en revolution, da Descartes' mekaniske korpuskelteori, der var så omfattende at den kunne erstatte Aristoteles' naturfilosofi, og Boyles eksperimenter med luftpumpen blev inkorporeret i de nyligt dannede videnskabelige akademier i 1600-tallet. Det var perioden hvori fysikken for alvor blev opfundet og med Newton ved roret. Elektriciteten blev 1700-tallets hotteste forskningsområde, understøttet af den tilfældige opfindelse af Leidnerflasken (kondensatoren), der blev anvendt til at underholde et betalende publikum ved spektakulære offentlige demonstrationer.

Heilbron viser en beundringsværdig evne til at destillere en simpel og sammenhængende fortælling ud af den komplekse udvikling fysikken gennemlevede i det 19. og 20. århundrede, fysikkens heroiske tidsalder. I 1800-tallet blev fysik kongevidenskaben og en anerkendt profession, der foregik i laboratorier. Der blev skabt tæt forbindelse og gensidig befrugtning mellem fysikken og industrielle og teknologiske fremskridt, som ledte til frembringelsen af termodynamikken og gasteorien. Samtidigt smeltede fysikken og matematikken sammen, som Maxwells tæmning af elektrodynamikken og Faradays kraftlinjer med partielle differentialligninger er et eksempel på.

Fra (langt hen ad vejen) at være en europæisk disciplin i mere end to årtusinder blev Amerika den altdominerende scene for fysikken i det 20. århundrede efter de to verdenskrige lagde Europa i ruiner og forårsagede en storstilet hjerneflugt til USA. Den udvikling ses ikke mindst i antallet af amerikanske nobelpriser i fysik, der svarer til antallet givet til fysikere i resten af verden til sammen. Ud over de store teorier og deres ophavsmænd Einstein og Bohr, var det århundredet hvor fysikken blev afhængig af store maskiner og store forskningsgrupper, superledning blev opdaget og anvendt og kosmologien gennemlevede flere på hinanden følgende kopernikanske omvæltninger. Og vidste du i øvrigt, at de kæmpende fronter i dagens vejrudsigter er et retorisk levn fra 1. Verdenskrig?

Siden antikken har fysikkens fremskridt været ensbetydende med en stigende afvikling af en deistisk og antropomorf verden. Vi befinder os således i dag i et fascinerende men gruopvækkende og meningsløst univers, der ikke er designet til mennesker, mens naturens mindste bestanddele i deres opførsel trodser enhver hverdagsforestilling. Bogens omslag prydes meget passende af et usædvanligt rigt boblekammerbillede, som måske kan ses som et symbol på fysikkens æstetiske skønhed.

Heilbrons kompakte historie er ikke en begynderbog om fysikkens historie og han bekymrer sig ikke om formidling, men han skriver fantastisk godt og med en karakteristisk underspillende humor. Gennemgangen er ikke teknisk vanskelig og indeholder kun få og simple formler. Derimod kan man godt føle sig nødsaget til at slå et par fremmedartede ord op og måske oversætte et par latinske fraser. Bogen er som titlen siger en kort beretning og derfor skånsom med detaljer, både om de enkelte bidrag til fysikkens udvikling og fysikerne, og naturligvis kommer alt ikke med, så nogen vil uundgåeligt savne et og andet bidrag. Manhattan-projektet nævnes for eksempel kun mellem linjerne. Efter min mening kan bogen ikke anvendes som lærebog i fysikhistorie. Hertil ville man skulle bruge større grad af detalje. Men den er god til at tegne de store linjer i fysikkens historie.

ASJ

Inspiration til tværfaglige forløb om naturvidenskab og litteratur

Lars Green Dall (red.), "Ormehuller. Naturvidenskab i dansk / Essays". Dansk lærerforenings Forlag 2015, dansk.lf.dk/ormehuller. 139+57 sider, 298,75 kr.

I teoretisk fysik er "ormehuller" betegnelsen for nogle hypotetiske kanaler, der forbinder forskellige dele af Universet (rumtiden). Bogens titel er yderst velvalgt, fordi dens formål er at forbinde danskfagets univers med naturvidenskabens univers, med henblik på tværfagligt samarbejde i gymnasiet. I bogens første del (139 sider) skriver Lars Green Dall om de forhold og problemstillinger, der skal tages i betragtning ved tilrettelæggelsen af sådanne aktiviteter. Han yder også praktisk hjælp, dels gennem eksempler, dels (og især) gennem omfattende bibliografier over både skønlitterære og naturvidenskabelige tekster, som han mener ville egne sig til brug i denne sammenhæng.



Bogens sidste 57 sider (som læses fra dens modsatte ende) består af 10 essays af en række kendte forfattere, deriblandt en enkelt fysiker (Holger Bech Nielsen, naturligvis). De er alle udvalgt, fordi de på en væsentlig måde har inddraget naturvidenskab i deres forfatterskab. Det er interessant – lærerigt – at se, hvordan opfattelsen af naturvidenskab varierer indenfor dette panel.

Fx skriver Peter Adolphsen: "... det er kunstens privilegium – i modsætning til videnskaben: at kunne jonglere med sandt og falskt efter forgodtbefindende."

Hos Ida Marie Hede lyder det derimod: "I virkeligheden er videnskabelige forsøg irrationelle og arbitrære, et forsøgs validitet baserer sig fx på, om andre kan gentage forsøget – og den margin af tilfældighed finder ikke sit udtryk i det naturvidenskabelige sprog."

Ursula Andkjær Olsen er ikke langt fra at betegne naturvidenskab som en social konstruktion: "Naturvidenskab er en form for viden, som dels baserer sig på bestemte målemetoder, dels opererer i et felt, som søger konsensus – forstået på den måde, at det er afgørende, at der er enighed om, hvordan verden hænger sammen, eller i hvert fald at der arbejdes på at finde en udlægning af verden, der kan skabes enighed om." Selvfølgelig er vores naturbeskrivelse menneskeskabt, men her lyder det, som om fx det beregnede tidspunkt for en måneformørkelse kun gælder, hvis der er enighed om det.

Som dansklærer har Lars Green Dall ordet i sin magt. Hvad mener han mon fx med følgende: "... evolutionsbiologiske eksempler blev hevet frem af ursuppen, blandt andet fordi – ja *netop* fordi – evolutionsbiologiske tekster af enhver slags ofte strutter af sproglig, argumentatorisk og retorisk energi, som blot venter på at blive indfanget, tæmmet og udladet af den danskfaglige lynafleder." En sådan række ord kan godt fremkalde surt opstød hos undertegnede modstander af *påtvungen* tværfaglighed.

Vi kan desuden nævne, at KVANT tidligere har sat fokus på grænseområdet mellem fysik og litteratur i et temanummer om "Naturvidenskab og digtekunst" (KVANT nr. 4, 2013). Lars Green Dall skrev om Niels Bohr-essaykonkurrencen i KVANT nr. 1, 2014.

FBR

Gravitationelle linser i galaksehobe

Af Michael F. Hansen, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

En af de største gåder indenfor kosmologien er bestemmelsen af det mørke stofs fordeling og natur, da det spiller en central rolle i forbindelse med strukturdannelsen i Universet, i galakser hvor det påvirker hastighedsfordelingen samt i galaksehobe, hvor alt tyder på, at galaksehobe ganske enkelt burde blive splittet ad uden mørkt stof. I denne artikel vil jeg give en kort introduktion til, hvordan gravitationelle linser kan bruges til at modellere fordelingen af stof i galaksehobe, herunder mørkt stof.

Indledning

I forlængelse af artiklen om “Kosmiske Forstørrelsesglas” i forrige nummer af Kvant [1], vil jeg i denne artikel forsøge at give et nærmere indblik i, hvordan man kan udlede viden om det mørke stof ved hjælp af gravitationelle linser.

Helt tilbage i 1937 forudsagde Fritz Zwicky, at afstanden imellem to afbøjninger af den samme lyskilde, omkring en galakse, burde være stor nok til, at den kunne opløses med et teleskop. Alligevel skulle vi vente helt til 1979, før den første reelle gravitationelle linse blev opdaget af Dennis Walsh. Han opdagede at et sæt kvasarer i samme område havde samme farve, rødforskydning og spektre. Herefter gik det også stærkt. Året senere opdagede Weymann m.fl. en triple-kvasar (PG 1115+080), hvor et af billederne havde langt højere lysstyrke end de andre. Det viste sig, at det var en kombination af to billeder.

I 1986 opdagede to uafhængige grupper (Lynds og Petrosian, samt Soucail m.fl.), at der fandtes langstrakte bøjede fænomener omkring to galaksehobe. Disse bøjede fænomener har senere fået betegnelserne *buer* og *lysstærke kæmpebuer*¹.

Da det allerede tidligt blev vurderet, at et linsefænomen, hvor en kilde er så perfekt placeret bag linsen, således at en “Einstein-ring” fremstår, ville være temmelig usandsynligt, var det derfor en stor overraskelse da Hewitt m.fl. i 1988 opdagede en ring i radiokilden MG 1131+0456. I 1989 opdagede Langston m.fl. endnu en ring, fra kvasaren PG 1115+080, og Einstein-ringe er nu et ganske velkendt observationelt fænomen. Alt hvad der har været nævnt indtil nu, har drejet sig om stærk linsning, hvilket betyder at der kommer flere billeder fra samme kilde.

I 1990 blev det første eksempel på svag linsning opdaget, hvor der kun fremstår et enkelt billede af samme kilde. Opdagelsen blev gjort af Tyson m.fl. i to galaksehobe. Vi kender nu til adskillige galaksehobe med svag linsning og store hobe, såsom Abell 2218, som også er rig på stærk linsning, buer mv.

Derudover har man i samme periode opdaget fænomener som mikrolinsning, både via stjerner i galakser og via galakserne selv.

Overordnet findes der tre måder, hvorpå man kan benytte gravitationel linsning i praksis. Man kan enten benytte de linsede billeder til at modellere det gravitationelle potentiale og dermed massen og massefordelingen i linsen selv, eller man kan benytte de linsede billeder til at undersøge kilderne, hvorfra de linsede billeder kommer. Den tredje er mikrolinsning, se fx [2]. Det er førstnævnte fænomen, som vil blive introduceret i denne artikel.

Gravitationel linsning

Selvom gravitationel linsning er et felt i rivende udvikling, og mængden af tilgængelig viden nærmest vokser eksplosivt, må man desværre konstatere, at andelen som udgør en decideret generel indføring i teorien, er ret sparsom. Af gode bøger findes dog den lidt ældre “Gravitational Lenses” [3], og der findes derudover en række forelæsningsnoter, hvor et af de nyere sæt [4] er fra 2006. Fælles for dem er, at de er på universitetsniveau.

Selve den grundlæggende ide bag gravitationel linsning bygger på Einsteins generelle relativitetsteori (GR), og skal derfor i princippet løses via Einsteins Feltligninger

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

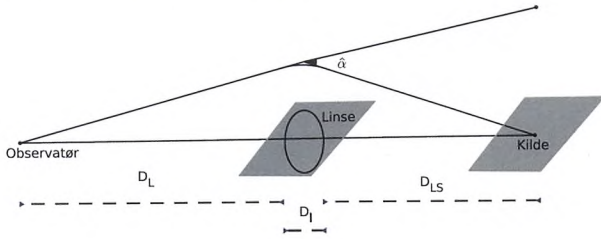
hvilket betyder løsningen af ti koblede ligninger. Heldigvis kan vi benytte nogle relativt enkle antagelser til at linearisere feltligningerne og dermed forsimplere teorien betragteligt.

Vi starter med at antage, at vi kan arbejde i det svage gravitationelle regime. Indenfor GR kan man inddele tyngdekraften i to regimer, det stærke og det svage. Det stærke kender vi fra neutronstjerner, sorte huller mv. og betyder generelt, at vi regner med store vinkler og voldsomme afbøjninger af lyset. I det svage regime kan vi derimod regne med afbøjninger i små vinkler, hvilket medfører at $\sin \alpha \approx \alpha$.

Dernæst benytter vi et andet princip, illustreret på figur 1, som kaldes *Tynd-linse*-approksimationen. Fordi afstandene D_L og $D_{LS} \gg D_l$, kan vi anse massefordelingen i linsen for at være 2-dimensionel. Dette

¹På engelsk: “Arcs” og “Giant Luminous Arcs”.

medfører, at den rumlige afbøjning omkring linsen kan approksimeres til en enkelt vinkel $\hat{\alpha}$.



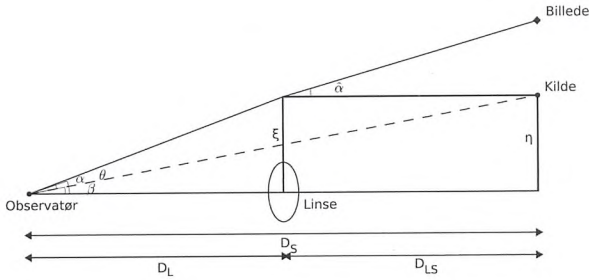
Figur 1. Illustration af Tynd-linse-approksimationen. Illustrationen viser, hvordan vi ved at forsimple den tredimensionelle masse ned på to dimensioner, kan antage, at den rumlige bøjning kan approksimeres til at være en skarp kantet vinkel $\hat{\alpha}$, kaldet afbøjningsvinklen.

Ray-tracing-ligningen

Med disse to antagelser på plads kan man introducere den mest centrale ligning indenfor gravitationel linse, linse- eller ray-tracing-ligningen

$$\vec{\beta}(\vec{\theta}) = \vec{\theta} - \hat{\alpha}(\vec{\theta}) \quad (2)$$

hvor $\vec{\beta}$ er kildens vinkel-position, $\vec{\theta}$ er det linsede billedes vinkel-position og $\hat{\alpha}$ er afbøjningsvinklen. Dette er illustreret på figur 2.



Figur 2. Illustration som viser en typisk linseopsætning. Her er ξ afstanden fra den optiske akse til billedet og η afstanden fra den optiske akse til kildens sande position. α er vinklen imellem kildens sande position og billedet, β er vinklen fra den optiske akse til kildens sande position og θ er vinklen fra den optiske akse til billedet. D_L , D_S og D_{LS} udgør vinkeldiameter-afstandene imellem hhv. observatør og linse(plan), observatør og kilde(plan) og linse(plan) og kilde(plan).

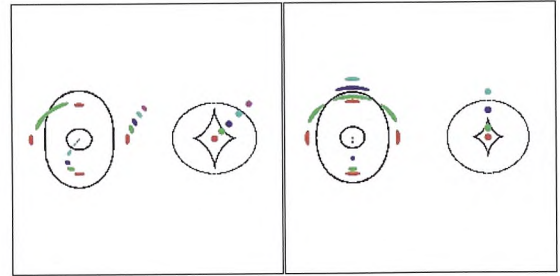
Derudover har vi afstanden fra den optiske akse til billedet, ξ , afstanden fra den optiske akse til kildens faktiske position, η , samt afstandene D_{LS} , D_L og D_S , som hhv. angiver afstanden mellem linse og kilde, observatør og linse og observatør og kilde. Der gælder generelt at $D_S \neq D_{LS} + D_L$, hvilket skyldes måden man beregner den kosmologiske afstand, kaldet vinkeldiameter-afstanden.

