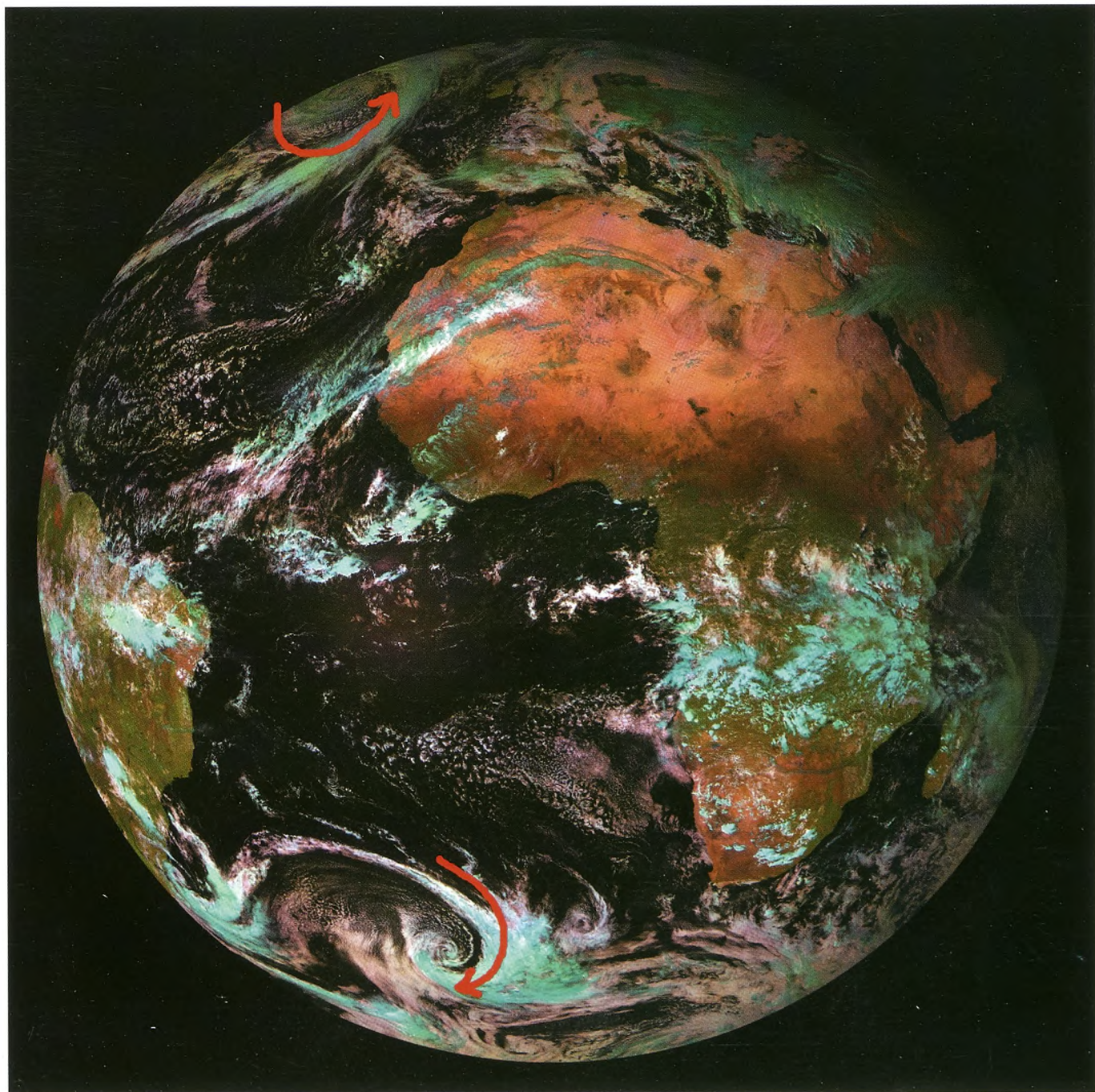


KVANT December 4 2004

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 15. årgang



FORTIDENS VARME KLIMA • OPDAGELSEN AF DNA-MOLEKYLETS STRUKTUR

GEOFYSIKDAG 2004 • ASTROBIOLOGI TRÆF • VERDENS FYSIK ÅR 2005

CORIOLISKRAFTEN OG FOUCAULTS PENDUL

LØSSALGSPRIS: 40 KR

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

Ørsted Laboratoriet, Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

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

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.)
Ordrup Gymnasium
Camilla Bacher (AS)
Mærsk Olie & Gas
Jørgen Friis Bak, Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen (SNU)
Henrik Flyvbjerg, RISØ
Torsten Freltoft, Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen,
Matematisk Institut, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør)
Jens Olaf Pepke Pedersen,
Dansk Rumforskningsinstitut
Finn Berg Rasmussen, Ørsted Lab, KU
Svend E. Rugh

Abonnementspris : 150 kr/år.

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

Annoncepriser

1/1 side: 3000 kr, 1/2 side: 1600 kr
1/4 side: 1000 kr, Farvetillæg: 1800 kr
Priserne er excl. moms og for reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 2700. Tryk: P.J. Schmidt A/S,
Vojens. ISSN 0905-8893



Produktionsplan

Nr. 1-05 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-05 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Leder – og opfordring til læserne!	3
KVANT-nyheder	
<i>John Rosendal Nielsen og Sven Munk</i>	4
Fortidens varme klima	
<i>Christian Bjerrum</i>	7
Foredrag i foråret 2005	14
Geofysikdag 2004	
<i>Susanne Lilja Buchardt og Karen Guldbæk Schmidt</i>	14
DNAs fysisk/kjemiske struktur kjent i 50 år	
<i>Olav Steinsvoll</i>	16
Corioliskraften og Foucaults pendul	
<i>Peter Ditlevsen</i>	23
Nordisk Astrobiologi	
<i>Anja C. Andersen og Axel Brandenburg</i>	28
Opgave-hjørnet – Relativistisk tyngdepunktforskydning	
<i>Jens Højgaard Jensen</i>	28
Verdens Fysik År 2005 – Einstein i det 21. århundrede	
<i>Henrik Flyvbjerg og Michael Cramer Andersen</i>	31
Ny film om fortolkning af kvantemekanikken	
<i>Michael Cramer Andersen</i>	Bagsiden

Forsiden viser et satellitbillede af Jorden (c) 2004 EUMETSAT.

I artiklen om “Corioliskraften og Foucaults pendul” af Peter Ditlevsen (side 23), kan man læse om corioliskraften. Den bevirker, at orkaner roterer mod urets retning på den nordlige halvkugle og med urets retning på den sydlige halvkugle.

Bestilling af ekstra eksemplarer af dette nummer (25 kr. / stk. plus forsendelse) kan ske på kvant@kvant.dk så længe lager haves.

Leder – og opfordring til læserne!

Velkommen til decembernummeret af KVANT!

I dette nummer har vi først KVANT-nyheder som skrives af to nye skribenter: John Rosendal Nielsen og Sven Munk.

Derefter en artikel om “Fortidens varme klima”, skrevet af adjunkt, ph.d. Christian Bjerrum fra Geologisk Institut ved Københavns Universitet. Christian Bjerrum har undersøgt hvordan fossiler kan fortælle om fortidens klima med særligt henblik på koncentrationen af CO₂.

Der er nyt fra SNU, som har forårets foredragsrække parat og DGF, der beretter om den nyligt afholdte “Geofysikdag 2004”.

I anledning af 50-året for kortlægningen af DNA-molekylets struktur i 1953 var der også fokus på kvinden – Rosalind E. Franklin – som stod i baggrunden af Crick og Watson, der delte nobelprisen i 1962. Rosalind Franklin ydede et banebrydende bidrag til kortlægningen af DNA indenfor røntgenkrystallografi, men hun døde af kræft i 1958 – kun 38 år gammel – og nåede således ikke at få så meget anerkendelse. Én af vores norske læsere, biofysiker og kernefysiker Olav Steinsvoll, har forfattet en artikel om Rosalind Franklins arbejde og hvordan man fortolker hendes diagram, så strukturen af DNAs spiralform kan tydes.

Axel Brandenburg og Anja Andersen, begge fra Nordita, inviterer til astrobiologi-træf i januar.

I Opgave-hjørnet bringes løsningen på tankeeksperimentet om relativistisk tyngdepunktsforskydning samt en ny opgave om havebål og brintbomber!

Til sidst bringer vi en artikel om “Corioliskraften og Foucaults pendul”, skrevet af nybagt dr.scient Peter Ditlevsen fra Niels Bohr Institutets Geofysiske Afdeling. I artiklen beskrives pendulbevægelser i inertialsystemer, fiktive kræfter og anvendelser af teorien i atmosfæren (forsiden) og havet.

God læselyst – og god jul!

Udvikling af KVANT og opfordring til læserne

Tidsskriftet KVANT har nu eksisteret i 15 år (oversigt over tidligere artikler i KVANT nr. 4, 2002) og er således ved at træde ind i de voksnes rækker. KVANT har i efteråret fået ny chef-redaktør (MCA), som gerne vil bidrage til at udvikle bladet og måske ændre stilen?

Vi vil gerne finde os en fornuftig plads blandt de mange andre gode tidsskrifter i Danmark, som fortæller om videnskab på dansk, herunder Naturens Verden, Aktuell Naturvidenskab (udg. af universiteterne), Aktuell Astronomi (udg. af Tycho Brahe Planetarium), Illustreret Videnskab (mere populært/kommercielt), Mathilde

(matematikernes tidsskrift) og ikke mindst tidsskriftet GAMMA, der med støtte fra Niels Bohr Institutet udgives af fysikstuderende ved Københavns Universitet.

Vi har tænkt os at fortsætte KVANTs linie med at bringe søbre artikler fra dygtige fysikere og folk der arbejder på grænsen mellem fysik og andre fag samt:

- Forsknings-nyheder, gerne med en dansk vinkel
- Mere personrelateret stof, f.eks. interviews eller videnskabshistorie
- Opgave- og paradokssektioner – også med nogle mere skøre indlæg, f.eks. fysik quiz eller kryds og tværs
- Omtale af aktuelle bøger
- Meddelelser fra foreningerne, der abonnerer på KVANT
- Flere illustrationer til den megen tekst – vi vil prøve, at få tilknyttet nogle tegnere og illustratører til bladet.

Men vi vil også gerne:

- Bringe eksempler på sjove, skøre, overraskende eller meget elegante eksperimenter fra fysikken
- Bringe flere debatskabende indlæg – vi vil gerne have en levende og måske af og til lidt skarp debat
- Formidle en større dialog mellem universitet og undervisningssektoren (gymnasie, seminarier,...), samt internt i undervisningssektoren
- Formidle en større dialog mellem undervisningssektoren, universitetet og den del af den danske industri, samt offentlige institutter, der benytter sig af videnskabelig forskning.

Læserne er yderst velkomne til at indsende idéer til hvordan vi kan udvikle tidsskriftet KVANT til et levende - og debatskabende - blad, som enhver fysiker bliver *nødt* til at læse for ikke at føle, at man kommer bagud. Man må også gerne komme med forslag til emner eller folk, der gerne må inviteres til at skrive. Send idéer og forslag til: kvant@kvant.dk eller:

KVANT – Tidsskrift for Fysik og Astronomi
Ørsted Laboratoriet
Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
2100 København Ø.

Temanumre på vej

Der er planlagt to temanumre af KVANT:

- Einstein særnummer: “Verdens Fysik År 2005” som markerer 100-året for Einsteins banebrydende 1905-artikler. Læs mere på side 31.
- “Biologi og Fysik”. Et særnummer om det spændende grænseområde mellem fysik og biologi.

MCA, SER, redaktionen

Af John Rosendal Nielsen og Sven Munk

Europas smarte satellit har nået Månen

ESAs satellit SMART-1 er, efter at have cirklet omkring Jorden adskillige gange, den 15. november definitivt indfanget af Månens tyngdefelt og er gået i kredsløb om Månen. SMART-1 er en lille spændende satellit, der ikke kun er på en forskningsekspedition, den skal også afprøve nye teknologier, hvilket navnet SMART antyder – Small Missions for Advanced Research in Technology.

Afstanden til Månens overflade er fortsat ret stor, så sondens raketmotor bruges nu til opbremsning, hvilket vil få sonden til at cirkle stadig tættere på Månen - indtil den endelige omløbsbane nås.



Figur 1. Den europæiske månesonde SMART-1 (ESA)

Et interessant aspekt ved SMART 1 er, at der bruges en ion-motor, som udspyer Xenon-ioner med meget stor hastighed. I stedet for store beholdere med brændstof og iltningsmiddel, som det kendes fra de store raketter til satellitopsendelse, er månesonden udstyret med en relativ stor beholder, som rummer den ædle gasart Xenon. Den egentlige energitilførsel er elektrisk strøm, som genereres af solpaneler.