Som ligningen er opskrevet her, er den lineær, mens den inverterede udgave er ikke-lineær. Det betyder, at hvis vi kender mindst et billede, kan vi udlede at der må findes en kilde, men vi kan ikke udlede antallet af billeder, hvis vi kender en kilde. Dette er særligt relevant ift. numeriske løsninger, da en invertering vil medføre mange mulige løsninger for samme system og dermed flere beregninger.

Ved at indføre afbøjnings-potentialet $\psi(\vec{\beta}; \vec{\theta})$, kan man finde ray-tracing-ligningen ved at udregne gradienten $\nabla_{\theta} \psi(\vec{\beta}; \vec{\theta}) = 0$ og ved at udregne den dobbelte afledte $\nabla_{\theta}^2 \psi(\vec{\beta}; \vec{\theta})$ kommer man frem til Jacobian matricen

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

som er en symmetrisk matrix bestående af konvergen- sen κ og deformationen $\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$, også kaldet "shear". Konvergen- sen medfører en ensartet forstør- relse af billedet, mens deformationen vil skævvride billedet i en elliptisk form og i en bestemt vinkelret- ning. Positionen og formen af billeder ved forskellige positioner af en kilde, er illustreret på figur 3.



Figur 3. Illustration af, hvordan billeder dannes, ændrer sig og transformeres i relation til positionen. Her er det positionen af kilden til højre og billedernes position og form, til venstre. De overordnede kasser, angiver to forskellige scenarier for kildens position. Ligger både kilde og linse tæt på den optiske akse, vil der optræde fem linsede billeder.

Her ser man to overordnede kasser som angiver to forskellige scenarier for kildens placering (til venstre krydser kilden en fold caustic, til højre en cusp caustic). Inde i hver kasse udgør venstre del linseplanet og højre del kildeplanet. De forskellige kurver i figuren kaldes for kritiske linjer og caustics, hvor de kritiske linjer findes i linseplanet og caustics er de kritiske linjer projiceret ned i kildeplanet. De kritiske linjer fortæller os, hvorhenne der vil dannes store buer (to/tre billeder mødes og forstørres voldsomt), samt hvor der dannes flere billeder. Caustics fortæller det samme, blot ud fra positionen af kilden. Generelt gælder der, at når en kilde krydser en caustic, udefra, dannes der to nye billeder. Modsat, krydser en kilde en caustic indefra, forsvinder to billeder. I selve krydset over en caustic, vil to/tre billeder forstørres, smelte sammen og to af dem vil forsvinde. Er kilden placeret uden for den yderste caustic, dannes der kun ét billede. Den inderste kritiske linje projiceres ned som den yderste caustic og omvendt. De forskellige farver indikerer forskellige placeringer af billederne (linseplan) og forskellige positioner af kilden (kildeplan), hvor farver på billeder og kilde hører til samme model.

Grundlæggende set består en modellering af en numerisk løsning af ray-tracing-ligningen.

Observationer og modeller

Las os nu kigge på hvordan man kan benytte numeriske modeller/simuleringer til at sige noget om fordelin- gen af stoffet i hobene. Jeg tager udgangspunkt i den

Det vigtigste er dog at være sikker på, at billederne stammer fra samme kilde, og at afstanden til billederne er præcis. Dette gøres ved at kigge på farve, form og evt. spektre fra billederne. Selvom afstanden er vigtig, kan modellen optimere for denne, hvilket dog medfører flere frie parametre. I figur 4 ses Hubble-observationer af Abell 1703, hvor de multiple billeder er markeret med hvide cirkler.

²Som udvælger galakser med en specifik farve.

Figure 1 consists of two vertically stacked scatter plots. The top plot shows the relationship between F850LP (x-axis, ranging from 16 to 26) and F625W-F850LP (y-axis, ranging from -2 to 2). The bottom plot shows the relationship between F850LP (x-axis, ranging from 16 to 26) and F775W-F850LP (y-axis, ranging from -2 to 2). Both plots display a dense cloud of black points representing galaxies. A red box in each plot highlights a region of interest, approximately between F850LP = 17 and 21 and color index = 0.5 and 1.0. The red box in the top plot is slightly tilted, while the one in the bottom plot is more horizontal.

17

Da man antager, at fordelingen af varm gas i en hob følger fordelingen af det mørke stof, kan man benytte data fra røntgen-teleskoper til at verificere modellen. Der findes dog undtagelser [7]. I figur 6 kan man se en observation af Abell 1703 fra Chandra-teleskopet, overlagt konturer fra optiske data.

En sammenfatning af resultaterne fra den bedste model af Abell 1703 kan ses på figur 7, som viser konturlinjer fra Chandra-data og modellens fordeling af masse overlagt optiske data. Her kan man kvalitativt se, at modellens fordeling af masse og fordelingen af gas følger hinanden. Man kan også se, at massefordelingen er elliptisk, hvilket har vist sig at være generelt for galaksehobe.



Figur 7. Et F775W filter billede af Abell 1703 med observationerne fra Chandra samt modellens massefordeling, overlagt som hhv. røde og hvide konturer. Billedet er roteret i en anden retning end i figur 4 og 6 (normalt Nord-op, Øst-venstre) for at undgå at skære billedet uhensigtsmæssigt.

Derudover kan man konkludere, at Abell 1703 er en unimodal relakseret hob. Uden at gå i for mange detaljer, kan det siges, at for en sådan hob gælder, at den har én central top i massefordelingen, og at det mørke stof er samlet om ét centralt punkt. Et eksempel på en bimodal ikke-relakseret hob kunne være Abell 2218. Hvis man derudover kan bestemme massen af baryonisk stof³ og gas i hoben, kan man bestemme massen af det mørke stof meget præcist.

Afrunding

Jeg har i denne artikel givet et kort indblik i de mange anvendelsesmuligheder gravitationelle linser har. De kan derudover anvendes til at finde exo-planeter, undersøge fjerne galakser, bestemme fordelingen af mørkt

stof i galakser, samt bestemme de kosmologiske parametre.

I en relativt kort artikel som denne kan jeg kun dække en brøkdel af de mange anvendelsesmuligheder gravitationelle linser har, selv ved en indsnævring til kun at behandle galaksehobe. Jeg håber dog, at den kan være med til at tænde en interesse hos både fysiklærere, gymnasie- og fysikstuderende for dette spændende felt, som er med til at give os helt central indsigt i det univers, som omgiver os.

Litteratur

- [1] Jens Hjort, Lise Christensen, og Claudio Grillo (2015), Kosmiske forstørrelsesglas. *KVANT*, årgang 26, december 2015, side 19-22.
- [2] Kennet Bomann West Harpsøe. Jagten på Jordlignende planeter med gravitationel mikrolinsning. *KVANT*, årgang 23, maj 2012, side 22-26.
- [3] J. Ehlers E.E. Falco P. Scheider. *Gravitational Lenses*. Springer-Verlag, New York, 1st. edition, 1992.
- [4] J. Wambsganss C.S. Kochanek P. Scheider (2006), *Gravitational Lensing: Strong, Weak and Micro*, volume 33 of *Sass-Fee Advanced Course*. Springer-Verlag, Berlin.
- [5] M. Limousin, J. Richard, J.-P. Kneib, et al. (2008), Strong lensing in Abell 1703: constraints on the slope of the inner dark matter distribution. *A&A*, 489, pp. 23-35, October 2008. doi: 10.1051/0004-6361:200809646.
- [6] J. Richard, L. Pei, Limousin, et al. (2009), Keck spectroscopic survey of strongly lensed galaxies in Abell 1703: further evidence of a relaxed, unimodal cluster. *A&A*, 498, pp. 37-47, April 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200811366.
- [7] Steen H. Hansen, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman, et al. (2009), Mørkt stof – Vi ved så meget og dog så lidt. *KVANT*, årgang 20, maj 2009, side 14-18.



Michael Hansen er kandidatstuderende på *Dark Cosmology Centre* og hans speciale omhandler modelleringen af gravitationelle linser i galakser og galaksehobe, for bl.a. at kunne bestemme fordelingen og massen af mørkt- og baryonisk stof, samt gas.

³Ved at bestemme massen i de enkelte galakser og summe op.

Foreningsnyt – foredrag i foråret 2016

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Mar.				
14/3	19.15	Tyngdekraften og kosmologien	Helge Kragh	AS (Kbh)
21/3	19.30	Indlandsisen smelter – har den altid gjort det?	Anders Bjørk	SNU
29/3		Tyngdebølger observeret for første gang med LIGO Se information om tid og sted på AS' hjemmeside (astronomisk.dk)	Alex Nielsen	AS
Apr.				
4/4	19.45	Tyngdekraften og kosmologien	Helge Kragh	AS (Aarh)
11/4	19.15	Det mørke univers	Ole Bjælde	AS (Kbh)
18/4	19.30	Er gassen ved at slippe ud af Urtidens super-drivhus?	Christian M.Ø. Rasmussen	SNU
18/4	19.45	Det mørke univers	Ole Bjælde	AS (Aarh)
Maj				
2/5	19.15	Sorte huller	Marianne Vestergaard	AS (Kbh)
9/5	19.30	Wake-up call for klimaet – klimareporter, klimakonventioner og klimamodeller: Hvad bliver vores klimafremtid?	Jens Hesselbjerg Christensen	SNU
9/5	19.45	Sorte huller	Marianne Vestergaard	AS (Aarh)

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Inst., Aarhus Univ., Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, lokale G122, 8000 Aarhus C.

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

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Temaet for foredragsrækken i foråret 2016 er “Den nyeste klimaforskning”. Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjertelig velkomne!

Astronomisk Selskab

Temaet for forårets foredragsrække er “Astronomiske gennembrud gennem tiden”. I 2016 fejrer vi 100-årsjubilæet for Astronomisk Selskab, der blev grundlagt i oktober 1916. I denne række af fem foredrag i foråret 2016, og efterfølgende i fem foredrag i efteråret 2016, tager vi et blik tilbage på de største gennembrud i den astronomiske forskning i dette tidsrum fra 1916 til 2016. Tilrettelæggere: Cand. scient., ph.d. Jens Jessen-Hansen og stud. scient. Rand Tuma, Astronomisk Selskab.

Indkaldelse til Generalforsamling i Astronomisk Selskab:

Lørdag den 16. april 2016 på Brorfelde Observatoriet, Observator Gyldenkernes Vej 7, 4340 Tølløse (i værkstedet).

Program:

Kl. 11.00: Foredrag ved observatoriets leder Julie K.L. Bouchet omkring Brorfelde Observatoriet og planerne for dets fremtid som et flagskib i formidlingen af astronomien.

Kl. 12.00: Frokost (dækkes af selskabet).

NB: Tilmelding påkrævet til kasserer Steen Traberg-Borup på email: steen@traberg-borup.dk – senest onsdag den 1. april 2016.

Kl. 13.00: Generalforsamling.

Dagsorden for generalforsamlingen:

1. Valg af dirigent og referent.
2. Godkendelse af referatet fra generalforsamlingen 11. april 2015. (Kan ses på astronomisk.dk).
3. Formandens beretning om Astronomisk Selskabs virksomhed i det forløbne år.
4. Beretning fra sektioner og udvalg.
5. Kassererens beretning for det reviderede regnskab. Regnskabet fremlægges ved generalforsamlingen.
6. Godkendelse af bestyrelsens budgetforslag for indeværende år og fastsættelse af medlemskontingent for det kommende år. Budgettet fremlægges ved generalforsamlingen.
7. Godkendelse af vedtægtsændringer for Astronomisk Selskab. Kapitel IV, stykke 3 forslås ændret til (ændring markeret med fed skrift): “Indkaldelsen og bekendtgørelsen af dagsordenen skal ske med mindst tre ugers varsel enten gennem et af de tidsskrifter, der udsendes til samtlige medlemmer, **på foreningens hjemmeside**, eller pr. post. Stedet for generalforsamlingen fastsættes af bestyrelsen, der tilser en geografisk spredning af mødestederne, som svarer til medlemmernes fordeling over landet.”
8. Indkomne forslag. Der er indkommet forslag fra Torben Tastrup om at opdatere “Astro-Forum” med en ny og mere tidssvarende software, som vil gøre adgangen fra pc, smartphone og tablet mere brugervenlig. Forslaget blev ikke indsendt inden 1. februar og kan således ikke formelt medtages som et medlemsforslag, men bestyrelsen vil godt tage punktet op på egne vegne.
9. Valg af to bestyrelsesmedlemmer for tre år. Søren Lynggaard og Steen Traberg-Borup er på valg. Bestyrelsen foreslår genvalg.
10. Valg af en første og en anden suppleant til bestyrelsen for ét år. Bestyrelsen foreslår genvalg af Jens Jessen-Hansen. Rand Tuma ønsker ikke at genopstille. Bestyrelsen foreslår Kasper Elm Heintz som anden suppleant.
11. Valg af formand for ét år. Bestyrelsen foreslår Johan Fynbo.
12. Valg af to revisorer samt en første og en anden revisorsuppleant for ét år. Bestyrelsen foreslår genvalg af Steen Lærke og Bent Schou som revisorer og genvalg af Karsten Klindt-Jensen og Birgit Fejerskov som hhv. første og anden revisorsuppleant.
13. Eventuelt.

Nordstjernen – en spændende stjerne

Af Michael Quaade

Fra Danmark kan man se *Nordstjernen* eller *Polaris* enhver stjerneklar nat. Ikke alle ved at det er en dobbeltstjerne, hvor den klareste faktisk også er dobbelt. Nordstjernen er desuden en cepheide-variabel stjerne.

Nordstjernen står mindre end en grad fra himmelpolen – det punkt, der ligger lige i forlængelse af Jordens omdrejningsakse. Det er derfor, den altid står næsten helt samme sted på himlen, mod nord omkring 56° over horisonten. Derfor kan den bruges som en slags kompas til at finde nordretningen.

Det er langt fra den eneste interessante egenskab ved Nordstjernen. I en astronomisk kikkert kan man se at den er en dobbeltstjerne. Den lysstærke komponent, Polaris A, har en markant svagere ledsagerstjerne, Polaris B. Størrelsesklasserne for Polaris A og B er henholdsvis 2 og 8,6. De to dobbeltstjernekomponenter lyser henholdsvis 1200 og 4 gange så kraftigt som Solen. Polaris B blev opdaget af William Herschel i 1780. Vinkelafstanden mellem de to stjerner er $18''$ eller $1/200$ af en grad. Den rumlige afstand er 2400 astronomiske enheder, 2400 gange Jordens afstand fra Solen. Det er 80 gange afstanden fra Solen til den yderste planet Neptun.

I 1929 viste det sig at Polaris A selv er en dobbeltstjerne. Dengang kunne det kun ses ved analyse af stjernens spektrum. En dobbeltstjerne, hvor man ikke kan skelne de to stjerner i en kikkert, men kun påvise ledsageren i stjernens spektrum, kaldes en spektroskopisk dobbeltstjerne. Den tætte ledsagerstjerne kaldes Polaris Ab.

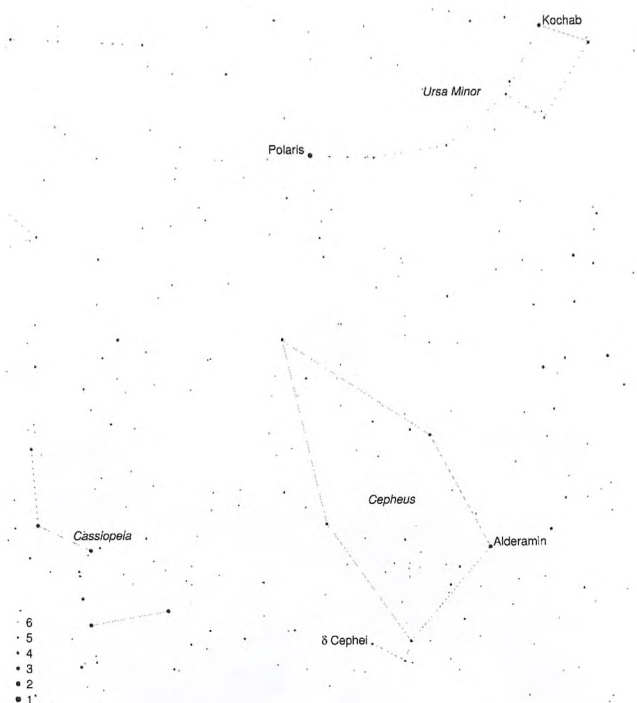
I august 2005 lykkedes det for første gang at optage et billede, der viser både Polaris A og Ab med Hubble Rumteleskopet [1] og [2]. Den står kun $0,172''$ fra Polaris A på himlen og afstanden mellem de to stjerner er 18 astronomiske enheder, nogenlunde som afstanden mellem Solen og Uranus. Det tager dem knap 30 år at fuldføre et baneomløb om deres fælles tyngdepunkt.

En anden interessant egenskab ved Nordstjernen er, at den pulserer. Polaris A udvider sig og trækker sig sammen regelmæssigt med en periode på knap fire døgn. Det ses ved at stjernens lysstyrke varierer med den samme periode. Udsvingene er ganske små, lysstyrken ændrer sig kun omkring 3 % eller lidt mere end 0,03 størrelsesklasse.

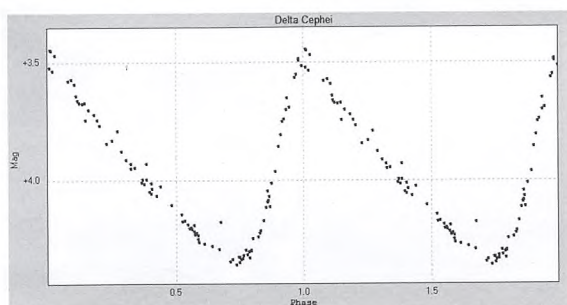
Polaris A tilhører den klasse af pulserende stjerner, der kaldes cepheider. Pulsationerne i cepheider og andre stjerner er udførligt beskrevet i [3]. De er opkaldt efter stjernen δ Cephei i stjernebilledet *Cepheus*, nogenlunde tæt ved Nordstjernen i *Lille Bjørn*, *Ursa Minor*. δ Cephei pulserer med en lidt længere periode, 5 døgn og 16 timer, og med en meget større amplitude, se figur 3. Når den er klarast lyser den mere end dobbelt så kraftigt som når den er svagest – en forskel på 0,9 størrelsesklasse. Lysstyrkevariationerne hos δ Cephei blev opdaget af John Goodricke i 1784.



Figur 1. Nordstjernens (Polaris) tre komponenter. Øverst t.h. ses Polaris A og B, som de kan ses i selv en mindre astronomisk kikkert. Nederst t.h. ses Polaris A og Ab optaget med Hubble Rumteleskopet i 2005 (NASA/ESA) [1].



Figur 2. Stjerne kort, der viser stjernebillederne Ursa Minor, Lille Bjørn og Cepheus med stjernerne Polaris og δ Cephei.



Figur 3. Lysvariationen i δ Cephei over to hele pulsationer (Wikimedia Commons).

Pulsationerne holdes ved lige ved at visse lag i stjernen skiftevis opsuger energi fra stjernelyset og slipper energien løs igen. Når de fanger energien puster stjernen op og når energien slippes løs falder den sammen igen.

De relevante lag er dem, hvor en temperaturforøgelse bevirker en forøget ionisation af stjernematerialet. I stjernens indre dele er temperaturen så høj at alt stoffet er ioniseret. Nær stjernens overflade, hvor temperaturen er lavere, er stoffet ikke eller kun delvis ioniseret. Bevæger man sig fra stjernens overflade til dens ioniserede indre passerer man en overgangszon, hvor stoffet gradvis overgår til den ioniserede tilstand. Det er netop denne zone, der gør det muligt for nogle stjerner at opretholde pulsation med stor amplitude.

Det er kun ionisationszonerne for brint og helium, der spiller en rolle, fordi en stjerne næsten kun består af de to stoffer. Brint og neutral helium ioniseres ved temperaturer på omkring 10-15.000 K mens én gang ioniseret helium ioniseres yderligere ved 40.000 K.

I den fase af pulsationen, hvor stjernen trækker sig sammen, stiger tryk og temperatur i gassen, der udgør stjernen. Det øgede tryk puster herefter stjernen op igen. Når stjernens rumfang øges falder tryk og temperatur igen og stjernens egen tyngdekraft trækker den sammen igen og forløbet gentages. Svingningstiden afhænger af stjernens størrelse; en stor stjerne pulserer langsommere end en mindre. Det kan sammenlignes med luftens svingninger i en orgelpibe.

I et orgel er det de de største piber, der giver de dybe, lavfrekvente toner.

Grunden til at en ionisationszone kan bidrage til at øge pulsationen er, at den forøgede temperatur i kompressionsfasen ioniserer stoffet. Det betyder, at trykket stiger yderligere, så stjernen udvider sig ved et større tryk end den skulle overvinde i den forudgående sammentrækningsfase. På den måde overføres energi til pulsationen, der derved forøges.

Det er kun et fåtal af stjernerne, der pulserer med store amplituder. Kun stjerner, hvor ionisationszonerne ligger i en passende dybde i stjernen kan bruge ionisationen til at holde pulsationen i gang. Det skyldes, at der skal være en tilstrækkelig stor del af stjernens masse, der ligger i ionisationszonen og samtidig tager del i pulsationsbevægelserne. Langt ude i stjernen er stoffet ganske tyndt, mens massefylden tiltager ind gennem stjernen. Til gengæld er udsvingene i løbet af pulsationen langt større i stjernens ydre del – det meste af de indre dele ligger næsten helt stille.

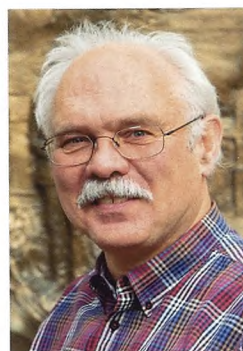
I stjerner med en høj overfladetemperatur ligger ionisationszonerne yderligt, hvor massefylden ikke er særlig stor og der er derfor ikke tilstrækkeligt med stof, der kan gå til og fra den ioniserede tilstand i løbet af en svingning. I kolde stjerner ligger ionisationszonerne så dybt, at pulsationsamplituden er for lille til at forårsage tilstrækkelige variationer i ionisationen. Overfladetemperaturen spiller derfor en stor rolle for, om vi kan forvente pulsationer i en given stjerne.

Ud over temperaturen spiller stjernens størrelse og lysstyrke også en væsentlig rolle. I store, lysstærke kæmpestjerner ligger det "rigtige" temperaturinterval for pulsation ved lavere temperatur end i mindre stjerner. Denne sammenhæng fremgår af Hertzsprung-Russell-diagrammet, der viser sammenhængen mellem stjernernes temperatur og lysstyrke. Her ligger hovedparten af de pulserende stjerner i et karakteristisk skråt bånd gennem diagrammet.

Ovenstående gælder kun for stjerner med store pulsationsamplituder. Ved hjælp af vore dages følsomme instrumenter kan man observere svingninger i alle stjerner, se [4]. Enhver stjerne har et karakteristisk svingningsspektrum, der udviser et stort antal resonansfrekvenser. Svingningsspektret giver meget detaljerede oplysninger om stjernens opbygning, størrelse mv.

Litteratur

- [1] Nancy Evans, Howard Bond, <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2006/02>.
- [2] Nancy Remage Evans m.fl. (2008), Direct Detection of the Close Companion of Polaris with the Hubble Space Telescope; <http://arxiv.org/abs/0806.4904>.
- [3] John P. Cox, Theory of Stellar Pulsation, Princeton University Press 1980.
- [4] Torben Arentoft, Jørgen Christensen-Dalsgaard m.fl. (2009), Helio- og asteroseismologi, KVANT årgang 20, nr. 2.



Michael Quaade er kommunikationsmedarbejder ved Niels Bohr Institutet.

Af Sven Munk, KVANT

Super-super-supernova!

ASTROFYSIK. De to billeder viser samme udsnit af himmelhvælvet. Det til venstre er optaget i 2014. Her angiver den røde markering placeringen af en stor galakse. At det er en galakse, skal man nok være astronom for at se.



Billedet til højre viser lyset fra en supernova under udbrud. Lyset er så kraftigt, at galaksen ikke længere kan identificeres som en sådan.

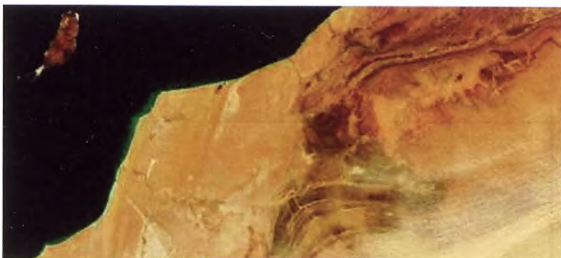
Forskerne anfører, at ASASSN-15lh er den mest lysstærke stjerneeksplosion, som nogensinde er set. Med tal bliver lysstyrken angivet til 570 mia. gange Solens – eller 20 gange så meget som lyset fra alle stjernerne i galaksen. Afstanden fra Jorden opgives til at være 3,8 mia. lysår.

Forskerne har på nuværende tidspunkt ikke nogen fast mening om mekanismerne bag eksplosionen. Især frigørelse af den enorme energi rejser spørgsmålet: Hvor kommer energien fra?

Kilde: Subo Dong et al., ASASSN-15lh: A highly super-luminous supernova, *Science* **351**, 257-260, 2016; <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac9613>.

Floder i Sahara

GEOFYSIK. Hvor der i Sahara nu er sandbanker i uanede mængder var der i perioder store floder. Palæoklimatiske undersøgelser i Vestafrika (Mauretanien, Algier) har vist, at flere store floder har efterladt sig spor. Ikke blot på land, hvor man finder flodlejer fra Atlasbjergene, i Algier, ud til Atlanterhavet. Men også i vand, ved kysten ud for Mauretanien. Det seneste tidspunkt, hvor der var et fugtigt tropisk klima, fører 7.000-14.000 år tilbage.



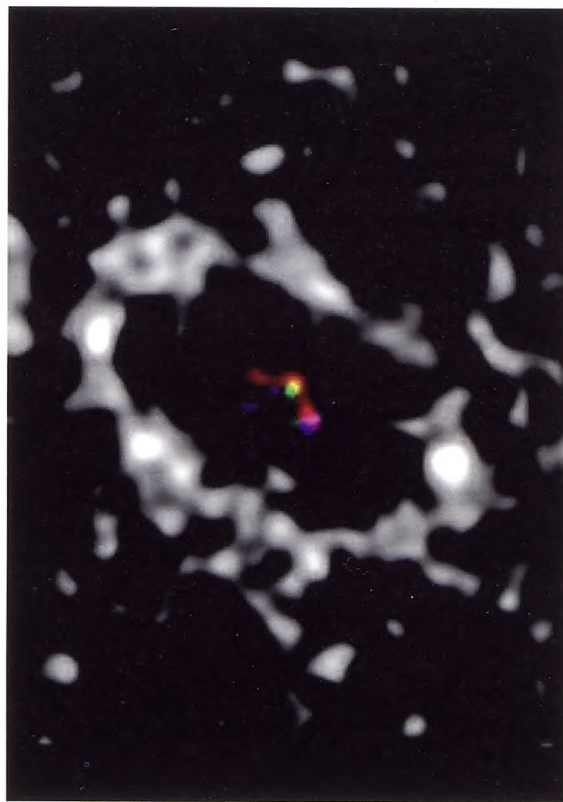
Billedet herover viser Atlanterhavet til venstre, som rammer kysten ved Mauretanien. Optagelsen stammer fra NASA. Væsentlige bidrag til undersøgelserne er ydet af den japanske PALSAR-satellit. Forskernes opdagelser styrker hypotesen om, at der i de sidste 250.000 år i flere omgange har været varmt og fugtigt i området. Resultaterne fra Mauretanien finder man tilsvarende i Egypten, langs Middelhavskysten i Nordafrika og det Vestafrikanske Senegal.

Kilder: C. Skonieczny et al., African humid periods triggered the reactivation of a large river system in Western Sahara, *Nature Communications* **6**, article nr. 8751, 2015; <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms9751>.

Protoplanet på vej

ASTRONOMI. Med nye metoder er det for første gang lykkedes for en række astronomer at se en planet under dannelse. Den Jupiter-lignende planet befinder sig 470 lysår fra Jorden. Afstanden mellem planet og stjerne er 15 AE (omtrent som Uranus' baneradius). Området har fået betegnelsen: LkCa 15.

Astronomerne er ikke helt uforberedte på det de iagttager. Der er blandt de 1900 exoplaneter, som kendes, ikke fundet nogen, som er under dannelse. Forskellige observationer viser hvordan en ny stjerne er omgivet af en roterende skive af støv og stof. Det er heller ikke ukendt, at rummet tæt på stjernen hurtigt bliver "støvsuget", når først planeterne viser sig.



Den nye iagttagelse er særlig derved, at planeten befinder sig i et område af materieskiven. Derfor har planeten let ved at indfang mere materie, så den kan vokse.

En analyse af strålingen fra planeten viser, at lyset er ret kraftigt, når kilden er ioniseret brint. Af dette udleder astronomerne, at magnetfeltet i den nye planet er kraftigere end det, der gælder for "vore" gasplaneter.