I ion-motoren føres Xenon som gas ind i et kammer, hvor det ioniseres. Her accelereres ionerne af et elektrisk felt (formentlig måles spændingen i kV), hvorved de får en meget stor hastighed. De forlader så kammeret gennem en åbning, der fungerer som dysen på en normal raketmotor. Sondens acceleration er yderst beskednen og derfor var sonden så længe undervejs til Månen. Ion-motoren har vist sig at være utrolig brændstofeffektiv, idet den kun har anvendt 59 kg Xenon (ud af 82 kg) i de ca. 3700 timer, hvor den har været tændt. Ion-motoren har desuden spillet en hovedrolle i manøvren ved ankomsten, idet den har stabiliseret fartøjet og bragt fartøjet i dens endelige bane, sådan at den flyver i en højde af mellem 300 km over Månens sydpol og 3000 km over Månens nordpol. Motoren på SMART 1 er udviklet gennem et joint-venture af et fransk og et russisk firma. Ion-motorer er ikke helt nye, idet der er en halv

snes satellitter, som udnytter sådanne til at finjustere positionen på himmelhvalvet.

Af andre nye typer teknikker, der afprøves på SMART-1, bør nævnes navigationen, hvor observationer af himmellegemer fra satellittens eget teleskop kan fastslå den nøjagtige position og hastighed. Denne teknik er det store håb for fremtidens rumfartøjer, idet man derved kan begrænse kontakten til kontrolrummet på Jorden. Set fra en dansk synsvinkel skal det bemærkes, at SMART-1 er forsynet med stjernekameraer bygget på Danmarks Tekniske Universitet.

Kommunikationen med SMART-1 udnytter også en ny teknik, hvor man har afprøvet radiotransmissioner ved meget høje frekvenser sammenlignet med traditionelle radiofrekvenser. Disse kommunikationseksperimenter er beregnet til det ydre rum og vil gøre det muligt at overføre en stadig større mængde videnskabelige data fra fremtidens rumfartøjer. Et andet eksperiment af fremtidens kommunikation er "Laser Link", hvor SMART-1 har testet gennemførligheden af, at rette en laserstråle fra Jorden mod et rumfartøj i ydre rum.

SMART-1 missionen er ikke kun et teknologisk eksperiment. Den skal også udføre en række videnskabelige observationer af Månen, der skal starte i begyndelsen af januar og slutte i juni. Der kan dog blive tale om en forlængelse af denne periode for den videnskabelige mission pga. det ekstra brændstof.

Satellitten har et kamera, der kan studere Månens topografi og sammensætningen af overfladen. Dette foregår ved at måle på synligt lys igennem filtre, hvor man kan vælge imellem gult lys, rødt lys eller infrarød stråling med meget kort bølgelængde. SMART-1's kamera observerer et lille område fra forskellige vinkler og under forskellige belysningsforhold, hvilket derved gerne skulle forsyne os med ny viden om Månens overflade. Satellitten har et infrarødt spektrometer, der skal bestemme fordelingen af mineraler såsom feldspat. Observationer af denne slags er tidligere gjort med den amerikanske "Clementine", men SMART-1 vil kunne gøre det langt mere detaljeret.

Formålet med disse videnskabelige eksperimenter er at afgøre, om der eksisterer vand i form af is i bunden af små kratere ved Månens polarområder. I disse kratere bliver temperaturen ikke over -170°C , idet sollyset ikke kan nå derned. Manglen på sollys vil besværliggøre observationerne, men håbet er, at der kommer lys nok til at spektrometret kan måle det. Eksistensen af vand i form af is er vigtig for en eventuel oprettelse af en permanent base på Månen.

Et andet spørgsmål, forskerne håber på at få besvaret, er, hvordan Månen er blevet dannet. En af

teorierne er, at Månen er dannet ved en kollision af en stor asteroide og Jorden under Solsystemets dannelse for omkring 4560 millioner år siden. Hvis denne teori er korrekt, skal mængden af jern i forhold til lettere metaller såsom magnesium og aluminium være mindre på Månen end på Jorden. SMART-1 skal bestemme mængden af grundstoffer med et røntgenstrålingsspektrometer. Solens røntgenstråling får Månens overflade til at fluorescere og derved selv at udsende røntgenstråling. Den præcise energi fra denne røntgenstråling kan bruges til at bestemme hvilket grundstof, der har udsendt strålingen. Det er første gang man undersøger mængden af grundstoffer ved Månens poler. Disse spændende resultater fra observationerne vil først være klar efter juni 2005, så vi må vente lidt endnu.

Kilde: www.esa.int/esaCP/SEM2S8WJD1E_index_0.html

Skilsmisse ved Saturn

Vi bringer en opdatering af status for rumfartøjet Cassini-Huygens, hvis mission blev beskrevet i sidste nummer af Kvant. Cassini-Huygens er et samarbejde mellem det europæiske ESA, det italienske Agenzia Spaziale Italiana og det amerikanske NASA.

Rumfartøjet ankom til Saturn den 1. juli, og alt er gået efter planen. Cassini har således allerede taget billeder af månerne Titan, Hyperion og Tethys og opdaget nye måner i Saturns ringe.

Rumfartøjerne bliver adskilt den 25. december 2004, hvorefter Huygens-sonden fortsætter til Saturns måne Titan. Det er planen at Huygens skal trænge ind i Titans tykke atmosfære den 14. januar, hvor den efter 2 1/2 time lander på Titans overflade og tager den i nærmere øjesyn. Den tykke atmosfære har stillet store krav til sonden, idet den tykke gas vil opvarme sonden under nedstigningen til ekstreme temperaturer.

Huygens' instrumentpark. Nogle af målesystemerne vil være aktive under nedstigningen.

Aerosol Collector and Pyrolyser: For at identificere stoffer i atmosfæren vil en pumpe føre luften gennem et filter, som opsamler aerosolpartikler ($30 \mu\text{g}$) til kemisk analyse.

Huygens Atmosphere Structure Instrument: Skal måle atmosfærens fysiske og elektriske egenskaber. I pakken indgår også en mikrofon, som skal optage lyde på månen.

Doppler Wind Experiment: Doppler-skiftet i radiosignalerne anvendes til at måle sondens horisontale bevægelse, forårsaget af vind. Desuden vil man søge at bestemme atmosfærens indflydelse på dæmpningen af radiosignaler.

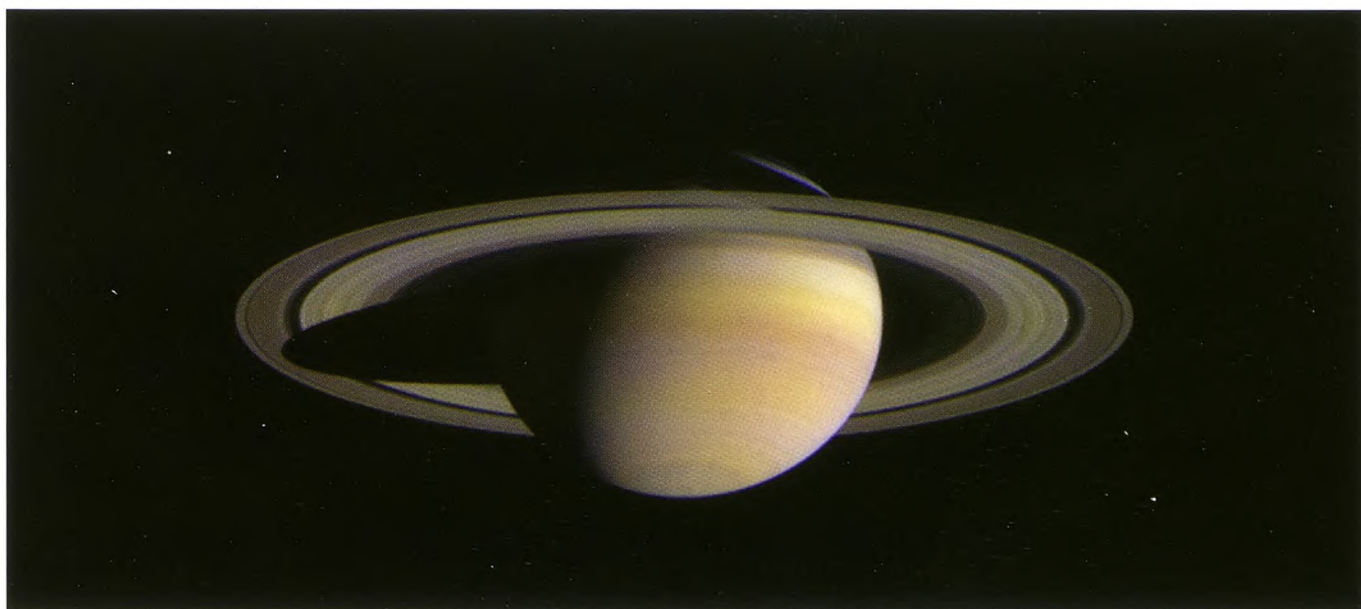
Descent Imager/Spectral Radiometer: Instrumentet kan tage billeder og kombinere dette med en (bredbåndet) spektralanalyse. Få hundrede meter før nedslaget tændes nogle lamper, så der kan laves spektralanalyse af måneoverfladen.

Gas Chromatograph and Mass Spectrometer: Skal identificere og kvantificere kemiske komponenter i atmosfæren. På vej ned gennem atmosfæren vil der blive indsamlet prøver i stor højde for en efterfølgende analyse.

Surface Science Package: Kan bestemme overfladens fysiske egenskaber på nedslagsstedet. Et accelerometer, som registrerer decelerationen under nedslaget - kan fortælle noget om overfladens hårdhed og struktur. Andre sensorer kan måle temperatur, varmeledningsevne, varmekapacitet, lydhastighed, brydningsindeks og overflade-materialets (væskens?) dielektricitetskonstant.

Huygens' varmeskjold kan modstå temperaturer på op til 18.000°C . Vi vender forhåbentligt tilbage til denne mission i næste nummer af Kvant, hvor der måske ligefrem er blevet offentliggjort resultater fra landingen.

Kilder: www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/; Kvant nr. 3, 2004, s. 3-7; www.saturn.jpl.nasa.gov;



Figur 2. Saturn fotograferet af Cassini-rumfartøjet – én af månerne kan anes (NASA/ESA)

Gerningsstjernen bag Tychos supernova er fundet!

Den 11. november i det herrens år 1572 opdagede Tycho Brahe en ny stjerne i stjernebilledet Cassiopeia, som han kaldte for Stella Nova (latin for en ny stjerne). Læseren undrer sig måske over om denne nyhed ikke er en anelse gammel, men den er faktisk blevet aktuel igen, da man har fundet gerningsmanden eller snarere gerningsstjernen til hændelsen for over 400 år siden.

Tycho Brahes "nye" stjerne viste sig ikke at være en stjernefødsel men en stjernedød, der kort efter kunne ses om dagen i flere uger. Denne afslutning på en stjernes liv var synlig for det blotte øje i 16 måneder og fik astronomer i det 16. århundrede til at opgive idéen om den uforanderlige og udødelige stjernehimmel. Vi ved i dag, at det var en Type Ia supernova udfra Tycho Brahes omhyggelige og præcise observationer.

Et forskningsteam anført af Pilar Ruiz-Lapuente fra Universitetet i Barcelona, Spanien, har fundet det første direkte bevis for, hvad man har formodet længe, at Type Ia supernovaer kan opstå i et dobbeltstjernesystem med en udbrændt hvid dværg og en normal hovedseriestjerne. Beviset fik de ved at studere Tycho Brahes supernova med flere jordbaserede teleskoper og Hubble Rumteleskopet. De har observeret en stjerne svarende til vores egen sol - bare lidt ældre - med høj hastighed, der flygtede fra gerningsstedet, dvs. resten efter supernovaen. Hubble-teleskopet har bestemt stjernens hastighed til tre gange så hurtigt som de omkringliggende stjerner.

En Type Ia supernova er et resultat af et dobbeltstjernesystem, hvor den tungeste stjerne ældes hurtigere og dermed bliver en hvid dværg. Dette er normalt afslutningen for stjerner på størrelse med Solens masse, og der vil ikke forekomme nogen supernova, hvis det ikke var for nabostjernen. Stof fra hovedseriestjernen vil begynde at spilde stof i form af hydrogen over på den hvide dværg, der derved vil forøge sin masse. Når massen af den hvide dværg har nået en grænseværdi på 1,4 solmasse (Chandrasekhars grænsemasse), vil den ende som en gigantisk brintbombe (fusion) eksplosion. Eksplosionen vil resultere i, at hovedseriestjernen bliver sendt ud i rummet med stor hastighed svarende til den stjerne, som Ruiz-Lapuente/Æs team har observeret.

En stjerne, der flygter med høj hastighed fra gerningsstedet, er ikke et fældende bevis i sig selv, idet man kunne forestille sig alternative grunde til den suspekte opførsel. Stjernen kunne f.eks. være kommet fra den galaktiske halo, der omgiver Mælkevejens skive. Stjerner i haloen har store hastigheder. Ved undersøgelse af stjernens spektre med 4,2 meter William Herschel teleskopet på La Palma og 10 meter Keck teleskopet på Hawaii har man fundet, at den har et indhold af tunge metaller, der er typisk for stjerner i Mælkevejens skive og ikke i haloen. Stjernen er desuden en aldrende version af vores Sol, idet stjernen er begyndt at vokse i diameter for at blive en rød gigantstjerne, hvilket passer til profilen for gerningsstjernen.