Kilde: S. Sallum et al., Accreting protoplanets in the LkCa 15 transition disk, *Nature* **527**, 342-344, 2015; <http://dx.doi.org/10.1038/nature15761>.

En svamp for kuldioxid

KEMI. Målet for en international forskergruppe har været at finde værktøjer/metoder til at udskille kuldioxid fra gasser fra f.eks. forbrændingsanlæg. Gruppen melder nu, at der er udviklet et nyt, ekstremt porøst materiale, som kan opsamle meget kuldioxid. Der er tale om en krystallinsk, metalorganisk struktur (skelet), der virker som en svamp for kuldioxid.

I et forsøg med en blanding af brint og kuldioxid fandt forskerne, at der var relativt meget kuldioxid, som fandt vej ind i de 0,5 nanometer små porer i svampen. Forskerne har også beskrevet den forholdsvis enkle metode til fremstilling af det nye materiale.

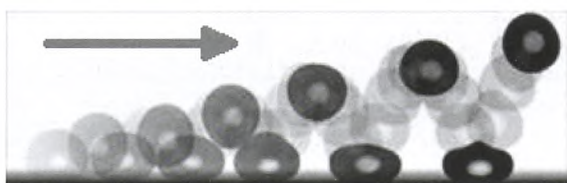
Kilde: S. Nandi et al., A single-ligand ultra-microporous MOF for precombustion CO₂ capture and hydrogen purification, *Science Advances* **1**, no. 11, 2015; <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1500421>.

Vanddråber hopper

VÆSKEFYSIK. Under de rette betingelser kan man få vanddråber til at begynde at hoppe på en overflade. På billedet ses, hvordan hoppene bliver højere med tiden. Det virker naturstridigt, at højden bliver større, når tiden går. Derfor er der på billedet med pil markeret, hvordan forløbet er. Nogle har måske oplevet noget, der ligner, nemlig vanddråber på en MEGET varm kogeplade.

For at gentage forskernes forsøg skal der dog bruges andet udstyr. Et svagt vakuum skal fremskaffes, og så en superhydrofobisk overflade – en overflade, som med stor bestemthed afviser vand.

I det aktuelle tilfælde bestod overfladen af silicium med talrige mikrosøjler, som yderligere blev påført noget fluorsilan (silikone-agtigt). Ved normaltryk (1 atm), var de ca. 1 mm små vanddråber på overfladen nærmest kugleformede. Det overraskende skete, da lufttrykket sank til 0,01 atm. Vanddråberne begyndte at hoppe omkring 5 gange pr. sekund og endda med stigende højde, ca. 0,1 mm forøgelse fra ét hop til det næste.



Forklaringen lyder: Det er den kombinerede virkning af vandets fordampning og frastødningen fra overfladen. Når vandet fordamper dannes der et svagt tryk under dråben. Da overfladen i sig selv frastøder vand er det kun tyngdekraften som kan holde dråberne på overfladen.

Kilde: Thomas M. Schutzius et al., Spontaneous droplet trampolining on rigid superhydrophobic surfaces, *Nature* **527**, 82-85, 2015; <http://dx.doi.org/10.1038/nature15738>.

Fra sollys til brint

ENERGITEKNIK. Stoffet titandioxid kan med sollys spalte vand i ilt og brint. Det er med andre ord muligt via brint at opsamle og gemme solenergi. Ren titandioxid er ikke særlig effektiv, når vandmolekyler skal splittes. Forskerne har undersøgt en udformning af den sollys-absorberende overflade, som er mere effektiv. Billedet herunder viser princippet. Overfladen består af tætsiddende nano-søjler af titandioxid, med et tværsnit der måles i nanometer. I forsøget stod søjlerne på en glasplade.



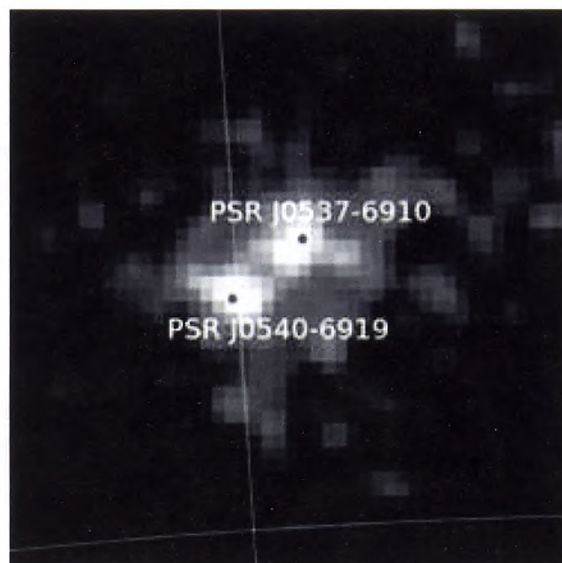
For at forøge den elektriske ledningsevne i disse søjler er de doteret med grundstoffet tantal. For at få dette til at fungere elektrisk skulle søjlerne opvarmes til 600 °C. Imidlertid var indfangningen i sollys ikke overvældende god. Søjlerne blev derfor forsynet med bittesmå kugler af bismutvanadat. Sådanne kugler dannes i en varm atmosfære af bismut og en

flygtig vanadiumoxid-forbindelse. Første forsøg viste, at de nubrede nanosøjler fortrinsvis absorberede blå lys og derved genererede frie elektroner. Får et vandmolekyle kontakt med en søjle, hvor en fri elektron opholder sig, vil vandmolekylet spaltes i ilt og brint.

Kilde: Joaquin Resaco et al., TiO₂/BiVO₄ Nanowire Heterostructure Photoanodes Based on Type II Band Alignment, *ACS Central Science* **2016**, 2 (2), 80-88; <http://dx.doi.org/10.1021/acscentsci.5b00402>.

Extragalaktisk gammapulsar

ASTRONOMI. Pulsarer er hurtigt roterende, stærkt magnetiserede neutronstjerner. De opstår ved det gravitationelle kollaps af meget tunge stjerner. Den første pulsar blev opdaget i 1967, hvor det regelmæssige radiosignal gav anledning til mange spekulationer. På nuværende tidspunkt kendes 2500 pulsarer i Mælkevejen plus få i andre galakser.



Med det amerikanske “Fermi Gamma-ray Space Telescope” har man for første gang fundet en pulsar, der udsender gammastråling fra et sted udenfor Mælkevejen. Fermi-teleskopet har indtil videre fundet 160 andre pulsarer. Den nye pulsar befinder sig i “Den Store Magellanske Sky”, som er en satellitgalakse til Mælkevejen, og har fået katalognummer: PSR J0540-6919. En anden pulsar PSR J0537-6910 befinder sig tæt på (se billede), men opfører sig helt anderledes. Sidstnævnte pulsar udsender ikke gammastråling, og energitabet på grund af rotationen er tre gange større.

Kilde: The Fermi LAT Collaboration, An extremely bright gamma-ray pulsar in the Large Magellanic Cloud, *Science* **350**, 801-805, 2015; <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac7400>.

Hvor er Breddeopgaverne?

Breddeopgave nr. 68 om “Bohrs atommodel” måtte desværre udskydes til næste nummer på grund af pladsmangel.

At bringe en bemanded rumkapsel til sikker landing

Af Mads Stenfatt, Copenhagen Suborbitals

Om få måneder skal Copenhagen Suborbitals sende to raketter, Nexø I & II, til himmels. De to raketter er vores næste skridt imod målet om at sende en bemanded raket ud i rummet, og bringe astronauten sikkert tilbage igen. I processen om at sikre en sikker og behagelig landing for astronauten, arbejder vi på at udvikle et faldskærmssystem der kan gøre at landingshastigheden ikke bliver for høj, og at åbningsforløbet bliver blidest muligt. For at gøre det, skal vi kende de præcise parametre der beskriver det faldskærmssystem vi udvikler, deriblandt en parameter kaldet C_d , dragkoefficienten, for hver type faldskærm vi benytter.

Hvem er Copenhagen Suborbitals?

Copenhagen Suborbitals (CS) [1, 2] er en dansk forening af 50 frivillige personer, som er verdens eneste amatørprojekt af sin art, og som er crowdfunded af knap 1000 faste støttemedlemmer over hele verden. CS' ultimative mål er at udvikle en raket med rumkapsel, som kan bringe en person 100 km op over Jordens overflade og sikkert ned igen.

Der arbejdes frem mod dette mål gradvist ved at bygge ubemandede raketter for at opbygge viden og færdigheder til at kunne konstruere den endelige raket.



Figur 1. Andreas Mogensen sidder i "Cupola", ombord på Den Internationale Rumstation, med en hilsen til CS. Foto: Kjell Lindgren.

Siden CS startede i 2008 har vi opsendt en række raketter fra en selvsejlende affyringsplatform i farvandet øst for Bornholm, se [3, 4].

Projektet har politiale til, baseret på private donationer, at markere Danmark som den 4. nation, der bringer en person i rummet (efter Rusland, USA og Kina).

Faldskærmssystemet

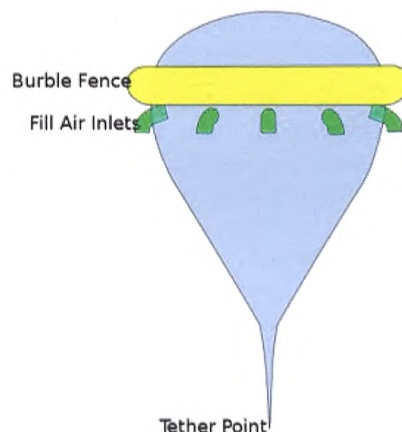
Denne artikel vil fokusere på det, der sker på vej ned, altså faldskærmssystemet.

Når vi i sidste ende skal sende en astronaut op med vores bemandede raket, Spica, ønsker vi at lave et faldskærmssystem, der både kan klare en tur igennem atmosfæren, som ikke udsætter rumkapslen for voldsomme belastninger og som i sidste ende sikrer en blid landing for astronauten. Vi skal derfor lave et system, der kan stabilisere rumkapslen og reducere faldhastigheden tidligt, tåle høje hastigheder og temperaturer i

den øverste del af atmosfæren, og som i sidste ende giver en hastighed på cirka 25 km/t ved landing.

For at opnå disse egenskaber har vi tænkt os at dele systemet op i to: Første del er en bremsende og stabiliserende del til den øvre del af atmosfæren, en såkaldt ballute. Til den nederste del af turen og landing benytter vi en (eller flere) mere almindelige faldskærm(e).

Balluten har sit navn efter kombinationen af de to former, den er designet efter: Balloon og parachute. På dansk kunne den passende hedde en "balskærm".



Figur 2. Principtegning af en ballute: Der er grundformen, som er ballonformet og helt lufttæt, så er der en række luftindtag rundt om, hvor luften puster formen op, og til sidst er der et "burble fence", som er en design-feature, der gør balluten mere stabil. Grafik: Wikipedia.

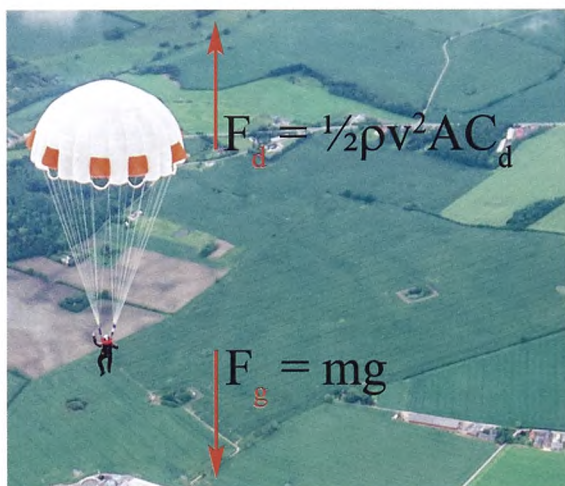
Balluten blev designet i 1960'erne med det specifikke formål at være et bremsende aggregat, der var stabilt i tynd luft og ved meget høje hastigheder (formen er testet brugbar ved hastigheder op til mach 10).

De primære kræfter

Ethvert legeme der falder lodret igennem atmosfæren på Jorden vil være påvirket af to modsatrettede kræfter: Den første er tyngdekraften, $F_g = mg$ hvor m er massen af legemet og g er tyngdeaccelerationen. Den anden kraft er vindmodstanden, $F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 AC_d$, hvor ρ er tætheden af atmosfæren, v er faldhastigheden, A er frontarealet, dvs. det areal der møder luften. Til sidst har vi C_d som er dragkoefficienten; en parameter der beskriver hvor aerodynamisk en given form er i luften og dermed hvor meget modstand selve formen giver [5].

Sættes de to kræfter sammen får man den resulterende kraft,

$$F_{\text{net}} = F_g - F_d = mg - \frac{1}{2}\rho v^2 AC_d. \quad (1)$$



Figur 3. CS tester de to modsatrettede kræfter ved Odense Lufthavn. Foto: Sanjin Vujanovic.

Dragkoefficienten er størrelsesuafhængig, og beskriver, sammen med arealet, den samlede faktor for vindmodstanden, som et objekt giver i en given højde.

Når vi skal designe vores system, er de fleste af parametrene for faldskærmene kendte, eller en del af de ting man direkte kan designe. Massen af rumkapslen bliver givet til os ud fra, hvad vi kan formå at bygge. Vi kender lufttætheden i de forskellige højder i atmosfæren, og har en standardatmosfære vi kan arbejde med i vores modeller. En standardatmosfære er en model, der definerer de forskellige værdier for tryk, lufttæthed, temperatur og meget mere, som funktion af højden (se mere i [6]). Hastighederne definerer vi selv, ud fra de ønsker vi har til, hvordan systemet skal fungere. Tilbage er så kun at finde dragkoefficienten og den nødvendige størrelse på faldskærm og ballute, der skal til for at opnå de ønskede hastigheder.

Hvis man er interesseret i, hvordan man kan arbejde med faldskærme i undervisningsregi kan man eksempelvis kigge i Syddansk Universitets materiale, "Faldskærm i fart" [7].

Design af balluten

Vi har som udgangspunkt til vores ballutedesign brugt det fotomateriale, der har været til rådighed af de oprindelige balluter. Det medførte en lille model som vi testede tidligt i 2014, med henblik på en opsendelse af HEAT 2X (en raket der desværre brændte under en motortest på Refshaleøen i København). Testen i 2014, foretaget hos Copenhagen Air Experience, viste, at vores design havde en C_d på 0,6, hvilket matcher lærebøgerne for det design vi kopierede.

Faldskærmen, der skal åbnes efter balluten, er designet til at åbne ved en hastighed på cirka 200 km/t, hvilket altså er grænsen vi ønsker at holde os indenfor i 3 km's højde med en raket på 135 kg. Vi skal nu finde størrelsen af balluten, der vil opfylde denne betingelse, så derfor omskriver vi den resulterende kraft:

$$F_{\text{net}} = mg - \frac{1}{2}\rho v^2 AC_d \Leftrightarrow A = \frac{2mg}{\rho v^2 C_d}. \quad (2)$$

Ved at indsætte de relevante værdier får vi

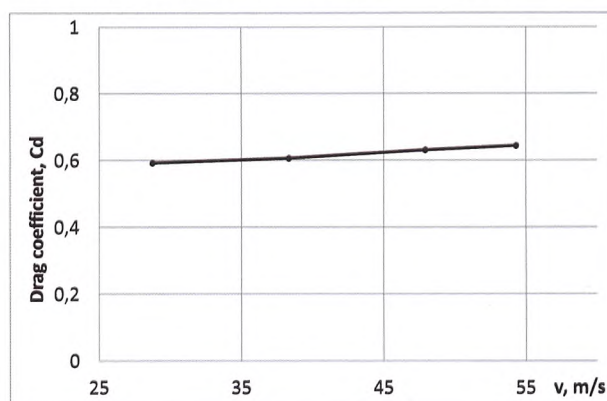
$$A = \frac{2 \cdot 135 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{0,909 \text{ kg/m}^3 \cdot (56 \text{ m/s})^2 \cdot 0,6} = 1,59 \text{ m}^2. \quad (3)$$

Her skal vi stoppe op og huske en vigtig detalje: Raketten/rumkapslen har også i sig selv et bremsende areal, men for nuværende er det endelige design på den front ikke kendt, hvorfor vi i denne omgang ser bort fra det bidrag. Den resulterende størrelse for balluten bliver dermed et konservativt estimat. Produktionstekniske årsager gjorde, at vi endte med en ballute med et areal på 1,65 m², og en højde på knap 2 meter i oppustet udgave.



Figur 4. Balluten til Nexø I som den endte med at tage sig ud. Foto: Jev Olsen.

Efter produktionen af den første ballute i fuld størrelse blev det tid til at teste den i vindtunnelen, og se hvordan den opførte sig i forhold til forudsigelserne. Hos "Copenhagen Air Experience" monterede vi en trækmåler i et gitter i bunden af deres vindtunnel. Denne måler brugte vi til at registrere hvor stort træk balluten udførte ved de forskellige vindhastigheder. Se figur 5. Det var ikke muligt at få brugbare resultater for vindhastigheder under 28 m/s og over 54 m/s.



Figur 5. De målte værdier for C_d som funktion af hastighed.

Dragkoefficienten for Nexø I-balluten blev, for det hastighedsområde vi forventer at operere i, målt til $C_d = 0,64$. Som nævnt tidligere, var C_d for den lille ballute fra 2014 målt til 0,6.

Terminalhastigheden, altså den hastighed raketten får på vej ned, når de to modsatrettede kræfter er lig hinanden, findes ved at isolere v :

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho AC_d}} \quad (4)$$

Indsætter vi de kendte værdier for Nexø I-raketten, og forudsætter at hastigheden er opnået i 3000 meters højde, får vi følgende resultatet:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 135 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{0,909122 \cdot \text{kg/m}^3 \cdot 1,65 \text{ m}^2 \cdot 0,64}} = 53 \text{ m/s}, \quad (5)$$

hvor vi kan lægge en endnu ukendt hastighedsreduktion fra vindmodstanden på raketten oveni. Vi kan dermed

se frem til en faldhastighed, forinden hovedskærmen åbnes, som er under vores ønskede grænse på 56 m/s.

Hovedfaldskærmene

Til Nexø-raketterne har vi købt to C9-faldskærme. Det er faldskærme, der reelt er designet som nødfaldskærme til personbrug. Men da vi havde mulighed for at købe dem billigt, valgte vi på dette tidspunkt i vores udviklingsproces at benytte disse, for at kunne teste det samlede system. På et senere tidspunkt bliver vi nødt til at sy eller købe nogle, der er mere korrekt designet til vores langsigtede mål.

En af de vigtigste ting ved designet af faldskærmssystemet er, at man kan kontrollere selve åbningsforløbet af faldskærmene. Det vil sige, at vi ønsker at have kontrol over, hvor hurtigt faldskærmene folder sig ud, så de ikke bremser for hårdt op for hurtigt. Sker det, er der nemlig risiko for skader på faldskærmen, og dermed i sidste ende også på rumkapslen og astronauten!



Figur 6. T.v.: Vores testspringer, Ahmad Rahman, fra "CenterJump", forlader flyet med vores faldskærm ved en af de mange tests. T.h.: Mads Stenfatt holder øje med faldskærmens udfoldelse under et af testspringene. Fotos: Sanjin Vujanovic.

Vi designede derfor et såkaldt reefingsystem, der skal sikre at hovedfaldskærmen ikke folder sig helt ud med det samme. Reefingsystemet består i al sin enkelthed af en line, der er bundet sammen i bunden af faldskærmen, og som sikrer at den ikke kan folde sig helt ud lige efter at faldskærmen er kommet ud (se figur 7).



Figur 7. Vores hovedskærm i reefed tilstand. En line holder den delvist tillukket i bunden, så den ikke er foldet helt ud. Foto: Ahmad Rahman.

Denne line klipper vi så over efter et forudbestemt tidsinterval. Typisk vil faldskærmen have stabiliseret sin fart i løbet af 10-12 sekunder efter åbning, og vi

har derfor valgt at linen bliver klippet over efter 15 sekunder, for at sikre at vi ikke folder faldskærmen helt ud inden den er kommet ordentligt ned i fart.

Vi har ved flere lejligheder haft mulighed for at teste hovedfaldskærmen ved faldskærmsklubben "CenterJump", hvor vi lod en springer hoppe ud over Odense Lufthavn i Beldringe. Det primære vi ville teste var selve reefingsystemet, men vi udnyttede også muligheden for at måle springerens faldhastighed hele vejen ned, så vi kan danne os et overblik over den forventede faldhastighed for Nexø-raketterne. Vi kunne konstatere, at han i 2300 meters højde faldt med 14,9 m/s med sine 100 kg, mens faldhastigheden ved fuldt bærende skærm var 7,6 m/s i 1850 meters højde.

Som det ses af figur 7 og 8, er faldskærmen ikke perfekt rund i bunden, hverken i reefed eller helt åben tilstand. Der er folder der går ud mellem hvert linesæt. Det har derfor ikke været muligt for os at få en eksakt beregning på arealet af faldskærmen, og dermed dragkoefficienten. Det forhindrer os ikke i at slå de to parametre sammen, når nu vi ikke skal skalere faldskærmens størrelse til andre formål, og vi kan derfor regne videre på faldskærmens opførsel, så længe vi ikke ændrer på længden af reefinglinen.



Figur 8. Vores hovedskærm fuldt udfoldet efter at linen er blevet klippet over. I bunden af skærmen kan man lige ane den ene af de to bokse, der indeholder timer og klippemekanismen. Foto: Ahmad Rahman.

Ved at omskrive formelen $F_g = F_d$ kan vi beregne den samlede effekt af areal og dragkoefficient:

$$AC_d = \frac{2mg}{\rho v^2}. \quad (6)$$

Vi kan nu indsætte værdier målt i de to højder: I 2300 m, reefed faldskærm:

$$AC_d = \frac{2 \cdot 100 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{0,976481 \text{ kg/m}^3 \cdot (14,9 \text{ m/s})^2} = 9,1 \text{ m}^2. \quad (7)$$

For 1850 m, fuldt åben faldskærm:

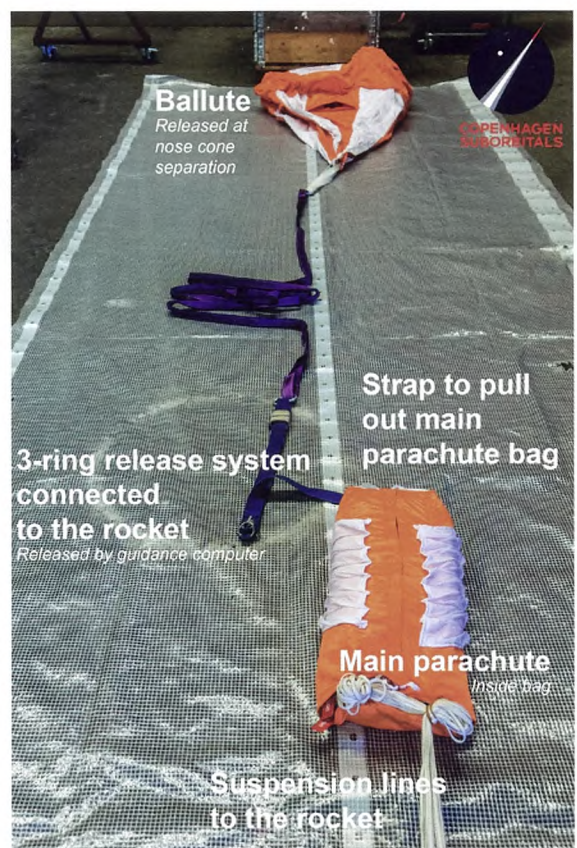
$$AC_d = \frac{2 \cdot 100 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2}{1,02176 \text{ kg/m}^3 \cdot (7,6 \text{ m/s})^2} = 33,3 \text{ m}^2. \quad (8)$$

Det samlede faldskærmssystem

Vi har således data på plads for både ballute og faldskærm, og kan estimere deres faldhastigheder ned igennem atmosfæren.

For lige at opsummere: Målet er, at den bemandede rumkapsel skal falde fra sit toppunkt over 100 km oppe. I toppunktet udløses balluten, som vil stabilisere og bremse kapslen indtil den er i 4 km's højde, hvor vi så vil udløse hovedfaldskærmen, som åbner i to trin, for at gøre overgangen så blid som mulig.

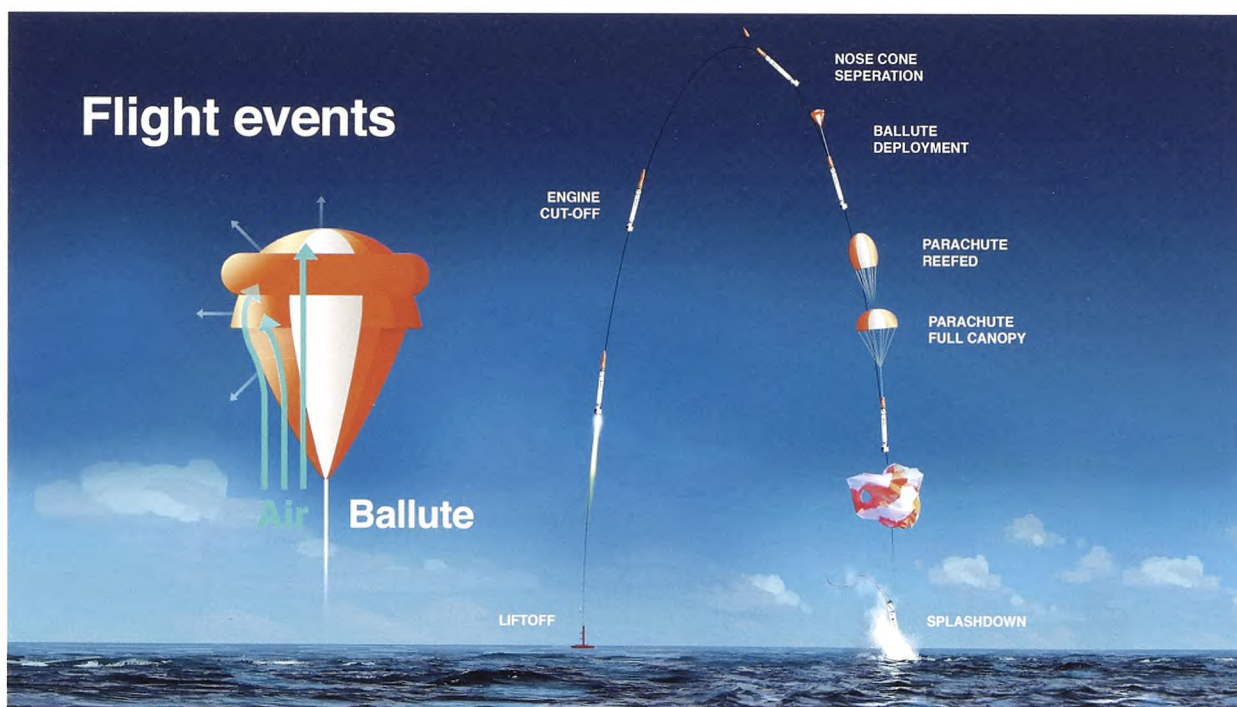
På Nexø-raketterne øver vi os for første gang på hele denne proces. Det forventes at Nexø I kommer op i ca. 6,5 km's højde, mens Nexø II ikke kommer over 20 km.



Figur 9. Det samlede faldskærmssystem, som det skal monteres i Nexø I. Foto: Mads Stenfatt.

Numeriske beregninger

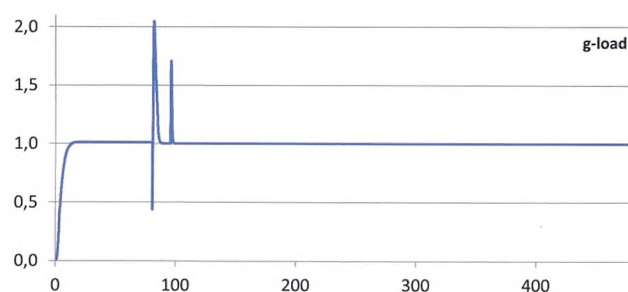
Med tallene på plads for både ballute og faldskærm, er det nu på tide at kigge på, hvordan det samlede system vil opføre sig, når vi om kort tid sætter det fri i den virkelige verden.



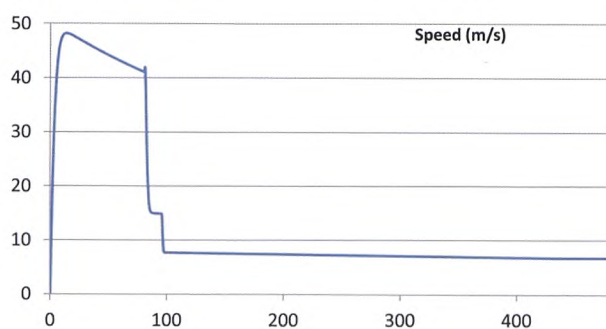
Figur 10. De forskellige hændelser som Nexø-raketterne gennemgår. Grafik: Jonas Linell.

Vi har lavet en model, der numerisk beregner raketens tur ned igen, efter at motoren har bragt den op til sit toppunkt. Dette gøres i princippet blot ved at køre beregningen for F_{net} gentagne gange med de relevante parametre som udgangspunkt. Det er vores forventning, at raketten når 6,5 km op og at den i toppunktet, tømt for brændstof, vil veje 135 kg.

Undervejs i modellen laver vi nogle finter, hvor vi ændrer på areal og dragkoefficient, når vi skifter fra ballute til faldskærmen i reefed tilstand og igen når faldskærmen folder sig helt ud. Vi har også nu tilføjet en antagelse om raketens areal, svarende til at den hænger lodret, og præsenterer sit bundareal for vinden.