Type Ia supernovaer er meget vigtige i kosmologien, idet deres energiudsendelse ved eksplosionen er så velkendt, at de kan bruges til meget præcise afstandsbestemmelser over meget store afstande. Astronomerne går så langt at de kalder supernova Ia for standard lyskilder (eng. standard candle). De er blevet brugt til at bestemme, at Universet har accelererende ekspansion. Accelerationen af Universet skulle ske ved en ukendt kraft - en sort energi - som man stadigvæk undersøger ved hjælp af Type Ia supernovaerne. Det er derfor vigtigt at bekræfte teorierne om forløbet af supernova eksplosionerne, så man kan stole på, at Type Ia supernovaer virkelig er disse standard lyskilder.

Kilder: www.spacetelescope.org; Nature vol. 431, s. 1044-1046 og s. 1069-1072.

Akademisk søgning på nettet

Google har lanceret en ny søgemaskine til internet, der kan være til gavn for forskere og studerende. Den nye søgemaskine hedder "Google Scholar" og er beregnet til at finde artikler og bøger på internettet. Redaktionen afprøvede søgemaskinen ved at søge på "Kvant", hvilket der kom tre resultater ud af. Til vores store forundring var ingen af dem selve bladet (www.kvant.dk) men derimod *henvisninger* til bladet. Blandt andet fandt Google Scholar en årsberetning fra "Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning" fra 2002, hvor der var en reference til Kvant (på side 35). Søgmaskinen er kun en beta-version, og den mangler bl.a. en mulighed for udvidet søgning.

Kilde: www.scholar.google.com

Atomur i mikroformat

Muligheden for at indbygge et atomur i en mobiltelefon er ved at kunne realiseres. Udviklingsarbejdet er gennemført hos NIST (National Institute of Standards and Technology) under projektnavnet "Chip-scale Vapor-Cell Atomic Clocks". Som i andre atomure af klassisk tilsnit er frekvens/tid-bestemmelsen baseret på overgangen mellem to energi-niveauer i Cæsium-atomet (Cs). For at få en veldefineret overgang skal Cs-atomerne befinde sig i gasfasen. Overgangen har en energiforskel, som svarer til frekvensen 9,2 GHz. Ved at sende laserlys (852 nm) moduleret med 4,6 GHz gennem Cs-gassen kan man låse et eksternt oscillatorsignal.

Det er lykkedes med MEMS (microelectromechanical system)-teknik at lave en gas-kavitet med ydre mål på $2 \times 2 \times 5$ mm. Med en måletid på én time kunne en frekvensstabilitet på $1 : 10^{11}$ opnås. Effektforbruget, 75 mW, kan formentlig reduceres til 20 mW.

Som mulige indsatsområder for sådanne miniature atomure angiver forskerne ved NIST selv følgende: jam-resistant GPS receivers, secure wireless communication og synchronization of telecom network. Imidlertid bliver det også muligt at indbygge sådanne ure i alle mulige former for (ikke mindst) bærbare instrumenter, hvor en nøjagtig tidsmåling kan gøre nytte.

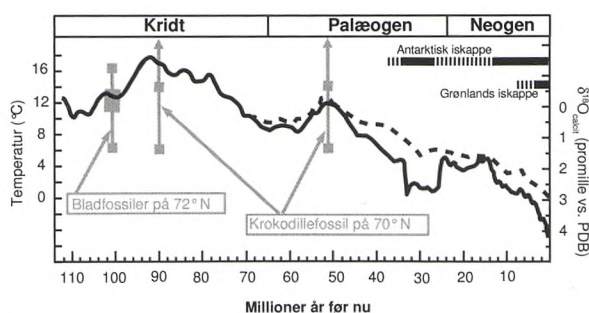
Kilde: www.boulder.nist.gov/timefreq/ofm/smallclock/

Fortidens varme klima

Christian J. Bjerrum, *Geologisk Institut, Københavns Universitet*

I geologisk perspektiv er nutidens klima relativt koldt, mens det tidligere var betydeligt varmere. Spørgsmålet er, om variationen i Jordens middeltemperatur har været styret af atmosfærens indhold af kuldioxid som forudsagt af teorien om CO₂ som drivhusgas. Svaret på dette spørgsmål er vigtigt for at vide om vores beregninger af fremtidens klima under den øgede menneskeskabte udledning af kuldioxid er tilnærmelsesvis rigtige. Geologiske klimaindikatorer kan i den sammenhæng bruges som en prøve af klimamodellernes rigtighed. Ved Geologisk Institut og Center for Jordens Klima og Biogeokemiske Kredsløb er dette et af forsknings-emnerne, hvor vi bl.a. arbejder med at øge vores forståelse af fortidens klima for at give os bedre rammer for at beregne fremtidens klima.

Gennem den sidste million år med istider og mellemistider er der en god korrelation mellem temperatur og atmosfærens indhold af kuldioxid. Ydermere er der nogenlunde overensstemmelse mellem beregninger af istidsklimaet, foretaget med klimamodeller kalibreret til nutidens klima. Det er imidlertid ikke givet, at vores klimamodeller med alle deres parametriseringer kan bruges for en meget højere kuldioxidkoncentration eller meget højere global middeltemperatur. Det er derfor vigtigt at sammenligne modelberegninger med observationer fra tider, hvor klimaet var varmt som for 100 til 40 millioner år siden (Figur 1).



Figur 1. Temperatur i dybhavet og på høje breddegrader over de sidste 110 millioner år af Jordens historie. Den fuldt optrukne kurve er baseret på forholdet mellem ¹⁸O og ¹⁶O i kalkfossiler af bundlevende foraminiferer fra dybhavet. Den stiplede kurve er baseret på Mg/Ca målinger på de samme fossiler. I Kridttiden var dybhavstemperaturen 10-16°C, i overensstemmelse med uafhængige data fra høje breddegrader. Figuren er baseret på data fra J. Zachos et al., 2001, C. H. Lear et al., 2002 og andre artikler.

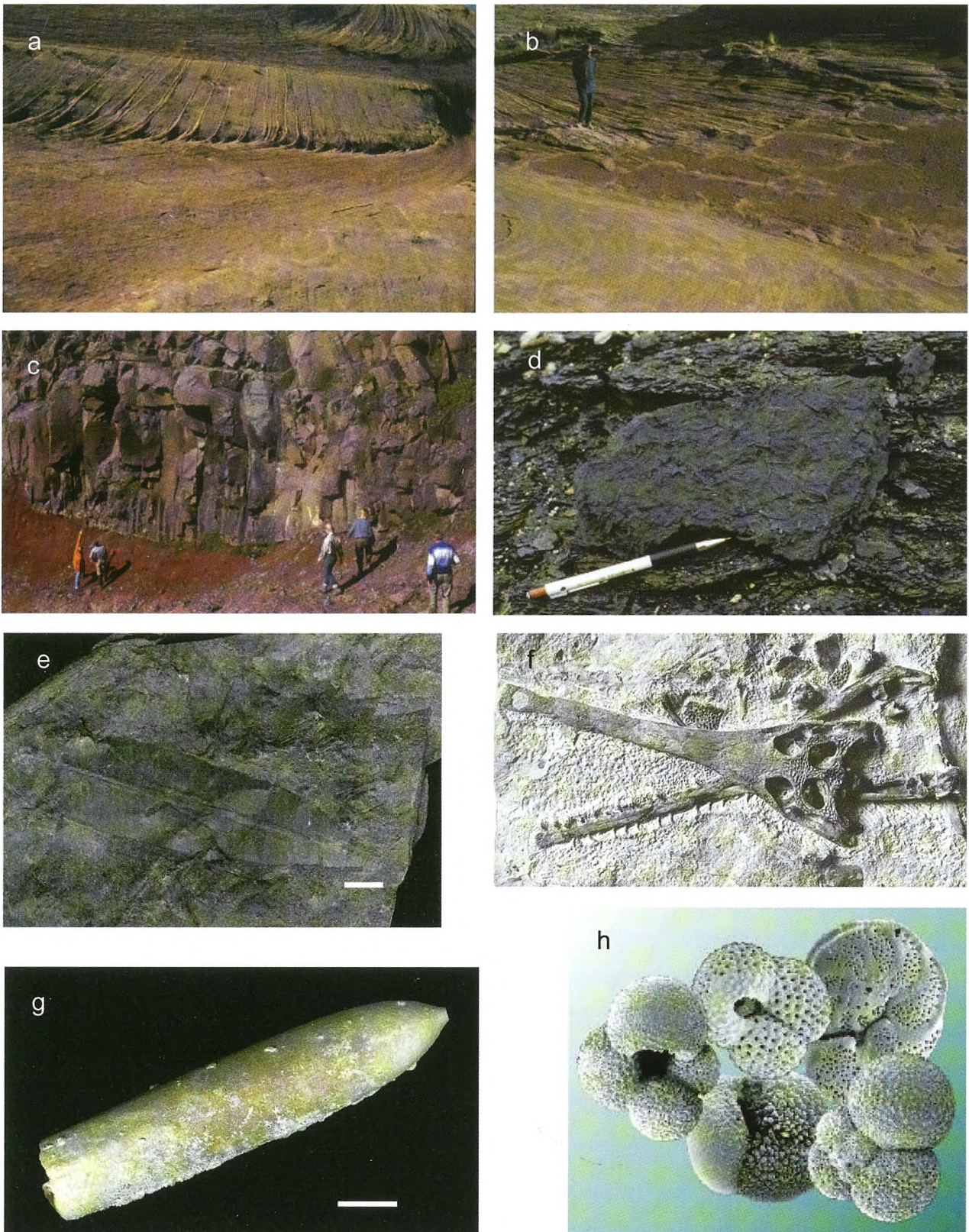
I det følgende beskrives kort udvalgte klimaindikatorer hovedsageligt fra varmere perioder i Jordens historie, som kan findes og undersøges i Danmark og det nære udland. Klimaet siden tidlig Kridt vil kort blive karakteriseret og sammenlignet med den rekonstruerede CO₂-koncentration. Til slut vil resultater fra koblede ocean-atmosfæremodeller blive diskuteret og sammenstillet med klimakarakteristikken. Det viser sig, at de høje temperaturer, som de geologiske data peger på for arktiske egne, ikke kan reproducere i klimamodellerne for det vurderede CO₂ niveau. Dette paradoks understreger vores manglende forståelse af, hvad der styrer klimaet specielt for varme perioder inklusiv jordens fremtid.

Klimaindikatorer

Vores undergrund er fyldt med informationer om fortidens klima i kraft af de sediment (transporteret sand, ler, organisk materiale) og fossiler, der blev aflejret og bevaret til forskellige tider. I dag er disse sediment og bjergarter blevet løftet op i forskellig grad og kan studeres i kystklinger eller råstofgrave.

Fra vores viden om klimabælter, associerede sedimentaflejringer og fossiler findes der en række kvalitative og kvantitative klimaindikatorer (Tabel 1). En mere komplet gennemgang af geologiske klimaindikatorer kan findes i f.eks. Parrish (1999).

Saltsøer og sandaflejringer fra store klitsystemer uden vegetation optræder kun i områder med meget lidt nedbør og høje temperaturer (Figur 2a,b). I modsætning hertil findes jordbundstypen laterit (med meget rød jernoxid og/eller aluminiumoxid) f.eks. kun i områder med megen nedbør, høje temperaturer og betydelige sæsonvariationer. Sådanne fossile lateritter finder man f.eks. i Vestgrønland mellem basalbjergarter dannet af lavastrømme i tidlig Palæogen (Figur 2c). Datering af de enkelte lavastrømme viser at forvitring af basalten og dannelsen af laterit sandsynligvis ikke har taget mere end titusind år. Disse gamle jordbunde viser os, at klimaet må have været varmere og mere fugtigt end i dag, da tilsvarende laterit ikke dannes på basalterne i Island i dag, men kun i mere tropiske egne.



Figur 2. Geologiske klimaindikatorer. a. Snit gennem forstenet klit. De mørke kiler er sand-skredstunger på klittens læside. Sandstenene kan følges over mere end 50.000 km² og blev aflejret i en stor ørken. Tommestok er 1 m lang. b. Fossile polygoner i klitsandsten dannet pga. saltudfældning (ikke bevaret). c. Forstenet rød laterit jordbund under søjle-basalter i Vestgrønland, dannet under varme og fugtige forhold i Kridttiden. d. Kul og blade i delta-sedimenter fra Kridttiden i Vestgrønland. e. Helrandet blad fra Kridttiden i Vestgrønland. Skala er 1 cm. f. Hovedskjold og underkæbe af fossil havkrokodille fra Kridttiden, fundet i Lindham, Skåne. Underkæben er 1 m lang. g. Belemnit fra kridtet på Møn. Belemnitten sad i bagenden af et blæksprutte lignende dyr. Skala er 1 cm. h. Mikroskopiske foraminiferer (encellede 'dyr' med kalkskal). Hver skal er ca. 2/10 mm i diameter. (Fotos a-g taget af C.J. Bjerrum og H. H. Midtgaard).

Tabel 1a. Terrestriske klimaindikatorer.

Terrestriske klimaindikatorer: kvalitative		
Forstening:	Nedbør (N):	Temperatur (T):
Ørken klitter. Udbredelse $\geq 100 \text{ km}^2$ (Fig. 1a)	Fordampning $>>N$; mindre end 40 mm 0-3 måneder.	$T > 5^\circ\text{C}$ i 12 mdr./år
Salt. Inddampningskrystaller og relaterede strukturer (Fig. 1b)	Årlig middel N $\sim 310 \text{ mm}$. Kun 1-4 måneder med $N > 40 \text{ mm/mdir}$.	Årlig middel T $> \sim 20^\circ\text{C}$
Laterit. Jordbund beriget i jern- og aluminiumoxid (Fig. 1c)	$N > 1200 \text{ mm/år}$ og mindre end 6 måneder har under 60 mm/mdir.	Årlig middel T $> 22^\circ\text{C}$; Stor sæson-variation (monsun)
Kul. (Fig. 1d)	Årlig middel N $\sim 2240 \text{ mm}$ (300-5000 mm).	Hvis T $> 10^\circ\text{C}$, må nedbør-fordampning ikke være mindre end 40mm/mdir.
Træ. Falske årringe	Tørke i vækstsæson	Frost i vækstsæson
Terrestriske klimaindikatorer: kvantitative		
Blade. Multivariat statistik på 31 bladkarakterer (takker, størrelse osv. For dækfrøede planter forklarer temperatur- og vandstress 68% af naturlig floravariabilitet. (Fig. 1e)	Årlig middel N (usikkerhed $\sim 430 \text{ mm}$); N i vækstsæson (usikkerhed 280 mm).	Årlig middel T (usikkerhed $\pm 2^\circ\text{C}$), Koldeste måneds middel T, Varmeste måneds middel T

Tabel 1b. Marine klimaindikatorer.

Marine klimaindikatorer: semi kvantitative	
Forstening:	Temperatur (T):
Koral: Fra eufotisk zone.	$T > 20^\circ\text{C}$
Krokodille: (Fig. 1f)	Årlig middel $T > 15^\circ\text{C}$, Koldeste måneds middel $T > 5^\circ\text{C}$
Marine klimaindikatorer: kvantitative	
Kalkskallede organismer. Ilt-isotop forholdet i kalken (δ_k) opgives i promille afvigelse fra en standard; $\delta = \left\{ \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{prøve}} \times \left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \right]^{-1} - 1 \right\} \times 1000$ (Fig. 1g, 1h)	$T = \alpha(\delta_k - \delta_v) + \beta.$ α og β er lidt forskellige for forskellige arter, men er typisk $\alpha \sim 4, 4^\circ\text{C/promille}$ og $\beta \sim 16, 5$. δ_v er havvands isotopsammensætning, der er afhængig af det hydrologiske kredsløb således at $\delta_v = 0, 5 \times S - 17, 3$ promille for Atlanterhavet.

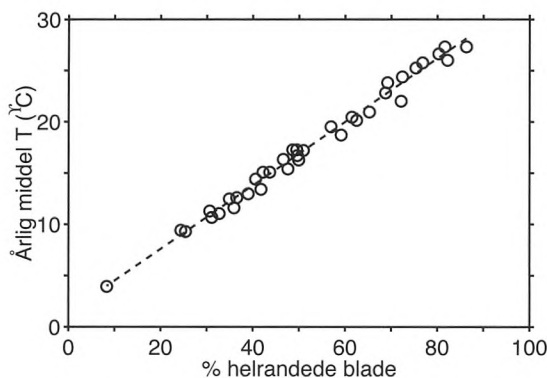
Dannelsen af kul er begrænset til områder med hyppig nedbør. Hvis temperaturen overstiger 10°C må der ikke være nogen længere tørke perioder. Kullag med træstammer og træstubbe fra store træer optræder i aflejringer fra Kridttiden langs vestkysten af Grønland (Figur 2d). Det viser os, at klimaet var både fugtigere og varmere end i dag. I Kridttiden lå Vestgrønland 10 grader længere mod syd end i dag, så kontinentaldrift kan delvist forklare det varmere klima. Analyser af vækstringene

i tidssvarende træstammer fra det nordlige Alaska viser, at der ingen falske årringe er, hvorfor vækstsæsonen ikke har været afbrudt af frost som det oftest sker i dag. Hvis man integrerer andre data som plantefossiler og stabile isotoper finder man, at den årlige middeltemperatur var 15°C og 10° på henholdsvis 60°N og 70°N nordlige palæobreddegrad. Det vil sige at der i Vestgrønland var et klima svarende nogenlunde til nutidens klima i det sydlige England.

Fossiler kan også bruges til at sætte tempera-

turgrænser på landkortet for den fortidige kontinentfordeling. Et eksempel er krokodiller, der i dag foretrækker vandtemperaturer mellem 25°C og 35°C. Krokodiller lever kun i områder hvor den koldeste måneds middeltemperatur ikke falder under 5°C, hvilket svarer til områder med en årlig middeltemperatur på ca. 14°C. Når vi finder en tand fra en fossil fætter til nutidens havkrokodille i tidlig Palæogen-aflejringer i Fakse Kalkbrud, kan vi derfor være ret sikre på, at havvandet må have været betydelig varmere end i dag (Fig. 2f). Fund af havkrokodiller fra Kridttiden på 70°N palæo-breddegrad er endnu mere tankevækkende.

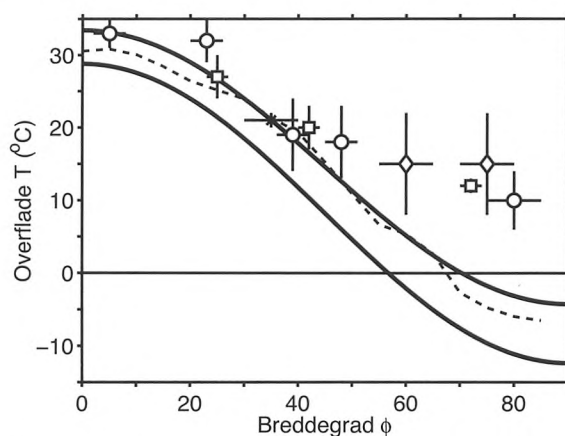
Planter der i dag vokser i tempereret klima finder man også som fossiler i Grønland (Figur 2e). Mere kvantitative observationer kan man imidlertid få ved at bruge bl.a. form og størrelse af de fossile blade fra dækfrøede planter. For en del år siden blev det empirisk vist at procentdelen af blade der er uden bladtakker (helrandede) er en funktion af den årlige middeltemperatur (Figur 3). Metoden er nu blevet bekræftet og udvidet ved at lave statistik på 31 bladkarakterer og 8 klimaparametre. Statistisk analyse af blade fra Kridttiden i f.eks. det nordlige Alaska eller Rusland viser, at den årlige middeltemperatur var 9–12°C og at den koldeste måneds middel var 5°C.



Figur 3. Korrelationen mellem årlig middeltemperatur og antal helrandede blade divideret med total antal blade i uforstyrrede skove i syd-øst Asien (efter J. Wolfe, 1993).

Kalkskaller fra forskellige organismer kan også analyseres kemisk for at beregne temperaturen i havvandet på den tid da kalkskallen blev dannet. Når kalk udfældes i ligevægt med havvand er der mere af isotopen ^{18}O der indbygges i kalken end svarende til koncentrationen i havvand (Tabel 2). Denne fraktionering af ilt-isotoperne er afhængig af temperaturen. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ forholdet i vand eller kalk udtrykkes som en afvigelse fra en standard og skrives $\delta^{18}\text{O}$. Jo højere tempera-

turen er jo mindre forskel er der i isotopforholdene. Havvandets $\delta^{18}\text{O}_v$ er en funktion af iskapernes volumen og det hydrologiske kredsløb, således at $\delta^{18}\text{O}_v$ tilnærmelsesvis er proportional med saliniteten. Forskellige organismer fraktionerer desuden i forskellig grad, hvorfor det er vigtigt at have levende arter for at kunne studere fraktioneringen empirisk. Belemnitter (vættelys) fra Kridt har været meget anvendt til at måle isotopforholdet (Figur 2f). Men da denne gruppe af blæksprutter uddøde for 65 millioner år siden, kan vi kun bruge dem til relative temperaturbestemmelser, såsom temperaturgradienten mellem lave og høje breddegrader. Kalkskaller fra foraminiferer (enkeltcellede organismer) som også lever i dag, er således bedre til absolut temperaturbestemmelser (Figur 2h). Nogle arter lever på bunden af havet, mens andre er planktoniske og lever i den øvre vandsøjle. Analyser af isotopforholdet i bundlevende foraminiferer fra Kridttiden viser, at temperaturen var ca. 10°–14°C på 1500 m vanddybde, efter isotopkorrektion på –1,2 promille for manglende is-kapper (Figur 1). Højere temperaturer end i dag var gældende både på høje og lave palæo-breddegrader (Figur 4).



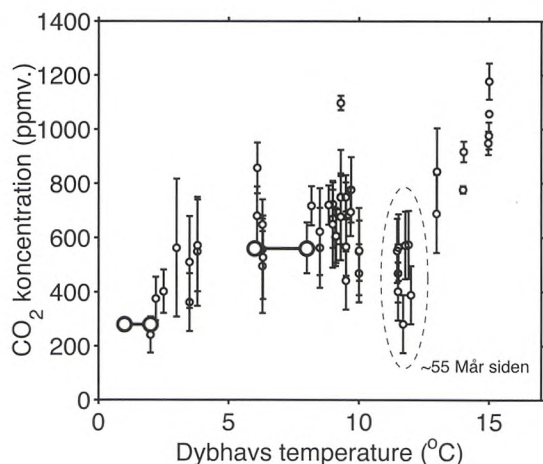
Figur 4. Beregnet temperaturprofil sammenlignet med temperaturrekonstruktioner baseret på geologiske data. De to fuldt optrukne kurver er fra en simpel klimamodel med 1× og 4× 280 ppmv CO_2 (ppmv: parts per million by volume) (Olsen et al., i trykken). Zonalt midlet temperaturprofil fra en 3-dimensional ocean-atmosfære model med 560 ppmv CO_2 er vist med stiplede kurve (fra Huber og Sloan, 2001). Temperaturrekonstruktionerne (med usikkerhed) er baseret på fossile koralrev (stjerne), bladmateriale (kvadrat), havkrokodillefossiler (diamant) og isotopforholdet i fossile planktoniske foraminiferer (cirkler) (fra bl.a. P. Skelton, 2003). Modelberegningerne underestimerer temperaturen på høje breddegrader.

Andre planktoniske foraminiferer fra 60° palæo-bredde giver umiddelbart meget høje over-

fladetemperaturer (20–28°C). En del af disse høje temperaturer skyldes at $\delta^{18}\text{O}_w$ på høje breddegrader kan blive 2 promille lavere i tilfældet af et kollaps af den termohaline cirkulation, hvilke svarer til en overestimering af temperaturen på 8°C, som man skal tage højde for i rekonstruktioner (Stabiliteten af den termohaline cirkulation, det hydrologiske kredsløb og salinitetsændringer på høje breddegrader er beskrevet af Bendtsen, i Kvant nr. 3, 1998). For nyligt er det blevet vist empirisk, at magnesium-kalcium forholdet i foraminiferer kun er afhængig af temperaturen. Dette giver endnu en ny uafhængig mulighed for at vurdere havtemperaturen dengang organismen levede (Figur 1).

Klimaet og CO₂ fra Kridttiden til i dag

Ved en samlet analyse af geologiske klimaindikatorer er der ringe tvivl om, at klimaet i Kridttiden var varmere end i dag, med en årlig middeltemperatur på ca. 10°C i det arktiske område og dybhavet, mens tropiske områder kun var ca. 5°C varmere end i dag (Figur 4). Igennem Kridt, Palæogen og Neogen aftog temperaturen i dybhavet til istids- og mellemistids-temperaturen på 1–4°C (Figur 1).



Figur 5. Dybhavstemperatur og atmosfærens CO₂-koncentration (fra forskellige tidspunkter siden 110 millioner år før nu) (Baseret på bl.a. Zachos et al. (2001) og data fra Retallack (2001) omregnet efter Royer et al. (2001)). Beregnede dybhavstemperaturer fra en 3-dimensional ocean-atmosfære klimamodel (Huber og Sloan, 2001) er vist med cirkler forbundet med fed vandret streg. Data fra 55 millioner år gamle fossiler falder uden for tendensen hvor dybhavstemperaturen er høj for lave CO₂-koncentrationer.