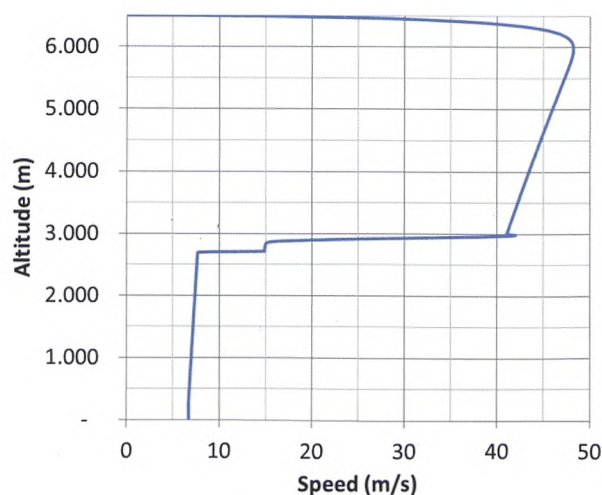


Figur 12. G-load som en virtuel astronaut ville opleve, hvis han var ombord i Nexø I. Bemærk det kortvarige dyk, mens raketten har givet slip på Balluten og venter på at faldskærmen folder sig ud.



Figur 11. Fart som funktion af tiden i sekunder. Bemærk at farten aftager som funktion af højden, idet atmosfærens tæthed stiger på vej ned.

Ved et pænt frit fald fra sit toppunkt 6,5 km oppe, vil Nexø I komme op på godt 50 m/s inden farten aftager på grund den tættere atmosfære. Efter cirka 80 sekunders fald med balluten er raketten nået til 3 km, hvor farten vil være nået ned til omkring 41 m/s eller omkring 150 km/t. På det tidspunkt giver raketten slip på balluten, som samtidig trækker hovedfaldskærmen ud. I det øjeblik er der kortvarigt ikke noget, der trækker i raketten, og den går derfor i frit fald igen.



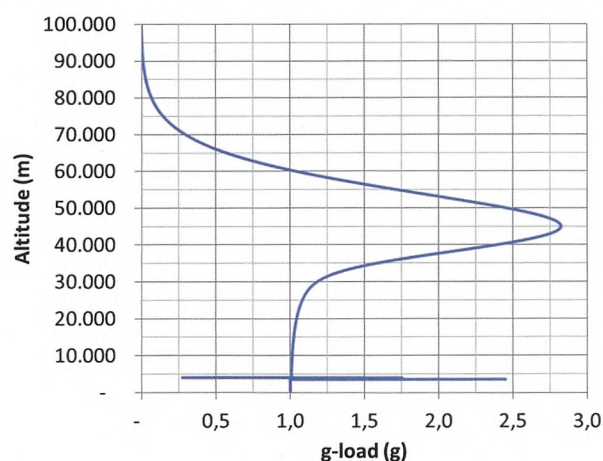
Figur 13. Illustration af farten ned igennem atmosfæren. For Nexø I har vi besluttet, at hovedskærmen udløses i 3 km højde for at give både ballute og faldskærm tid til at stabilisere sig, så vi får målt mest muligt på begge emner.

Det holder dog kun indtil faldskærmen begynder at folde sig ud og bremser raketten yderligere op til ca. 14 m/s. Denne opbremsning vil give en belastning på godt 2G, for en virtuel astronaut der måtte befinde sig i raketten. 15 sekunder senere bliver reefingsnoren klippet over, og raketten vil blive bremset ned til sin landingshastighed, som vil være på omkring 7 m/s (se figur 13).

Den videre udvikling

Mange udfordringer udestår stadig, i forhold til når vi skal skalere op til de bemandede Spicarakterer. På materialesiden skal vi have fundet en stoftype, som er lufttæt nok, og som er varmebestandig, idet vi forventer, at balluten kortvarigt vil blive udsat for temperaturer på omkring 400 grader. Derudover skal den numeriske model fintunes til at tage højde for en dragkoefficient, der ændrer sig som funktion af farten. Vi arbejder også på at kunne beregne nedslagsstedet for rumkapslen, med basis i de tilgængelige vejrudsigter der findes. Ved vores opsendelse med Sapphire, og under de foreløbige faldskærmstests har vi set gode tendenser i forhold til at kunne forudsige nedslagspunktet, men det kan der skrives en helt anden artikel om.

Vi kan dog allerede nu – for sjov skyld – forestille os turen ned fra 100 km for den bemandede rumkapsel, hvis vi modificerer vores antagelser lidt: Med konstant C_d , dobbelt størrelse ballute og tre hovedfaldskærme, der skal bære en rumkapsel på 350 kg, kunne turen se således ud, hvis man måler på g-load for astronauten:



Figur 14. Illustration af de g-kræfter som en astronaut kunne opleve dem i vores Spica-raket.

En tur igennem atmosfæren i vores bemandede rumkapsel vil medføre en hård opbremsning i omkring 40 km's højde, hvor kapslen møder atmosfæren med en fart på omkring 3.200 km/t. Ovenstående graf illustrerer også, hvorfor det er, at man venter til en relativt lav højde med at åbne faldskærmene – rumkapslen er simpelthen stadig ved at bremse op! Det er så derfor, at vi venter til 4 km's højde med at åbne de tre hovedskærme, som vil bremse astronauten yderligere ned til en behagelig landingshastighed på 6 m/s. Tilbage er blot for astronauten at læne sig tilbage i sit sæde og vente på at lande i vandet igen, 15 minutter efter at have været nået over de magiske 100 km, og dermed gjort Danmark til den 4. nation, der har sendt en (amatør)astronaut ud i rummet.

Læs mere om Copenhagen Suborbitals på www.CopSub.com [1]. Vores daglige fremskridt kan endvidere følges på vores blog [8], hvor vi jævnligt skriver om store og små fremskridt og tests eller spørger vores læsere til råds, omkring de problemstillinger vi står overfor.

Litteratur

- [1] Copenhagen Suborbitals: www.CopSub.com
- [2] CS fotoarkiv: <http://picasaweb.google.com/copsub>
- [3] Nexø faldskærmsvideoer: <http://bit.ly/1RLIOey>
- [4] Blog med video: <http://bit.ly/1KjcVSv>
- [5] Dragkoefficient: https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient
- [6] Standard atmosfære: http://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d_604.html
- [7] Faldskærm i fart, undervisningshæfte fra Syddansk Universitet: <http://bit.ly/1KjcTdi>
- [8] Blog på Ingeniørens hjemmeside, <http://ing.dk/blogs/rumfart-pa-den-anden-made>



Mads Stenfatt har siden 2011 været medlem af Copenhagen Suborbitals, og er i dag ansvarlig for udviklingen af faldskærmssystemerne til den bemandede rumkapsel. Han springer derudover også faldskærm i sin fritid.

PFEIFFER VACUUM

ACP Dry Pump



**Olje- og partikelfri
Flertrins Roots teknologi**

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Emmy Noether og fysikkens bevarelseslove

Af Else Høyrup

Ligesom alle fysikere kender navnet Albert Einstein, kender alle matematikere navnet Emmy Noether. Men at Noether også var en stor teoretisk fysiker, kommer nok som en overraskelse for mange matematikere og en del fysikere. Amalie Emmy Noether (1882-1935) var en tysk matematiker og fysiker, som revolutionerede den matematiske disciplin algebra i sin levetid. Hun var hovedkraften bag skabelsen af den abstrakte algebra. Men nu, mange år efter hendes død, betragtes hun også blandt mange fysikere som en person, der revolutionerede fysikkens grundlag. Det er især partikelfysikere, som er blevet begejstrede over Noethers resultater.

En kvindelig pioner i matematisk fysik

Emmy Noether var både matematiker og matematisk fysiker. I sin levetid blev hun mest kendt som matematiker, men i dag er der også kommet stor interesse for hendes resultater blandt fysikere.



Figur 1. Emmy Noether som ung.

Interessant nok har det netop været hendes abstrakte og generelle arbejdsmåde i algebra, der har fået så stor betydning i fysikken i dag, fordi hendes resultater har været så righoldige, at de har kunnet anvendes på en lang række centrale områder af fysikken. Denne artikel vil prøve at belyse baggrunden for Emmy Noethers resultater i fysik og matematik, med særlig vægt på fysikken.

I 1918 fik hun publiceret to fysikartikler. Her fandt hun frem til nogle generelle lovmæssigheder vedrørende sammenhængen mellem symmetrier og bevarelseslove i fysikken. Hun beviste to sætninger og deres omvendte, og i dag kaldes disses sætninger kollektivt for "Noethers sætning". Her løste hun bl.a. et problem vedrørende manglende lokal energibevarelse i den generelle relativitetsteori. I 1915 var Noether blevet inviteret til Göttingen, dengang matematikkens Mekka, for at løse netop dette problem. Hverken Einstein eller de to Göttingen-matematikere, som havde givet hende opgaven, nemlig David Hilbert og Felix Klein, havde selv kunnet løse problemet.

Biografi¹

I begyndelsen af 1900-tallet, da Emmy Noether var ung, var de tyske universiteter lukket for kvinder, men de blev åbnet i de enkelte tyske delstater en efter en i løbet af Noethers levetid. I Danmark blev universitetet

åbnet for kvinder i 1875. Skønt Noethers egen far, Max Noether (1844-1921), var professor i matematik i Erlangen, kunne hun i starten ikke engang overvære forelæsninger i Erlangen.

Selv om hun fik mulighed for at blive professionel matematiker senere og fik meget anerkendelse i matematikerkredse, fik hun aldrig et regulært job i Tyskland. Sandsynligvis fordi hun både var kvinde og jøde. Jøder blev også diskrimineret i Tyskland dengang, men da nogle jøder jo blev professorer, herunder både Noethers far og hendes bror, Fritz Noether (1884-1941), som blev matematisk fysiker, var det nok i sidste instans, fordi hun var kvinde, at hun ikke fik et regulært job.

Hendes jobsituation var så vanskelig, at hun i mange år ikke modtog nogen løn overhovedet. For at give hende chancen for at bruge sine evner i matematikundervisning, annoncerede den store matematiker David Hilbert (1862-1943) forelæsninger i sit navn, "med assistance fra frk. Noether".

Hilbert gjorde, hvad han kunne for at skaffe Noether et regulært job, eller bare et betalt job, ved Göttingen Universitet. Første gang var i 1915, hvor han imidlertid mødte skarp modstand fra universitetets humanister: filologerne og filosofferne. I modsætning til matematikere, som var tilhængere af kvinder på universitetet, i hvert fald én af Noethers format, argumenterede humanisterne imod kvinder generelt. Hilberts modargument var den berømte sætning: "Aber die Universität ist doch keine Badeanstalt!"

Men det hjalp ikke. I 1915 var 1. Verdenskrig lige brudt ud, og humanisternes argument var, at hvis man tillod kvinder at undervise ved universitetet, så ville de blive konkurrenter til de mandlige soldater, når de engang vendte hjem fra krigen. Der var også mange mænd, der anså, at det ville være ydmygende for mænd at blive undervist af en kvinde.

Som nævnt i indledningen, og som vi skal se i afsnittet om Emmy Noethers fysik, så hjalp hendes resultater i 1918 David Hilbert og den anden store matematiker i Göttingen, Felix Klein (1849-1925), med matematiske problemer i den generelle relativitetsteori. Noethers resultater var også af stor betydning for Albert

¹Hovedkilden til de biografiske oplysninger er [1].

Einstein (1879-1955). Han arbejdede i Berlin på denne tid. Især hendes artikel, "Invariante Variationsprobleme", rummede betydningsfulde bidrag til matematisk fysik, men det blev først for alvor tydeligt for fysikere længe efter Noethers død. I denne artikel formulerer Noether de sætninger, som senere kollektivt er blevet kaldt "Noethers sætning". Der knytter sig en interessant historie til artiklens offentliggørelse:



Figur 2. Felix Klein (t.v.) og David Hilbert (t.h.).

Felix Klein fremlagde Noethers artikel "Invariante Variationsprobleme" den 16. juli 1918 i *Die Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. Som kvinde havde hun nemlig ikke selv hverken mulighed for medlemskab eller tilstedeværelse. Det var imidlertid ikke noget specielt for Tyskland. Til sammenligning kan man nævne, at skønt det engelske *Royal Society* blev dannet i 1662, blev den første kvinde først valgt ind i 1945. I Frankrig stod det endnu mere grelt til: Deres *Académie des Sciences* var blevet dannet i 1666, men deres første kvinde blev valgt ind så sent som i 1962. Marie Curie blev således aldrig valgt ind på trods af sine to Nobelpriser! Men i Danmark var vi endnu langsommere: *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab* var oprettet i 1742, men først i 1968 blev den første kvinde valgt ind. Da både Hilbert, Klein og Einstein anerkendte Noethers store talent og glimrende resultater, ønskede de alle tre at hjælpe hende til at få i hvert fald et betalt job ved Göttingen Universitet. Især Einstein var imponeret over hendes resultater. I 1919, efter at 1. Verdenskrig var slut, ændredes tiderne i den unge tyske Weimar Republik, og der kom en mere liberal holdning til bl.a. kvinder. Så Klein kunne endelig skaffe Noether, ikke et job, men i det mindste en tilladelse til at undervise ved Göttingen Universitet.

For at opnå retten til at undervise ved et tysk universitet, skulle kandidaten lave en afhandling på højt niveau, svarende til vores doktordisputats. På tysk hedder det "Habilitation", og dette begreb rummer også kravet om, at kandidaten skal give en succesfuld prøveforelæsning. Noether valgte som disputats "Invariante Variationsprobleme".

I 1919 fik hun således endelig retten til at undervise ved Göttingen Universitet. Hendes titel var "Privatdozent", som imidlertid ikke var et job, og som ikke gav nogen løn. I 1922 fik hun titlen "Ausserordentlicher Professor", men den titel indebar stadig ikke nogen løn. Først i 1923 fik hun en "Lehrauftrag", som gav hende

en smule løn for hendes undervisningstimer. Men denne stilling skulle fornys hvert semester.

Men det fantastiske ved Emmy Noether var, at hun trods næsten ingen penge og ingen status formåede at leve et liv, der var tilfredsstillende for hende. Hun bekymrede sig ikke om verdslig rigdom. Den smule penge, hun havde, stammede fra en lille arv. Hun vænnede sig til fattigdommen, som hun klarede ved at leve et meget enkelt liv, hvor hun boede på et billigt pensionat. Hun giftede sig aldrig, og hun fik ingen børn.

Da Hitler kom til magten i 1933, blev Noether og andre jøder fyret fra deres universitetsjob. Hun var oven i købet specielt afskyelig for nazisterne, fordi hun var alt det værste for dem: Hun var jøde, hun var en akademisk kvinde, hun var socialdemokrat, og hun var pacifist.