Hvad var så årsagen til disse bemærkelsesværdig høje temperaturer? En oplagt kandidat er atmosfærens indhold af kuldioxid, der sammen med vanddamp virker som en stærk

drivhusgas. I Kridttiden var atmosfærens CO₂-koncentration ca. 4 gange så høj som i dag. Vidt forskellige metoder til at vurdere CO₂ har været anvendt, og midlet over længere perioder viser de alle en aftagende CO₂-koncentration siden Kridttiden. På kortere tidsskala er der større afvigelser mellem CO₂ estimerne indbyrdes og temperaturrekonstruktioner. CO₂ estimer baseret på tætheden af spalteåbninger i gingko-blade repræsenterer geologiske øjebliksbilleder. På nuværende tidspunkt er der ikke nok bladmateriale til at rekonstruere en kontinuert temperaturhistorie for atmosfæren, der kan undersøges for korrelation med CO₂ estimerne. Anvender man dybhavstemperaturen, som er et mål for temperaturen på høje breddegrader, er der ikke nogen god korrelation mellem temperaturen og CO₂-koncentrationen (Figur 5). Nogle af de høje eller lave CO₂ værdier er relateret til kortvarige og specifikke geologiske hændelser, hvor årsag-virkning ikke er endeligt fastlagt. For omkring 55 millioner år siden blev en stor mængde metan frigjort fra kontinentsoklen og forårsagede kortvarige ændringer i klimasystemet. Ser man bort fra data associeret med denne hændelse, er der en tendens til, at højere CO₂-koncentrationer er associeret med høje dybhavstemperaturer. Det er bemærkelsesværdigt, at dybhavstemperaturen stiger så meget for en given stigning i CO₂ koncentrationen. Det har været foreslået at der også var andre styrende klima faktorer end CO₂ igennem jordens historie såsom metan og solaktivitet. I nærmeste fremtid vil forskere verden over kunne øge antallet af CO₂ estimer baseret på f.eks. fossile gingoblade og temperaturestimer, således at middeltendensen over længere tidsrum kan blive klargjort.

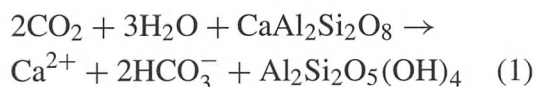
Vekselvirkning mellem temperaturen og CO₂

Er det muligt at høje CO₂ værdier blot er et resultat af høje temperaturer, således at det ikke er CO₂ som drivhusgas der resulterer i høje temperaturer på Jorden? En ældre men god diskussion af dette emne er blevet præsenteret af Robert Berner fra Yale University i Scientific American (Marts 1989). På lange geologiske tidsskalaer er mængden af CO₂ i ocean-atmosfære-biosfære systemet bestemt af den kemiske forvitring af silikatrige bjergarter, udfældning af karbonat i havvand og afgasning fra vulkaner. Opdagelsen af sammenhængen mellem CO₂ i atmosfæren og klima via drivhuseffekten tilskrives ofte Svenskeren S. Arrhenius (1896) men faktisk blev det etableret af franskmænden J. Ebelmen så tidligt som i 1845. Ebelmen og Arrhenius viste, at den kemiske

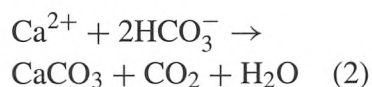
nedbrydning (forvitring) er afhængig af temperaturen, således at f.eks. en højere temperatur resulterer i mere forvitring, hvilket minsker CO₂-koncentrationen. Høje CO₂-koncentrationer er således ikke et passivt resultat af høje temperaturer.

Kemisk forvitring.

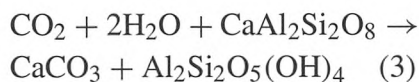
Under kemisk forvitring nedbrydes/opløses mineraler i bjergarter. Regnvand med opløst CO₂ fra luften er en svag syre (CO₂(g) + H₂O ↔ H⁺ + HCO₃⁻) der resulterer i kemisk forvitring af blandt andet granit, hvorved mineralerne nedbrydes til opløste ioner og/eller omdannes til nye mineraler der er stabile ved jordens overflade. F.eks. nedbrydes feldspat til opløste calcium- og bikarbonat-ioner og ler via reaktionen:



Vi kan se, at der optages CO₂ via forvitring. Tilsvarende ved vi fra kemien, at denne reaktion forløber hurtigere ved høje temperaturer (Arrhenius, 1896), og at processen accelereres af planter og svampe. Efter forvitring transporteres de opløste ioner med floder til havet. Havet er overmættet med hensyn til calciumkarbonat (kalk) hvorfor de opløste ioner udfældes:



Denne kemiske reaktion resulterer altså i produktion af CO₂. Hvis man imidlertid lægger reaktion (1) og (2) sammen kan vi se at *netto reaktionen* er et dræn af et molekyle CO₂ per forvitret molekyle CaAl₂Si₂O₈:



Opdagelsen af denne nettosammenhæng tilskrives normalt Urey (1952) der ikke var opmærksom på, at den faktisk var blevet vist af Ebelmen i 1845.

Via pladetektonik bliver kalk og ler med tiden begravet og sidenhen bragt ned i Jordens indre, hvor høje temperaturer og højt tryk resulterer i, at reaktion (3) forløber mod venstre hvorved CO₂ frigives og delvis afgasses fra Jordens indre via vulkaner.

Hvis den kemiske forvitring ikke var styret af nogen vekselvirkning ville atmosfære-ocean systemet blive tømt for CO₂ i løbet af 300.000 år. At dette ikke er sket i Jordens historie er et resultat af vekselvirkningen mellem CO₂, forvitring og temperatur. Vekselvirkning mellem CO₂, kemisk forvitring og Jordens temperatur har altså på lange geologiske tidsskalaer (længere end 100.000 år) stabiliseret atmosfærens CO₂ indhold og Jordens temperatur. På kortere geologiske tidsskalaer kan CO₂-koncentrationen nok variere med ca. 20%, på grund af variationer i havcirkulationen, næringssaltkredsløbet og iskappernes udbredelse uafhængigt af silikat-forvitringsskredsløbet.

Klimamodeller for Jordens varme perioder

Der er i løbet af de sidste 10 år lavet en del atmosfæreberegninger af Kridt- og Palæogenklimaet med generelle cirkulationsmodeller. I disse modeller er de fortidige grænsebetingelser som CO₂-koncentration, orbital-parametre, geografi, topografi og vegetation etc. blevet specificeret. Tidligere kollega Matthew Huber, nu ved Perdue University i USA, har anvendt en af de nyeste koblede ocean-atmosfære-modeller bl.a. til at beregne temperaturen for 50 millioner år siden. Der er en rimelig overensstemmelse mellem den beregnede og observerede dybhavstemperatur for den givne CO₂-koncentration (Figur 5). Imidlertid er konklusionen fra dette og andre studier med simple modeller, at de høje temperature på høje breddegrader ikke kan opnås i det koblede ocean-atmosfære system for det givne CO₂ niveau (Figur 4). Dette på trods af at både is-albedo og vegetation-sne-albedo effekterne er med i beregningerne. For relativt højere CO₂-koncentrationer opnår man høje temperaturer ved polerne, men så overstiger temperaturene på lave breddegrader værdigrænserne fastlagt af klima-indikatorerne. I det koblede ocean-atmosfæresystem kompenserer varmetransporten i atmosfæren og oceanet hinanden. Der skal altså andre fysiske komponenter i spil for at temperaturstigningen på høje breddegrader er som den observerede. Forklaringen på høje temperaturer er endnu ikke kendt, men der er forskere der spekulerer på om det måske er skydannelsen på høje breddegrader der var årsagen. Denne skydannelse kunne være forårsaget lokalt af en øget mængde partikler i atmosfæren fra mere vegetation på høje breddegrader. Andre forskere mener de høje temperaturer skyldes ændret kosmisk stråling.

Konsekvenser for klimaforudsigelser

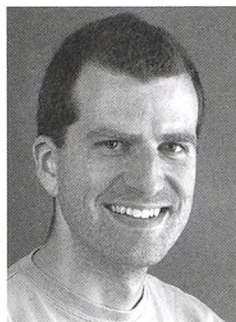
På basis af vores nuværende fysisk-baserede viden om indflydelsen af atmosfærens CO₂-koncentration på Jordens middeltemperatur og fordeling, kan vi ikke forklare den fortidige varme temperaturfordeling, hvor CO₂-koncentrationen var op til 4-5 gange højere end det nuværende niveau. De mest avancerede koblede ocean-atmosfære modeller undervurderer temperaturen på høje breddegrader. Der kan være tre forklaringer på dette: 1) De geologiske klima-indikatorer viser noget forkert. 2) Vores modeller mangler vigtige og/eller mere korrekte fysiske beskrivelser af f.eks. skydannelse. 3) Det var ikke alene atmosfærens CO₂-koncentration, der var årsag til det varme klima. Det er ikke særligt sandsynligt at de mange forskellige og uafhængige geologiske klimaindikatorer (punkt 1), alle skulle indikere for høje temperaturer. Vigtigheden af punkt 2 og 3 er sværere at evaluere, men har markante politiske implikationer. Hvis vores modeller er kalibreret forkert eller mangler vigtige fysiske komponenter for varmere klima end i dag, viser det os, at vores klimaprognoser for fremtiden højst sandsynligt undervurderer temperaturstigningen omkring polerne. Hvis det derimod viser sig, at der var andre vigtige drivhusgasser og aerosoler, der gjorde sig gældende før istiderne, må vi søge at finde frem til hvilke og forstå om de var tilstede som en følgevirkning af varmt klima eller klimaændringer. Vores forståelse af Jordens tidligere varme klima og nøjagtigheden af klimamodeller er stadig ufuldstændig. Mere forskning er påkrævet for at løse problemerne så vi med sikkerhed kan lave klimaprognoser for fremtiden.

Referencer:

- [1] Parrish, J. T. (1998), Interpreting Pre-Quaternary Climate from the Geologic Record, Columbia University Press.
- [2] Skelton, P. (editor) (2003), The Cretaceous World, Cambridge Univ. Press.
- [3] Zachos, J., et al. (2001), Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present, Science v. 292, s. 686-693.
- [4] Retallack, G. J. (2001), A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles, Nature v. 411, s. 287-290.
- [5] Royer, D. L., et al. (2001), Paleobotanical Evidence for Near Present-Day Levels of Atmospheric CO₂ During Part of the Tertiary, Science v. 292, p. 2310-2313.
- [6] Huber, M. og Sloan, L. (2001), Heat transport, deep waters, and thermal gradients: Coupled si-

mulation of an Eocene Greenhouse Climate, Geophysical Res. Let. v. 28, p. 3481-3484.

- [7] www.ngdc.noaa.gov/paleo/education.html
- [8] Olsen, S. M., Shaffer, G., and Bjerrum, C. J., in press. Ocean oxygen isotope constraints on mechanisms for millennial-scale climate variability. *Paleoceanography*.



Christian Bjerrum er adjunkt ved Geologisk Institut, Københavns Universitet og affilieret med DCESS. Hans faglige forskningsinteresser dækker numerisk modellering af Jordens biogeokemiske udvikling og af drivhusperioder i Jordens Historie.

PFEIFFER  **VACUUM**

Forskerens

**"One-Stop-Shop"
Massespectrometre:
massrange op til 2048 amu**

**Alt nødvendigt tilbehør:
Pumpesystem, In-let system,
kammer, ventiler, skueglas,
gennemføringer, fittings og
tryksensorer**

Helium læksøger QualyTest™

Mød os på DFS årsmøde

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

Foredrag i foråret 2005

Foredrag i Selskabet for Naturlærens Udbredelse – Hvor danskere er brudt igennem

Vi fortsætter temaet fra efteråret. Alle foredragene holdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, København K og starter kl. 19.30. Alle interesserede er velkomne til selskabets foredrag – det er ingen forudsætning, at man er medlem.

Den 24/1, foredrag om **August Krogh**, v/Professor, Dr.scient. *Erik Hviid Larsen*, August Krogh Instituttet.

Den 14/2, foredrag om **Inge Lehmann**, v/Professor *Claus Uffe Hammer*, Niels Bohr Instituttet fAFG.

Den 14/3, foredrag om **Niels Jerne** – v/Professor Thomas Söderqvist, *Medicinsk Museion, Københavns Universitet*.

Den 9/5, foredrag om **Emil Chr. Hansen**, v/Professor, PhD. Morten Kielland Brandt, *Carlsberg Laboratoriet*.

Den 30/5, foredrag om **Panum**, v/Professor, Dr.med., Albert Gjedde, *Århus Universitet*.

Se mere om Selskabet på www.naturvidenskab.net, hvor man også kan læse om foredragene. Forespørgsler angående møderne kan rettes til: Bente Egaa, UNI-C, Tlf.: 35 87 88 04 eller e-mail: snu@naturvidenskab.net

Foredrag i Astronomisk Selskab – En hinde af luft

Atmosfæren er en forudsætning for livet her på Jor-

den. Set med naturvidenskabelige øjne er atmosfæren omkring Jorden – og andre kloder i Solsystemet – et fascinerende forskningsobjekt. I denne foredragsrække beretter danske forskere om resultater fra deres videnskabelige arbejde med den tynde hinde af luft omkring Jorden og omkring kæmpeplaneterne Jupiter og Saturn samt deres måner: lysfænomener, vejr og klima.

Tina Christensen: Ozonlaget - Hvordan har patienten det? den 7/2 i København – 14/2 i Århus.

Henrik Svensmark: Solen og Jordens klima den 28/2 i København – 7/3 i Århus.

Anne Værnholt Olesen: Lysfænomener i atmosfæren den 4/4 i København – 11/4 i Århus.

Ib Lundgaard Rasmussen: Vejr og klima på gasplaneterne den 25/4 i København – 2/5 i Århus.

Hans Kjeldsen: Titan den 23/5 i København – 30/5 i Århus.

Foredragene finder sted kl. 19.15 på adresserne: København: Audtitoriet, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø. Århus: Matematisk Institut, Århus Universitet, Ny Munkegade, Bygning 530, Auditorium D, 8000 Aarhus C. Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Tycho Brahe Planetarium og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Michael Linden-Vørnle, Kristian Pedersen, Michael Quaade og Bjarne Thomsen.

Geofysikdag 2004

Susanne Lilja Buchardt og Karen Guldbæk Schmidt

Dansk Geofysisk Forening afholdt for tredje år i træk "Geofysikdag" for alle studerende med interesse for geofysik. Arrangementet [1] løb af stabelen den 12. november i Rockefeller Komplekset, Juliane Maries Vej 30 og blev til i samarbejde mellem Geofysisk Studenterforening (GSF) og Geofysisk Afdeling (GA), Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, Københavns Universitet. Dagen begyndte kl. 9.30 med indskrivning og uddeling af navneskilte, hvorefter der blev budt velkommen ved Karen Guldbæk Schmidt, formand for Dansk Geofysisk Forening.

Første session i programmet bestod af tre foredrag om modellering indenfor klima og meteorologi. Efter kaffepausen, hvor GSF havde bagt lækre kager til, fulgte en session med fire foredrag, der alle havde noget med satellitter og rummissioner at gøre. Det var første gang at vi havde præsentationer fra studerende tilknyttet Mars-gruppen ved Center for Planetforskning, KU.



Figur 1. Mange interesserede besøgende ved standene på virksomhedsmessen. Foto Kristoffer Leer.

Efter frokosten var der virksomhedsmesse og poster session. Følgende virksomheder var repræsenteret ved messen: Mærsk Olie & Gas, Danmarks Rumcenter (tidligere KMS og Dansk Rumforsknings Institut), Trimble, DMI (både vejrtjenesten og afdelingen for

oceanografi) og COWI. Der var generelt mange interesserede besøgende ved de forskellige stande og de studerende fik både slik, plakater og ikke mindst karriereidéer med hjem. Der var ikke så mange poster som de to sidste år, til gengæld var der nogle gode poster lavet af bachelorstuderende, det er glædeligt, at de yngre studerende kan bruge geofysikdagen til at øve sig i formidling.



Figur 2. To glade vindere, der er ved at pakke deres præmier ud. Kasper Kristiansen og Kristine Skovgaard Madsen. Foto Kristoffer Leer.

Dagens sidste session med studenterpræsentationer handlede om forskning relateret til iskerner, hvilket lagde op til emnet for aftenens festforedrag af Jørgen Peder Steffensen, GA, der blev afholdt efter en dejlig middag hos Kroghs Køkken på August Krogh Institutet. Inden foredraget blev der uddelt præmier for

bedste poster og bedste foredrag. Vinderne blev i år Kristine Skovgaard Madsen for sit foredrag om "8200-eventet" og Kasper Kristiansen for sin poster om Snowball Earth. Præmien var i begges tilfælde en dvd med filmen "The Day after Tomorrow".

Jørgen Peders foredrag havde den lidt provokerende titel: "Kan iskerner vælte regeringer?" Det var et festligt oplæg der gav stof til eftertanke og en god afslutning på en lang dag i auditoriet. Hans første slide viste sig tilfældigvis at være filmplakaten fra netop "The Day after Tomorrow".

Dagens begivenheder blev skyllet ned og drøftet over et par drinks i GSF's "Isbar", hvor der også blev plads til at høre musik, udveksle erfaringer på tværs af studieretninger og udfordringer i bordfodbold.

Der var ialt 82 deltagere i Geofysikdagen fra henholdsvis Geologi-geofysik (KU), Geologi (Aarhus Universitet), DMI, Geofysik (KU), Fysik (KU) og Kort & Matrikelstyrelsen. Det glædede os meget, at så mange tog turen til København fra Århus, og at der også var førstårsstuderende blandt tilhørerne. Mange af deltagerne udtrykte stor tilfredshed med arrangementet, der igen i år må siges at have været en stor succes.

Dansk Geofysisk Forening ønsker at takke alle sponsorerne fra Geofysikdagen: Mærsk olie & Gas, Danmarks Rumcenter, Trimble og COWI.

Litteratur

[1] www.gfy.ku.dk/~dgf/DGF_geofysikdag.html

TIDSKRIFTER & BOGSAMLINGER KØBES

Så som "Zeitschrift für Physik", "Annalen der Physik", "The Physical Review", ... også videnskabelige bogsamlinger samt kostbare enkeltbøger.

HERMAN H. J. LYNGE & SØN A/S
Internationalt Videnskabeligt Antikvariat siden 1821

Tlf.: 33155335 <http://www.lynge.com>



DNAs fysisk/kjemiske struktur kjent i 50 år

Olav Steinsvoll, Steinsvolls Materialforskning og IFE, Kjeller

Innledning

Verden ble tidlig oppfattet og beskrevet som bestående av levende og død materie. Tilsvarende vitenskaper utviklet seg, slik som de biologiske fagene botanikk og zoologi på den ene siden og astronomi, fysikk og kjemi på den andre. Arvelæren eller genetikken var et fag som forente de biologiske fagene. Det fikk en særstilling også mot de matematiske naturfagene ettersom en etter hvert innså at det måtte finnes en lineær genetisk kode som igjen måtte ha en fysisk/kjemisk materiell manifestasjon i form av et eller annet molekylært kompleks. Innenfor den døde materiens område fant man, særlig innenfor geologien, at de fleste faste stoffer hadde krystallinske strukturer. Den indre oppbygning av dem kunne derfor undersøkes med røntgenspredningsmetoder: atomene sto regelmessig "på geledd", og en fikk store forsterkningseffekter fordi de alle samvirket etter evne for å spre røntgenlyset. Krystaller av proteinet hæmoglobin var sett allerede i 1840 årene, men det var John Bernal som først satte røntgenlys på proteinkrystaller i 1935 ved det biokjemiske laboratorium ved Birkbeck College i London. I 1936 ble virusformer krystallisert og i 1940 undersøkt ved hjelp av røntgenspredning.

Denne heftige utviklingen ble brått stanset ved utbruddet av den annen verdenskrig da alle forskere ble trukket inn i militært utviklingsarbeid. Etter krigen tok det heldigvis ikke lang tid før dette forskningsarbeidet ble tatt opp igjen. Etter at det ble fastslått at DNA og ikke proteiner, var arvestoffet, skjønte man at DNA trådene, bøyelige som de er, likevel kunne betraktes som krystaller med endimensjonal karakter. De burde derfor kunne undersøkes med røntgenspredning. Den levende, bløte natur og harde, døde natur møtes derfor på dette mikroskopiske, krystallinske nivå. Her ligger koden som får liv til å oppstå, ta opp orden (selvorganisering), vokse til alle slags former, bevege seg og formere seg. Livet benytter seg av en utløst kaskade av proteinmolekyler som ikke har bevissthet, men som likevel nøyaktig utfører sine programmerte kjemiske oppgaver.

Et uerklært kappløp om å finne DNAs struktur

I anledning av femtiårsjubileet for oppdagelsen av DNA-molekylets struktur og virkemåte i 2003 er det kommet en inngående biografi om Rosalind E. Franklin, "the dark lady of DNA" (1), og som også tar for seg det historiske hendelsesforløpet. Det går frem at det utover i 1950-åra var et hektisk, "ikke erklært", kappløp mellom flere forskningsgrupper i England om

å være først til å finne den fysiske strukturen av DNA.

Nordmannen Sven Verner Furberg var en av flere som studerte ulike bestanddeler av DNA like etter annen verdenskrig. Hans doktorarbeid var en røntgendiffraksjonsstudie av et krystallinsk nukleosid, cytidine, hos Bernal ved Birkbeck College, University of London i 1949, publisert i 1950 (2). Hans viktige arbeid ble ikke fulgt opp ved Birkbeck. Deretter kom M. H. F. Wilkins, A. R. Stokes og H. R. Wilson ved Kings College i London, samt R. E. Franklin og R. G. Gosling, også ved Kings College. Kings College hadde et slags "gentlemans agreement" med de andre laboratoriene i England innen biokjemi om at det var det som skulle ta seg av DNA strukturen. Ressursene til grunnforskning var begrenset etter verdenskrigen, og en ville unngå unødig kostbar dublering. Men ved Cavendishlaboratoriet i Cambridge var det en biolog og en fysiker som "ikke kunne holde fingrene av fatet". Det var J.D. Watson og F.H.C. Crick. De skulle egentlig undersøke proteiner. I tillegg hadde Linus Pauling i California vært på banen en stund. Han var særlig kjent for å argumentere ut fra modellbygging av molekyler, men hadde mest arbeidet med proteinstrukturer. Det resulterte i hans berømte oppdeling av proteinforme i α -helikser og β -blad, eller krøller og båndformer (3). Dessuten hadde han tanker om at proteiner måtte ha noe å gjøre med arv, kanskje ved at proteiner dannet et slags "støpeformer" for DNA.

Cavendishgruppen fulgte Paulings vei som "venstrehåndsarbeid", og prøvde seg på modellbygging av DNA basert på størrelse, stereokjemi og bindingsforhold av molekyलगrupper som man visste inngikk i DNA. De to andre gruppene i London studerte DNA ved hjelp av røntgenspredning på to utgaver av DNA, A- og B-form i en løsning. Formene atskilte seg hovedsakelig i graden av "fuktighet" ved at A-formen var krystallinsk med lite vanninnhold mens B-formen var fiberaktig, "parakrystallinsk", og lik DNA i levende vesener. Crick hadde allerede i 1951 samarbeidet med teoretikerne W. Cochran og V. Vand for å finne matematiske uttrykk for det forventede spredningsmønster av ensfarget, altså monokromatisk røntgenlys fra en lang perlerad av atomer plassert med jevne mellomrom på en enkel helikstråd, en "vindetrapp" eller skruer (4). Ved de fleste undersøkelser av krystallinske mønstre ved hjelp av bølgefenomener som røntgenlys og nøytroner, sammenlikner man det eksperimentelle spredningsdiagrammet med teoretisk bølgespredning fra begrunnede matematiske strukturmodeller av stoffet. En tilpasser så den matematiske modellen inntil det spredningsdiagrammet den gir, med god tilnærming gjengir det

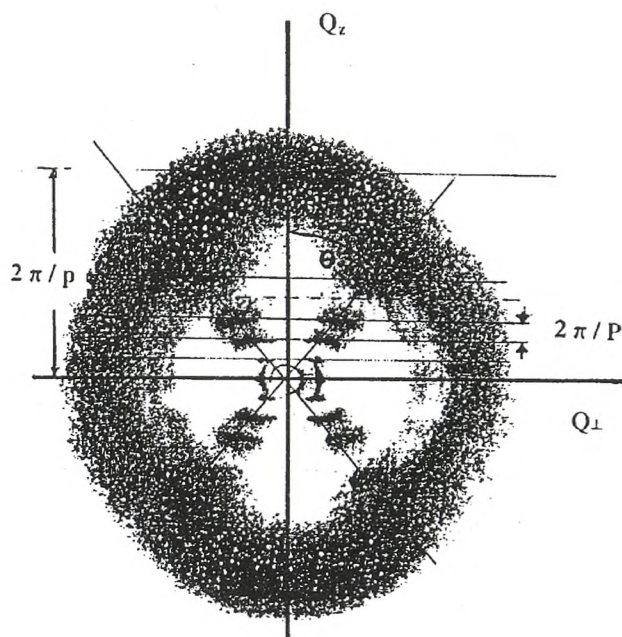
observerte diffraksjonsdiagrammet både når det gjelder intensitet og spredningsvinkler. Da sier en at en har løst strukturen for stoffet. Et røntgendiagram opptatt på Paulings protein, viste det karakteristiske X-mønsteret for helikser, i full overensstemmelse med formlene for spredning fra helikser.

En matematisk teori for spredning fra helikser var blitt særlig aktuell også fordi Furberg i sitt arbeid med cytidine, (pyrimidinbasen cytosine forbundet med et sukkermolekyl) fant at pyrimidinringene sto normalt på sukkerringene i motsetning til hva andre hadde funnet før krigen. Dette mente han var av stor viktighet for forståelsen av DNA-strukturen. Disse tankene utviklet han videre og foreslo en strukturmodell for DNA der en enkeltrådet heliks av nukleotider hadde aminbaseringsene vendt innover, liggende flatt oppå hverandre med avstander 3,4 Å, mens sukker- og fosfatdelene kjedet seg sammen og slynget seg på utsiden (5). Det var et langt og dristig skritt å slutte fra en krystallinsk utgave av en bestanddel av biomolekylet DNA til løsningsformen i dets naturlige omgivelser inne i celler, "in vivo".