Så hun blev tvunget til at emigrere, ligesom mange andre tysk-jødiske matematikere og fysikere, herunder som bekendt Albert Einstein. I 1933 skaffede man Noether et gæstprofessorat i USA på Bryn Mawr College i Pennsylvania. Det var et kvindecollage, som havde et fint ry. Her skabte hun en gruppe af entusiastiske tilhængere, denne gang af kvindelige matematikere. Engang om ugen tog hun toget til Princeton University, som lå i nærheden. Her holdt hun forelæsninger om sin matematik på "Institute for Advanced Study". Blandt hendes tilhørere var hendes gamle bekendt, Albert Einstein. Desværre døde Emmy Noether af kræft allerede i 1935, kun 53 år gammel.

I en mindetale, som hendes kollega fra Tyskland og USA, Hermann Weyl (1885-1955), holdt, omtaler han Noethers fine, generøse og uselviske personlighed [2]:

"En stormfuld tid, som [under nazismen] i Göttingen i sommeren 1933, fører folk tæt sammen. Så jeg har levende minder om denne tid. Emmy Noether – hendes mod, hendes åbenhjertighed, hendes ubekymrede holdning til sin egen skæbne, hendes forsonende ånd – var midt i alt det had og al den nedrighed, desperation og sorg, som omgav os, en moralsk trøst."

Noethers matematik: Abstrakt algebra

Emmy Noether skabte en helt ny videnskabelig skole, som blev en af de mest fremragende skoler i matematikken: Den abstrakte algebras skole. Hun var inspireret af David Hilbert, som havde grundlagt den abstrakte skole i matematik generelt. I Noethers hænder blev algebraen ført bort fra tunge, besværlige udregninger over til at operere med abstrakte og generelle begreber som grupper, algebraer, ringe og idealer. Hun beviste vidunderlige sætninger, som fx i 1921 i artiklen "Idealtheorie in Ringbereichen" i *Mathematische Annalen*.

Men man kan ikke måle hendes indflydelse blot ud fra hendes egne publikationer: Hun var meget generøs med at give sine ideer videre til sine studenter og kolleger, og hun var enormt inspirerende. Hvis man vel at mærke kunne følge hendes avancerede tanker. Hun inspirerede også arbejde inden for andre matematiske discipliner, som algebraisk topologi og algebraisk geometri. Hendes arbejdsmåde bestod bl.a. i at

arbejde i et tæt netværk af tilhængere, som blev kaldt "Noether-drengene". Matematik var hendes passion, og den eneste; hun arbejdede konstant med den, og hun var lykkelig med matematikken. Om søndagen gik hun sædvanligvis lange ture på landet med sine Noether-drengene, hvor de udvekslede matematiske ideer. Hun var en stor og sympatisk personlighed.

Hendes kollega og nære ven, den russiske algebraiske topolog Pavel S. Alexandrov (1896-1982), holdt en fin mindetale om hende i 1935 ved et møde i Moskvas Matematiske Forening [4]:

"Den fundamentale karakteristik ved hendes matematiske talent var hendes bestræbelser på at formulere matematiske problemer generelt samt hendes evne til at finde formuleringer, som afslører den grundlæggende logiske natur af spørgsmålet. Hun fjernede enhver tilfældig særegenhed, som komplicerer og skjuler hovedpointen. [...] Det var hende, der lærte os at tænke i simple og generelle algebraiske begreber – homeomorfe afbildninger, grupper og ringe med operatorer, idealer – og ikke i besværlige algebraiske udregninger. Dermed blev vejen åbnet til at finde algebraiske principper på steder, hvor sådanne principper var blevet tilsøret af en eller anden kompliceret situation, som overhovedet ikke var egnet til at blive løst ved hjælp af klassisk algebra."

Skønt Noether foretrak at tænke abstrakt og generelt, så lavede hun slet ikke abstraktioner for abstraktionernes egen skyld, men fordi abstraktionerne i hendes hænder blev mere frugtbare og kunne føre til mange flere anvendelser. Det blev meget betydningsfuldt, både i matematik og fysik.

Den hollandske algebraiker, Bartel Leendert van der Waerden (1903-1996), kom til Göttingen umiddelbart efter sin eksamen. Han blev en af de ivrigste Noether-drengene, og han fik enorm indflydelse på udbredelsen af Noethers ideer og arbejdsmåde til resten af verden (også USA), da han i 1930-31 udgav bogen "Moderne Algebra". Den er kommet på tysk og på engelsk i mange udgaver. Van der Waerdens tobindsværk bygger på Noethers og Emil Artins forelæsninger. Emil Artin (1898-1962) var også tilknyttet gruppen af Noether-drengene. Emmy Noether selv både skrev og forelæste kun for de alldygstige, og hendes matematik og fysik var ikke lettilgængelig. Så populariseringen og udbredelsen af Noether-skolens resultater og metoder via van der Waerden's bøger var meget betydningsfuld.

Van der Waerden var en af dem, der skrev en lang, fin nekrolog over Emmy Noether efter hendes død i 1935. Hans nekrolog kom i det indflydelsesrige tidsskrift *Mathematische Annalen*, et tidsskrift, som Noether selv havde bidraget meget til som (uofficiel!) redaktør. Vi må her tænke på, at i 1935 var der nazisme i Tyskland, og Emmy Noether var jøde og havde derfor måttet emigrere. Så det var modigt af van der Waerden at skrive en lang, fin nekrolog over hende i 1935. Han

skrev bl.a. [6]:

"Hendes arbejde blev styret af et grundprincip, der kan beskrives som følger: Alle relationer mellem tal, funktioner og operationer bliver først gennemskuelige, generelt anvendelige og fuldt ud produktive, efter at relationerne er blevet isoleret fra deres specifikke objekter, og efter at de er blevet formuleret som universelt gyldige begreber. Hendes originalitet lå i den fundamentale struktur af hendes kreative hjerner, i hendes måde at tænke på og i målet for hendes bestræbelser. Hendes mål var styret specifikt mod videnskabelig indsigt."

Noethers matematik er blevet mere og mere betydningsfuld for den moderne fysik, også i dag, mange år efter hendes død. Det gælder både den matematik, som hun selv skabte, og den matematik, som hun anvendte. Hun var specialist i grupper, symmetri grupper, Lie-grupper, Lie-algebraer, variationsregning, tensorer, Lagrangian og meget mere. Alle disse begreber optræder hyppigt i teoretisk fysik i dag.

Fysik: Problemer med energibevarelse

Som tidligere nævnt, inviterede matematikerne David Hilbert og Felix Klein i 1915 Emmy Noether til det berømte Göttingen Universitet i Tyskland. Hilbert og Klein arbejdede med Einsteins generelle relativitetsteori, og Hilbert konkurrerede med Einstein om at finde feltligningerne. Begge disse matematikere og Einstein selv var imidlertid stødt på et paradoks: Under den generelle relativitetsteori var der tilsyneladende ingen lokal energibevarelse. Under den specielle relativitetsteori var der derimod både lokal og generel energibevarelse. Emmy Noether blev inviteret til Göttingen for at hjælpe de tre involverede med at løse deres problem, fordi hun allerede på det tidspunkt var berømt for sit arbejde med invarianter.

Hun løste det konkrete problem hurtigt og elegant, og oven i dette lavede hun yderligere generaliseringer. Hendes artikel om emnet hedder som tidligere nævnt "Invariante Variationsprobleme", og den udkom i 1918 [7]. Hun havde faktisk lavet endnu en artikel om et beslægtet emne i matematisk fysik: Den hedder "Invarianten beliebig Differentialausdrücke". Den kom også i 1918 [9], men før den ovenfor omtalte artikel. Den var mere matematisk, mens "Invariante Variationsprobleme" var mere fysisk.

Både Hilbert, Klein og Einstein blev begejstrede for Noethers artikler. Især Einstein var meget imponeret over hendes resultater, og i maj 1918 skrev han til Hilbert efter at have læst Noethers første artikel om matematisk fysik [10]:

"I går modtog jeg fra frk. Noether en meget interessant artikel om invarianter. Jeg er imponeret over, at sådanne ting kan forstås på så generel en måde. Det vil ikke kunne skade de tyske soldater, som vender hjem fra skyttegravene [die "Feldgrauen"], at blive sendt i skole hos frk. Noether! Hun kan virkelig sit stof!"

Noethers nu berømte fysikartikel “Invariant Variationsprobleme” handler om problemer, som hun løser ved hjælp af variationsregning med differentielle invarianter. Variationsregningen opererer med mindstevirkningsprincippet. Hun bruger bl.a. Lie-grupper og Lie-algebraer samt Lagrangske metoder til sine beregninger af virkningen S (eng. action), som er tidsintegralet af Lagrange-funktionen. Som noget nyt lagde hun også afgørende vægt på symmetrigrupper i fysikken. Som nævnt i indledningen, beviser hun to sætninger og deres omvendte, og tilsammen kaldes disse fire sætninger kollektivt for “Noether-sætningen”. Nogle gange omtales de imidlertid som “Noethers 1. og 2. sætning”.

Noether beskæftiger sig med grupper af kontinuerlige koordinattransformationer med kontinuerle afledede. De er Lie-grupper.

Lad os nu dele Noethers sætning op i sætning 1 og sætning 2, og lad os se, hvilken rolle de havde mht. relativitetsteorien:

- Noethers sætning 1 handler bl.a. om den specielle relativitetsteori: Her er symmetrigruppen Lie-gruppen af Lorentz-transformationer, kaldet Poincaré-gruppen.
- Noethers sætning 2 handler bl.a. om den generelle relativitetsteori: Her er symmetrigruppen en meget større Lie-gruppe, som Noether kalder en “uendelig kontinuert gruppe”.

Ovenstående korte, matematiske beskrivelse af Noethers to sætninger er inspireret af [11]. Fysisk set drejer Noethers sætninger sig overordnet om *den fundamentale forbindelse mellem symmetrier, invarianser og bevarelseslove*, som hun var den første til at se klart. Hendes abstrakte og generelle arbejdsmetode overførte hun fra sin matematik til fysikken. Det blev så frugtbart, at hendes sætninger giver en guldgrube af konkrete resultater. Af hendes sætninger kan man bl.a. udlede de fire love vist i boksen.

Bevarelseslove fra Noethers sætninger

- Tidstranslationsinvarians medfører energibevarelse
- Rumtranslationsinvarians medfører bevarelse af impulsen (bevægelsesmængden)
- Rotationsinvarians (isotropi) medfører bevarelse af impulsmomentet
- Gaugeinvarians af Maxwells elektromagnetiske ligninger medfører ladningsbevarelse

Tidsinvarians og ruminvarians er absolut fundamentale for videnskabelig tænkning, fordi de garanterer, at et eksperiment, som bliver gjort på et andet tidspunkt eller på et andet sted, vil give de samme resultater. Uden det ville al videnskab og videnskabelig teori være svært!

I dag har man indført en ny definition af energi, impuls og impulsmoment ud fra ovenstående punkt 1-3. Fx mht. *energi*, så *definerer* man den nu som den tilhørende bevarede størrelse i punkt 1. Det gælder både for klassisk mekanik, relativitetsteori og kvantemekanik.

Noethers resultater udgør en hovedhjørnesten i den moderne teoretiske fysiks grundlag. Hendes resultater har også vist sig at være centrale for områder af fysikken, som er udviklet efter 1918 og efter hendes levetid, specielt partikelfysikken.

Fysikprofessor Jeppe Dyre fra RUC siger: “Noethers sætning er det smukkeste og mest centrale resultat i fysikken!”

Den tyrkisk-amerikanske fysiker Feza Gürsey (1921-1992) skrev følgende i 1983 [5]: “Noethers arbejde er af den allerstørste betydning for fysik og for fortolkningen af fysikkens grundlæggende love udtrykt i begreber fra gruppeteorien.”

Gåden: Hvorfor blev Noether ikke anerkendt som fysiker i sin levetid?

Emmy Noether lagde ikke selv så meget vægt på sine to fysikartikler og deres betydning. Hun betragtede dem som ungdomsværker, der adskilte sig fra resten af hendes arbejde, som faldt indenfor den abstrakte algebra. Hun blev også i sin samtid hovedsageligt anset for at være matematiker, men en stor matematiker. I tiden omkring 1918 fik hun imidlertid meget anerkendelse for sin fysik, men så kommer gåden: Når mange fysikere, specielt partikelfysikere, i vore dage anser hendes fysik for noget af det vigtigste i fysikkens grundlag, hvorfor blev hun så næsten ikke citeret af fysikere i de næste 40 år: ca. 1918-1958? Det vil jeg forsøge at belyse, dels ved egne studier, dels ud fra en meget interessant analyse fra den amerikanske partikelfysiker, Nina Byers’ to fine artikler fra 1994 [12] og 1996 [11].

Måske var en af grundene til, at Noether ikke blev citeret særlig meget af fysikere i mange år, at hendes artikler var meget tekniske mht. matematikken, og at artiklerne lå på grænsen mellem matematik og fysik. Måske var hun forud for sin tid, – partikelfysikken var stadig i sin barndom i hendes levetid. Måske blev hun diskrimineret af fysikere pga. sit køn, idet mange fysikere dengang måske havde svært ved at forestille sig, at det var en kvinde, der lavede så fundamentale bidrag til fysikken. Men på den anden side blev hun, i hvert fald fagligt set, ikke kønsdiskrimineret i matematik. Dog var hendes jobsituation som matematiker jo elendig, som beskrevet tidligere.

Men der har nok også været nogle mere specifikke grunde til tavsheden, dels af videnskabssociologisk art, dels af faglig art:

- Felix Klein, som var med til at invitere Noether til Göttingen, var så begejstret for hendes to artikler i 1918, at han skaffede hende en, ganske vist ulønnet, stilling som Privatdozent i 1919. Men han har alligevel skadet hendes ry som fysiker ved i en note at skrive noget, der har kunnet fortolkes som en undervurdering af hendes originalitet, til fordel for hans egen [12]. Måske var det utilsigtet, for han havde jo stor respekt for hende.
- Hermann Weyl (1885-1955), Noethers kollega i Göttingen og i USA, var på den ene side meget begejstret for Noethers arbejde, både som matematiker og fysiker. Det har han bl.a. beskrevet i

sin lange mindetale om hende efter hendes død i 1935 [2]. Men på den anden side var han med til at lægge grunden til, at hendes fysiske arbejder ikke blev direkte citeret i mange år, fordi han i sine to indflydelsesrige bøger af relevans for Noethers fysik, nemlig “Raum, Zeit, Materie – Vorlesungen über Allgemeine Relativitätstheorie”, 1918, og “Gruppentheorie und Quantummechanik”, 1928, *ikke* citerer hende. Det forekommer i dag som lidt af et paradoks, og hvis han havde været mere ærlig over for hendes arbejde i fysik, kunne det være blevet meget mere citeret, også i hendes levetid, og det kunne have gavnet hende i hendes vanskelige jobsituation.