Våren 1952 var Franklin allerede sikker på at B-formen av DNA var en dobbelheliks på grunnlag av det spredningsmønsteret hun hadde observert, men hun ville være helt sikker før hun publiserte dette. Hun kunne da sammenlikne sine røntgenbilder med forutsigelsene fra teorien året før, nemlig det karakteristiske X-mønsteret. Franklin visste ikke at en annen part, nemlig Watson og Crick, i hemmelighet, hadde "kikket henne i kortene" og sett X-en i hennes beste røntgendiagram. Det siste året fikk disse et forsprang og et solid grunnlag, et skjelett, for sin modellbygging. Da "boblen sprakk" i februar 1953, og Crick og Watson skulle publisere sin artikkel, ble rivaliseringen dekket til ved at alle tre gruppene fikk trykke sine bidrag i samme nummeret av Nature (6, 7, 8). En nærmere utdyping av mulighetene som dobbelheliksen innebar for å forklare genetiske forhold, kom en måned senere (9). Her foreslås "glidelåsmodellen" for kopiering av DNA under celledelingen. Artikkel (10) fra Franklins hånd et par måneder etter, viser igjen at det var tett mellom lagene på "oppløpssiden". Her viser Franklin sin grundighet ved å bevise at også A-formen av DNA er en dobbelheliks. Det beste spredningsbildet til Franklin for B-formen, # 51, er gjengitt her, se figur 1. Dette bildet er svært godt og viser hvor flink Franklin må ha vært i å gjøre slike kompliserte opptak. Bare opplinjeringen av DNA-trådene må ha vært en vanskelig oppgave, og måtte holdes ved like dag og natt i flere døgn under opptak. Vi har lagt inn en del hjelpelinjer i diagrammet.

Etter sin ureglementære, "tyvikkling" i Franklins beste spredningsdiagram kunne Crick med en gang si med sikkerhet at DNA virkelig opptrådte som en dobbelheliks i B-formen. Dette flotte bildet viser på en gang både formen og i en viss grad, den indre strukturen av DNA. Dette brukte Watson og Crick så halvt i hemmelighet til å bygge videre på sin dobbelheliks

modell. Deres viktige bidrag var å knytte sammen nukleotidbasene av typene purin og pyrimidin (adenin med thymin, A-T, og guanin med cytosin, G-C) på tvers av heliksaksen ved hjelp av hydrogenbindinger etter å ha fått tips av Jerry Donohue om tautomere former av aminbasene. Ved å bruke keto formene passet basene sammen som "hånd i handske". Inntil da hadde de brukt enol formene under modelleringen uten å få tilpasning. Dette går igjen i alle lærebøker, men for en fysiker vil det kanskje være av interesse å se hvordan man av Franklins røntgenbilde kan ta ut alle fysiske parametre for DNA. DNA-oppgagelsen ligger i skjæringspunktet mellom fysikk, biokjemi og krystallografi. I artikkel (11) fins en omfattende utredning om dette. Vi vil her bare forsøke en populær forklaring.



Figur 1. Det fine diffraksjonsbildet til Rosalind Franklin av DNA, # 51, sett i monokromatisk røntgenlys, fra (8). Vi har tegnet inn noen ekstra hjelpelinjer, en Q_z -akse i z -retningen og en akse $Q_\perp$ normalt på denne, og to andre linjer som danner en X og går gjennom svertningsområdene på filmen. Vinkelen mellom X-benene er 2Θ . Θ blir faktisk stigningsvinkelen α for DNA heliksen, se figur 4. Legg merke til at det også fins større svertningsområder aller øverst og nederst på filmen.

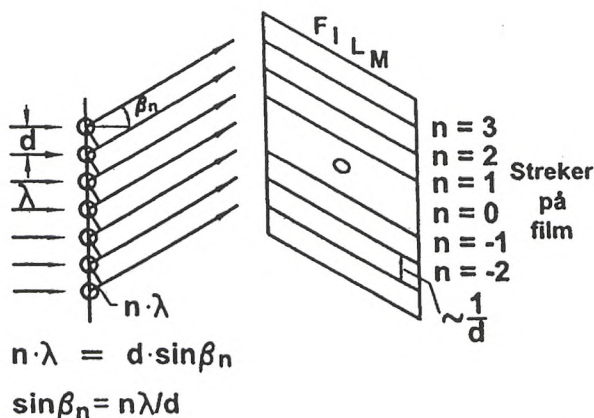
Analyse av røntgenspredningsdiagrammet til Rosalind

Franklin Franklin hadde fått et natriumsalt av DNA fra en sveitsisk biokjemiker, R. Signer. Prøven var en samling av parallelle DNA-fibre som inneholdt en viss mengde vann som isolerte hver fiber fra de andre. En kunne derfor gå ut fra at hver enhet opptrådte enkeltvis under røntgenspredningen. Prøvefibre ble holdt vinkelrett på det ensrettede røntgenlyset, i z -retningen, og utbredelsen av den spredte lyset fra prøven ble målt med et røntgenkamera der prøven lå

i sentrum og røntgenfilmen langs veggen, normalt på primærlyset. Der det spredte lyset treffer, blir det svertning, se røntgenspredningsdiagrammet i figur 1.

For å tyde diagrammet til Franklin, har en tegnet en del hjelpelinjer i figuren for å framheve bestemte symmetriegenskaper ved spredningen. Vi har lagt inn en serie parallelle, ekvidistante "horisontale" linjer gjennom de diffuse svertingsfleckene. Dessuten har vi lagt inn to kryssende linjer gjennom flekkene og sentrum av diagrammet. Man får en X i diagrammet med åpningsvinkel 2Θ mellom benene.

Endimensjonalt atomgitter:



Figur 2. En rad med spredningselementer med jevn avstand d langs en rett linje mottar ensrettet røntgenlyset med bølgelengde λ normalt på raden. Strengen virker som et optisk gitter og sprer lyset etter formelen: $n\lambda = d \sin \beta_n$, der $n\lambda$ er veilengdeforskjellen i de ulike lysbuntene av orden n . Bølgevektorene $\mathbf{k}'$ til det spredte lyset ligger langs veggen av konuser med orden n med felles akser langs strengens retning og med spissen i strengens sentrum, der β_n er vinkelen mellom en vilkårlig $\mathbf{k}'$ og "horisontalplanet" i figuren.

Spredning fra en lineær samling av elementer

Når en har en uendelig serie like, små spredningselementer plassert med jevne mellomrom d langs en rett linje (for eksempel en streng av atomer) og sender røntgenlyset med bølgelengde λ normalt på linjen, vil arrangementet oppføre seg som et endimensjonalt optisk gitter overfor lyset og spre det. Hvert element blir opphav til elementærbølger som sendes ut i kuleform. De vekselvirker konstruktivt i bestemte retninger. På en vegg, bak strengen av elementer, vil vi derfor få en serie av linjeformede lysrefleksjoner med utstrekning normalt på både raden av elementer og innfallende stråling. Disse gir svertninger på en røntgenfilm langs linjer med jevne mellomrom. En kan gi dem ordenstall n , og de grupperer seg etter formelen

$$n\lambda = d \sin \beta_n \quad \text{eller} \quad \sin \beta_n = \lambda n(1/d) \quad (1)$$

der n er et heltall (0, 1, 2, ...). Ved heltallig bølgelengdeforskjell, $n\lambda$, er elementærbølgene fra de enkelte elementene i fase. β_n er spredningsvinkelen for

orden n , se figur 2. Avstanden mellom linjene på filmen blir proporsjonal med $(1/d)$. Raden av elementer kan tydes som en endimensjonal samling enhetsceller med lengde d der "innmaten" i cellene bare er ett element. Innkommende retning og egenskapene til det monokromatiske lyset kan beskrives ved hjelp av dets bølgevektor, $\mathbf{k} = [2\pi/\lambda]$. Bølgevektorene $\mathbf{k}'$ til de spredte bølgene vil egentlig ligge som stråleknipper på konsentriske konuser av orden n med trinnvise minkende åpningsvinkler, $2(90 - \beta_n)$, sentrert på prøven. En har $k' = k$ fordi spredningen er elastisk eller uten energioverføring.

Innføring av et resiprokt rom og mønster

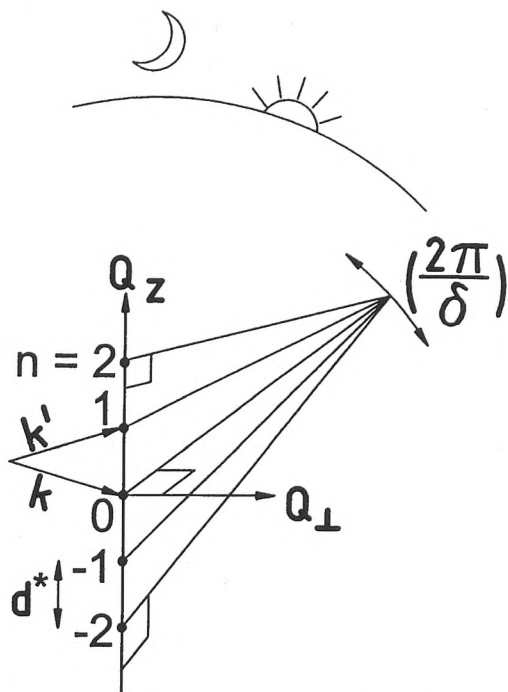
Betingelsen for spredning, formelen i [1] kan vi omskrive til:

$$\begin{aligned} \sin \beta_n &= n(2\pi/d)(\lambda/2\pi), \text{ eller} \\ k' \sin \beta_n &= n d^* \end{aligned} \quad (2)$$

Man kan si at en tilordner det reelle endimensjonale systemet en såkalt resiprokt gittervektor $\mathbf{d}^*$ som har samme dimensjon som bølgevektoren $\mathbf{k}$, nemlig $(1/\text{lengde})$. $\mathbf{d}^*$ er en vektor rettet langs strengens akse, nå kalt Q_z -aksen. Strengen befinner seg nå også i et endimensjonalt resiprokt rom. Oppover Q_z -aksen forestiller vi oss et regelmessig mønster av resiproke punkter med avstander d^* . Ligning [2] gir betingelsen for elastisk lysspredning i dette endimensjonale rommet: en sluttet, likebent trekant der $\mathbf{k}'$ er hypotenus, $n\mathbf{d}^*$ katet og β_n motstående vinkel. For de små vinklene som det dreier seg om her, kan vi sette $\sin \beta_n = \beta_n$, og den andre "kateten" er $\mathbf{k}$. Retningen for $\mathbf{k}'$ vil søke ut og "lande" på det resiproke mønstret for spredning. Impulsen for røntgenlyset kan skrives $\mathbf{s} = \mathbf{k} h/2\pi = \mathbf{k} \hbar$, der h er Plancks konstant. I det resiproke rommet ser det derfor ut som røntgenlyset er partikler som treffer harde vegger og får impulsendringer $\mathbf{k} \hbar \beta_n = \hbar \mathbf{q}$ ved elastiske støt.

Med utgangspunkt i det endimensjonale resiproke rommet ovenfor vil vi nå utvide våre begreper ved å forestille oss et tilordnet tredimensjonalt resiprokt rom med sentrum i skjæringspunktet mellom strengens akse og retningen av innkommende røntgenlyset. En enhetsvektor som står normalt på både $\mathbf{k}$ og $\mathbf{Q}_z$, kalles $\mathbf{Q}_\perp$. Lengden og retningen av en resiprokt gittervektor på tvers av $\mathbf{Q}_z$ -aksen er ukjent, men denne må ha noe å gjøre med strengens utstrekning på tvers av z -aksen, la oss si en tykkelse δ . Ettersom denne er svært liten, kan vi foreløpig anta at den resiproke vektoren, $2\pi/\delta$, er uendelig stor og har ukjent retning, se figur 3. Dette betyr at vi ikke lenger bare har å gjøre med resiproke mønsterpunkter langs z -aksen som oppfyller ligning [2], men har alle punktene i en serie parallelle plan med avstander d^* normalt på z -aksen som mulige endepunkter for bølgevektoren $\mathbf{k}'$ for det spredte røntgenlyset, slik at det likebente triangelet blir realis-

ert. Vi har fått en ny forklaringsmodell på at vi får svertning langs regelmessige striper på røntgenfilmen.

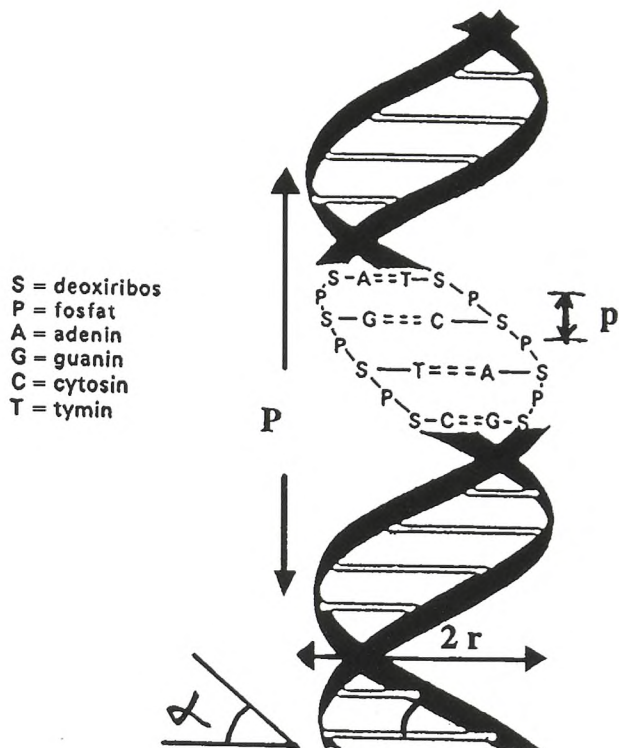


Figur 3. I et tredimensjonalt resiprokt rom ligger en rekke resiproke punkter langs Q_z som tilhører en streng av atomer med retning langs z -aksen. Strengen har en endelig, men svært liten tykkelse δ . En resiprok vektor $(2\pi/\delta)$ som er knyttet til tykkelsen, blir svært stor og rettet normalt på z -aksen. Retningen er ikke bestemt, og den kan ligge hvor som helst langs horisonten. Linjer trukket mellom de resiproke punktene på z -aksen og en tilfeldig posisjon av $(2\pi/\delta)$, inneholder mulige "landingspunkter" for k' . I det generelle tilfellet blir et mønster av parallelle plan, normalt på Q_z -aksen, derfor mulige "landingssteder" for k' .