- Der var fysikere, som brugte enkelte dele af hendes resultater, men uden at nævne hendes navn eller hendes artikler.
- I 1924 udkom Richard Courants (1888-1972) og David Hilberts berømte “Grundlagen der Mathematischen Physik” for første gang. Den rummer et kort afsnit om Noethers sætning [12].
- I 1920’erne og 1930’erne var det måske ikke alle fysikere, der forstod, at Noethers sætninger var af så fundamental betydning, som senere tiders fysikere har gjort. Det kan hænge sammen med to ting: Dels havde den generelle relativitetsteori også en lang “latenstid”: ca. 1920-1960. Mange fysikere fandt, at Einsteins 1915 teori var for matematisk, og desuden blev den først for alvor underbygget af observationer og eksperimenter omkring 1960 [13]. Den anden faktor var, at nogle fysikere (fx Niels Bohr) i en periode faktisk var i tvivl om *energibevarelse som et fundamentalt princip*. Det skyldtes bl.a., at energi så ud til at forsvinde i beta-henfald. Det problem blev løst teoretisk af Wolfgang Pauli (1900-1958), som i 1930 indførte en ny partikel, *neutrinoen*.

Men hvorfor og hvornår begyndte fysikere så at tro på energibevarelse som et fundamentalt princip? Og hvorfor og hvornår begyndte fysikere at betragte Noethers resultater som fundamentale?

- I 1956 opnåede man en definitiv eksperimentel verifikation af energibevarelse i beta-henfald. Eksperimentalfysikerne Clyde Cowan (1919-1974) og Frederick Reines (1918-1998) fandt nemlig direkte elektronneutrinoen ved det, der kaldes “neutrinoeksperimentet”. Det udløste en nobelpris i fysik til Frederick Reines, men først næsten 40 år senere, i 1995. Da var Cowan allerede død.
- I mange år efter 1918 havde fysikere anvendt en Hamiltonsk formulering i stedet for en Lagrangsk formulering i kvantemekanikken, mens Noethers indfaldsvinkel var en Lagrangsk formulering. Men i 1950’erne begyndte mange fysikere at anerkende betydningen af Lie-grupper i Lagrangsk formulering i kvantefeltteori, og dermed fik Noethers arbejder og formuleringer en renæssance.

- Siden er det gået stærkt med at anerkende Noethers og hendes arbejders store betydning for fysikken. Det er dog især blandt partikelfysikere, at Noether i dag er berømt. Det skyldes nok, at netop symmetrier og bevarelseslove er meget centrale i partikelfysikken.

Min kilde, partikelfysikeren Nina Byers, konkluderer angående det, som hun kalder “A Puzzle” [12], “Jeg tror, at mange fysikere med mig vil mene, at Noethers sætninger har spillet en nøglerolle i den teoretiske fysiks udvikling.”

Afslutning

Emmy Noether og hendes arbejde må nok siges at være undtagelser i videnskabshistorien, hvis man tager mænd som norm, for dels mødte hun diskrimination som kvinde, dels mødte hun også diskrimination som fysiker. Men trods dette var hun en tidlig pioner. I fysik er det nok hendes fortjeneste, at *symmetribetragtninger* er blevet så væsentlige i dag.

I dag huskes Emmy Noether på mange måder, og hendes navn bliver knyttet til adskillige fænomener, herunder: Noether-sætningen i fysik og Noetherske ringe i matematik. Også et krater på bagsiden af Månen er opkaldt efter hende: Nöther Krateret. I vore dages matematik- og fysikartikler og lærebøger er der også mange henvisninger til hendes bidrag.



Figur 3. Emmy Noether på en bådudflugt ved en matematikkongres i 1932.

Højdepunktet af anerkendelse i hendes egen levetid var i 1932 ved Den Internationale Matematikerkongres i Zürich. Her holdt hun som den første kvinde ved en matematikkongres et foredrag i plenum.

Emmy Noether var overordentlig anerkendt som matematiker allerede i sin egen levetid, og man anerkendte fuldt ud betydningen af hendes skole i algebra. Men alligevel var der mislyde, selv blandt de anerkendende matematikere: Hun var en yderst kompetent, hjælpsom, inspirerende og værdsat medredaktør af det vigtige tidsskrift *Mathematische Annalen*. Men hun stod ikke nævnt officielt som medredaktør. Hvorfor ved jeg faktisk ikke, og det kan da godt have givet hende en

lille sorg. Men sin vane tro, blev hun aldrig bitter over de obstruktioner, hun mødte. Hun koncentrerede sig om sin matematik og sine matematiker- og fysikervenner og deres familier.

Nu vil jeg overlade ordet til Einstein, som skrev en fin nekrolog over Emmy Noether i *The New York Times*, den 5. maj 1935 [14]:

“For et par dage siden døde en betydningsfuld matematiker, professor Emmy Noether, som tidligere arbejdede ved Göttingen Universitet, og som de sidste to år arbejdede ved Bryn Mawr College. Hun døde i sit 53. år [...] De fleste menneskers bestræbelser går med kampen for det daglige brød. Men størsteparten af dem, der [...] er befriet for denne kamp, er hovedsageligt optaget af at forbedre deres materielle velstand [...] Under dette ligger der alt for ofte illusionen om, at det er det vigtigste og mest ønskværdige mål [...] Men der er, heldigvis, en lille gruppe mennesker, som tidligt i deres liv opdager, at de smukkeste og mest tilfredsstillende oplevelser [...] ikke kommer udefra, men stammer fra udviklingen af individets egne følelser, tanker og handlinger. De ægte kunstnere, forskere, opfindere og tænkere har altid været mennesker af denne slags. Disse menneskers liv forløber måske tilsyneladende ikke iøjnefaldende, men det er ikke desto mindre frugterne af deres bestræbelser, som er de mest værdifulde bidrag, som en generation kan give videre til den efterfølgende [...] [Emmy Noether var en sådan person].”

Denne artikel udspringer af en kortere, engelsksproget Emmy Noether-biografi på bloggen “Grandma Got STEM” [15], der imidlertid kun omtalte fysikken kort.

Litteratur

- [1] Dick, Auguste (1981), Emmy Noether: 1882-1935. Birkhäuser 1981. [Den autoritative biografi, som indeholder alle de fire, vigtige nekrologer over Noether, alle oversat til engelsk].
- [2] Weyl, Hermann (1935), Emmy Noether. [Nekrolog]. *Scripta Mathematica*, III, 3, (1935), pp. 201-220. Står også i [1]. Link fra [3] til den kortere mindetale fra 26.4.1935.
- [3] O'Connor, John J. and Robertson, Edmund F. (2014), Emmy Noether. Biografi på MacTutor History of Mathematics Archive, University of St. Andrews; <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk>.
- [4] Alexandrov, Pavel S. (1936), Emmy Noether. [Nekrolog]. *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, 2, pp. 254-265. Mindetalen blev holdt på et møde i Moskvas Matematiske Forening, den 5.9.1935. En engelsk oversættelse findes bl.a. i [1] og [5].
- [5] Noether, Emmy (1983), *Gesammelte Abhandlungen/Collected Papers*. Edited and with an introduction by Nathan Jacobson. Springer 1983. [Heri gennemgås ideerne i Noethers artikler, og her skriver Feza Gürsey om Noethers to fysikartikler].
- [6] van der Waerden, Bartel, L. (1935), Emmy Noether. [Nekrolog]. *Mathematische Annalen*, 111, (1935), pp. 469-474. Findes bl.a. på engelsk i [1].
- [7] Noether, Emmy (1918), Invariante Variationsprobleme. *König. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Nachrichten, Math.-phys. Klasse*, 1918, Heft 2, pp. 235-257; M.A. Tavel's English translation (2005): Invariant Variation Problems. *Transport Theory and Statistical Physics* 1 (3), 1971, pp. 183-207; <http://arxiv.org/abs/physics/0503066>. Se desuden en ny engelsk oversættelse i [8].
- [8] Kosmann-Schwarzbach, Yvette (2011), *The Noether Theorems: Invariance and Conservation Laws in the Twentieth Century*. Springer 2011.
- [9] Noether, Emmy (1918), Invarianten beliebiger Differentialausdrücke. *König. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Nachrichten, Math.-phys. Klasse*, 1918, pp. 37-44.
- [10] Siegmund-Schultze, Reinhard (2011), “Göttinger Feldgrau”, Einstein und die verzögerte Wahrnehmung von Emmy Noethers Sätzen über Invariante Variationsprobleme (1918). *Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung (MDMV)*, 19 (2011), pp. 100-104.
- [11] Byers, Nina (1996), E. Noether's Discovery of the Deep Connection between Symmetries and Conservation Laws. In: *The Heritage of Emmy Noether in Algebra, Geometry, and Physics. Israel Mathematical Conference Proceedings*, Vol. 12, 1999. <http://cwp.library.ucla.edu/articles/noether.asg/noether.html>.
- [12] Byers, Nina (1994), The Life and Times of Emmy Noether: Contributions of Emmy Noether to Particle Physics. In: *History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics*. Ed. by Harvey B. Newman and Thomas Ypsilantis. New York and London: Plenum Press 1996; <http://xxx.lanl.gov/abs/hep-th/9411110>.
- [13] Kragh, Helge (2015), Generel relativitet: Træk af udviklingen 1920-1970. *KVANT* årg. 26, dec. 2015, s. 11-15.
- [14] Einstein, Albert (1935), Letter to the Editor: Emmy Noether. [Nekrolog]. *The New York Times*, May 5, 1935. Står bl.a. i [1]. Link fra [3].
- [15] Høyrup, Else (2015), Emmy Noether, artikel på bloggen Grandma Got STEM (GGSTEM); <https://ggstem.wordpress.com/2015/08/03/emmy-noether-2/>
- [16] Byers, Nina (2001), Emmy Noether. In: *Contributions of 20th Century Women to Physics*, University of California Los Angeles; <http://cwp.library.ucla.edu/> (Noether findes i menuen til højre under “Mathematical Physics”).
- [17] Landau, L.D. and Lifshitz, E.M. (1976), *Mechanics*. Vol. 1 of: *Course of Theoretical Physics*. Third ed, Butterworth Heinemann 1976. Chapter I: The Equations of Motion and Chapter II: Conservation Laws. Russisk original 1940.
- [18] Neuenschwander, Dwight E. (2011), *Emmy Noether's Wonderful Theorem*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press 2011.



Else Høyrup er cand. scient. i matematik, tidligere stipendiat og forskningsbibliotekar. Hun har i mange år arbejdet med videnskabshistorie, bl.a. på sin og Frank Nielsens hjemmeside www.fysikhistorie.dk. Her har hun specielt arbejdet meget med Newton. E-mail: elsehoeyrup@mail.dk.

DFS Årsmøde 2016 og *Lysets Års formidlingspris*

DFS Årsmøde 2016

Det er os som bestyrelse i Dansk Fysisk Selskab (DFS) en stor glæde, at kunne annoncere Årsmødet 2016 med et nyt koncept og med et solidt line-up af inviterede foredrag fra vækstlaget i Dansk Fysik-forskning og -undervisning anno 2016!

Årsmødet i Dansk Fysisk Selskab kommer i år til at ligge **6.-7. juni**, og vil foregå på Fænø Park i Middelfart. Programmet vil indeholde både plenar-foredrag og foredrag i parallelle tematiske sessioner, samt selvfølgelig poster-session, middag og godt samvær med nuværende, tidligere og kommende kollegaer og studiekammerater! Bekræftede foredragsholdere:

- Thomas Sand Jespersen, (NBI)
- Morten Bache (DTU-Fotonik)
- Kaare Hartvig Jensen (DTU-Fysik)
- Simon Albrecht (AAU)
- Leif Katsuo Oxenløwe (DTU-Fotonik)
- Nicholas Bailey (RUC)
- Claudio Pica (SDU)
- Cathrine Frandsen (DTU-Fysik)
- Georg Bruun (AAU)
- Lars Astrup Buchhave (NBI)
- Jens Wenzel Andreasen (DTU-Energi)
- Christian Brinch (NBI)
- Mads Toudal Frandsen (SDU)
- Jesper Olsen (AAU)

Årsmødet vil derfor give mulighed for at se de nyeste resultater indenfor en bred vifte af fysiske discipliner, fra ultrakorte optiske pulser og ekstremt hurtig data-transmission til nanopartikler, iskolde atomer og ekstra-solare planeter.

Alle deltagere, særligt studerende, opfordres til at medbringe en poster, og de bedste poster-abstracts vil blive opgraderet til foredrag. Der vil være kontante præmier til det bedste foredrag og den bedste poster, og vinderne vil desuden blive inviteret til at skrive en artikel om deres projekt til KVANT.

Deltagelse i Årsmødet vil for medlemmer af DFS i år koste blot 1300 kroner inklusiv ophold, 2x frokost og middag, hvor prisen for ikke-medlemmer vil være 1700 kroner. DFS udbyder derudover **10 fripladser til studerende** (ikke ph.d.-studerende), som præsenterer et foredrag eller en poster på mødet!

Tilmeldingsfristen er den 21. april og yderligere information om tilmelding, program og ansøgning om friplads kan findes på www.dfs.nbi.dk.

Lysets Års formidlingspris

I anledning af, at UNESCO har udnævnt 2015 til lysets år, uddelte den danske nationalkomité for Lysets år, i samarbejde med Dansk Fysisk Selskab, en formidlingspris på 10.000 kr. til en forsker, der har formået at udbrede viden om lys indenfor fysik, kemi eller optik til en bredere offentlighed. Blandt de indstillede faldt det klare valg på lektor Anja Andersen fra Niels Bohr Institutet, der i en årrække har formidlet viden om fysik og astronomi bredt ud i samfundet.

Anja Andersen har samtidigt med sit arbejde som forsker og underviser i kosmologi gjort en meget stor indsats for at formidle sin viden om, hvordan lys fra verdensrummet har gjort os i stand til at forstå det nære og fjerne univers. Hun har også fortalt, at vores nuværende viden om Universet bygger på årelang forskning i forbedring af teknikken til at modtage lys og radiobølger og at den har kostet tusindvis af årsværk indenfor videnskab og teknisk udvikling.

Anja Andersen har været, eller er, medlem af en række bestyrelser både indenfor forskning og formidling. Hun har også allerede modtaget talrige priser for sin formidling og alene i 2014 holdt hun 30 foredrag samtidigt med at hun har været en hyppig gæst i medierne.

På denne baggrund har bedømmelseskomitéen valgt Anja Andersen som prismodtager for *Lysets Års formidlingspris*. Prisen blev overrakt til hende umiddelbart efter Dansk Fysisk Selskabs generalforsamling på Matematisk Institut ved Aarhus Universitet torsdag den 12. november, kl. 16.15 af formanden for Dansk Fysisk Selskab og den danske nationalkomité for Lysets år, dr.scient. Jørgen Schou, DTU Fotonik.



Formand for Dansk Fysisk Selskab, Jørgen Schou, overrækker prisen til Anja Andersen.