Mønstersettet av parallelle resiproke plan blir den fullstendige resiproke gjengivelse av det lineære, oppstykkede reelle mønster, nemlig en streng av atomer. Bildet passer svært bra når vi har å gjøre med en prøve som består av en hel bunt av parallelle polymerfibre, rettet langs z -aksen. Fibrene oppfører seg som krystallitter i en pulverprøve, - eller som iskrystallene som glimter i solen i snøen på det norske påskefjellet !

Betraktningene ovenfor gjelder for det ekstreme tilfellet der $\delta \rightarrow 0$. I stedet for bare ett spredningselement innenfor enhetscellen, la oss si ett atom, har vi i det virkelige tilfellet DNA å gjøre med en komplisert samling av mange atomer med et eget ordningsmønster (monomerenheten) som gjentar seg fra celle til celle, og polymeren tillegges en endelig tykkelse. Spredningen fra alle atomene i en celle setter seg sammen til en resultant som kan vekselvirke konstruktivt med tilsvarende resultanter for alle de andre cellene langs fiberen. Et slikt konstruktivt samvirke vil bare skje i bestemte retninger langs spredningskonusene og kan beregnes. Resultatet av en slik beregning kalles strukturfaktoren, og den blir forskjellig for hver refleksjon av orden n . Uttrykket inneholder også en fasefaktor. Dette betyr at k'

bare kan ha bestemte retninger i det resiproke rom og må lande på de resiproke planene. I slike fellespunkter oppfylles alle tre betingelsene som stilles: gjenspeilleg av en lineær polymer streng med en endelig tykkelse og elastisk spredning av røntgenlyset. Røntgenfilmen i kameraet får flekkvis svertning.

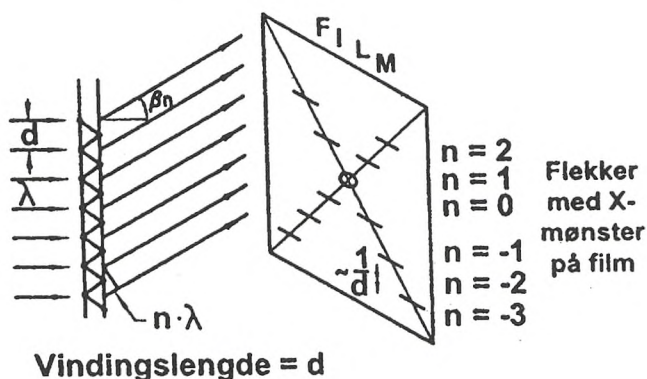


Figur 4. DNAs dobbelheliks der fosfat-sukker kjedene -S-P-S- danner vangene i vindeltrappen og baseforbindelsene T-A og G-C danner trappetrinnene. Vindingslengden for heliksen er P . Høyden på trinnene er p , og det fins litt over 10 trinn per lengdeenhet P . De to vangene er litt, $(P/8)$, forskjøvet i forhold til hverandre. Dette gir opphav til spredningseffekter som bare kan forklares ved å anta at DNA er en dobbelheliks. Stigningsvinkelen for trappen er α som finnes igjen som β i røntgendiagrammet, figur 1.

Sammenligning med Franklins røntgendiagrammer

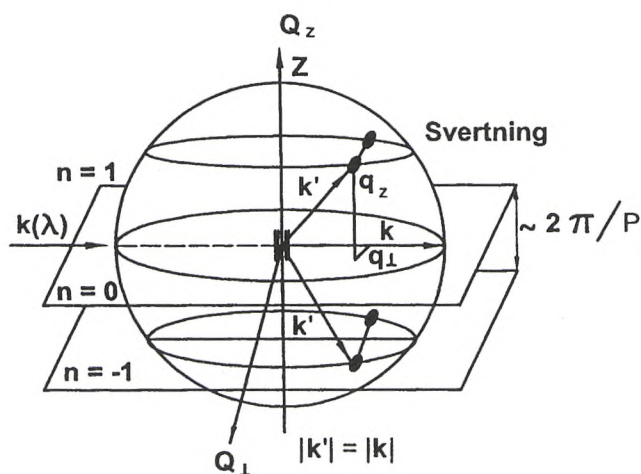
Den jevne plasseringen av spredningsflekker i z -retningen i Franklins diagram kan derfor skyldes et endimensjonalt lineært ordensfenomen med enhetscelle $d1$ langs DNA fibre. Vi antar derfor at strukturen av DNA er en polymer der P er lengden av enhetscellen (monomeren). Det viser seg at en heliks, en jevn skrue med vindingslengde ("pitch") $d1 = P$, kan tilfredsstille denne betingelsen. Skruvegjenget gjentar seg jo selv stadig om igjen langs aksene, se figur 4 og 5. Ved studium av polymerer med lang repetisjonsavstand finnes refleksjonene ved små spredningsvinkler ifølge formel (2). Det er grunnen til at Franklin i forberedelsene til sitt arbeid med DNA, brukte lang tid på å skaffe seg en kraftig røntgenkilde der lyset kunne avgrensnes med små åpninger, kollimatorer, slik at det gjennomgående røntgenlyset ikke overdekket refleksjonene ved den minste vinkelen β_1 .

DNA-polymer (en heliks):



Vindingslengde = d

Figur 5. En DNA-fiber består av en "uendelig" lang heliks med vindingslengde P . Ved å anta at vindingslengden er størrelsen d av en enhetscelle, kan man forklare refleksjoner av røntgenlys fra en fiber med samme formelapparat som i figur 2.



Figur 6. Diffraksjonsgeometrien i det reelle og det resiproke rom. Prøven ligger med fibre på tvers av røntgenlyset langs z -aksen i midten av kameraet. Enstrømt røntgenlys med bølgevektor $\mathbf{k}$ kommer inn mot prøven. Prøven har periodiske vindinger med "bølgelengde" P langs z -aksen eller enhetsceller med lengde P . Det resiproke bildet av prøven blir et sett av parallelle plan med mellomrom $2\pi/P$ langs x -aksen, som kan benevnes av orden $n = 0, \pm 1, \pm 2$, osv. For elastisk spredning av lyset må dets bølgevektor $\mathbf{k}'$ ende på skjæringskurven mellom den såkalte Ewald-kulen med radius k rundt origo og de resiproke planene som representerer prøvens egenskaper. "Innmatten" av en enhetscelle bestemmer så hvor på skjæringskurven $\mathbf{k}'$ må ende for å få røntgenspredning. I figuren har vi tegnet inn fire mulige svertningsområder på filmen. Der kan vi lese av komponentene $q_{\perp}$ og q_z for spredt bølgevektorvektor og utlede størrelsen av P og p i Ångstrøm. Tilsvarende konstruksjoner kan vi lage for alle resiproke plan, "oppover og nedover". Vi ser at den geometriske modellen gir innblikk i hvordan Rosalind Franklins røntgenbilde skal tydes.

For en heliks kan en regne ut hvor mye det spredte

lysets bølgevektor $\mathbf{k}'$ avviker i en retning $\mathbf{Q}_{\perp}$ normalt på planet gjennom $\mathbf{k}$ og z -aksen, se figur 1 og 6. Det viser seg at flekkenes posisjon på linjer med ordenstall n blir bestemt av maksima av Besselfunksjoner $J_n(q_{\perp}r)$, der r er radius av heliksen og $q_{\perp}$ er $\mathbf{k}'$'s komponent langs $\mathbf{Q}_{\perp}$. Disse funksjonene har maksima for stadig stigende verdier av argumentet for økende verdier av n . Ved å anta en heliksform for DNA molekylet, kan vi derfor forklare svertningsflekkenes og deres regelmessige forskyvning utover langs linjene. I Franklins diagram er svertningen diffus og uttrukket fordi alle fibrenes akser ikke var helt parallelle med z -aksen. En god innføring i spredning av røntgenlys fra helikser finnes i (12).

En kan også forklare hvorfor forskyvningen blir så regelmessig at vi kan tegne en X gjennom den. Folder vi ut heliksen i et plan, blir den en rett stigende linje med stigningsvinkel α , der $\tan \alpha = P/2\pi r$. Det blir et omvendt proporsjonalt forhold mellom r og α . Det samme forholdet eksisterer mellom r og $q_{\perp}$ i Besselfunksjonenes argument. Av figur 2b ser vi dessuten at $q_{\perp}$ er et mål for vinkelen Θ . Det viser seg at åpningsvinkelen mellom benene på X-en, $2\Theta = 2\alpha$. Måler vi Θ , får α , og vi kan regne ut r . Franklin fant $r = 12 \text{ Å}$ og $P = 34 \text{ Å}$.

Et ekstra mønster og uregelmessigheter i diagrammet til Franklin. Chiralitet.

Ser en nøyere på spredningsdiagrammet, figur 1, finner man øverst og nederst en enkel stor flekk, og bruker vi samme tenkemåten som ovenfor, kan dette skyldes et annet ordensfenomen langs heliksen med $n = 1$ og lengde $d/2 = p$, altså en førsteordens refleksjon der $p < P$ slik at $1/p > 1/P$. Innenfor en vinding av DNA gjentas nukleotidene med jevne mellomrom langs molekylet som trinnene i en vindetrapp, og det må være dette mønsteret som gjenspeiles i spredningsdiagrammet, se figur 4. Det tunge atomet fosfor inngår i nukleotidene og gir det største bidraget til spredningen. En får plass til 10 linjer som skyldes mønstret med enhet P mellom hullet i midten ($n = 0$) og de to store flekkene som skyldes mønstret med enhet p . Vi utleder derfor at langs en vinding av DNA vrir det seg 10 (nøyaktigere 10.8) nukleotider med sine baser.

Dessuten mangler det svertningsområder langs X-en for $n = \pm 4$. Dette avslører at DNA er en dobbelheliks der to komplementære, lange polymerkjeder slynger seg rundt hverandre. Hver heliks vil spre lyset etter formelen beskrevet ovenfor, men ettersom de står så nær hverandre, vil spredningseffektene interferere, og en får forsterknings og utslukkingseffekter. Settes det inn en faseforskyvning $\Delta = 3P/8$ mellom to spredte bølger i Cochrans formel fra (4), blir $n = 4$ refleksjonene utslukket. Dette viser at de to heliksene er forskjøvet $3P/8$ i forhold til hverandre langs den felles z -aksen. Dette kan en også se av usymmetrien i "slyngningene" i figur 4.

Både A- og B-utgaven av DNA heliksen er en

høyregjenget heliks. Dessuten fins det en hel rekke modifikasjoner som B', C, C', D og E som alle er høyregjenget. Dette er karakteristisk for alt levende på jorden. En høyregjenget skrue kan ikke dekke en venstregjenget selv om en snur og vender på den! Dette observerte allerede Louis Pasteur da han studerte vinsyrekrystaller og fant at de kom i to enantiomere former som forholdt seg til hverandre som høyre og venstre handske. Egenskapen kalles chiralitet og forekommer hos kjemiske forbindelser som ikke er identiske med sitt speilbilde. Paulings α -heliks for proteiner er også høyregjenget. De fleste av naturens helikser er altså høyregjenget. Men det fins i tillegg en venstregjenget DNA utgave, såkalt Z-DNA.

Oppsummering

Rosalind Franklins oppsiktsvekkende gode diffraksjonsdiagram gir alle data vedrørende DNA i B-form: Det er en dobbelheliks med enhetscelle 34 Å lang (en vinding, "pitch"), diameter 24 Å, og det fins 10 spredende enheter langs en vinding av heliksstrengen, se figur 3. Dette stemmer presis med Sven Furbergs forutsigelse av avstanden mellom baselagene (5) da han foreslo en enkel heliksmodell for DNA. Mellom 1900 og 1930 hadde en allerede funnet at DNA var en polymer der enheten, monomeren, var et nukleotid bestående av et deoxyribosesuktermolekyl bundet til et fosfatmolekyl med enten en purin- eller pyrimidin aminbase festet til sukkeret. Det er altså disse som danner "granuleringen" langs strengen. Polymeriseringen skjer ved kovalent binding mellom sukkeret og fosfatgruppen. Både DNA og proteiner (polypeptider) er lineære, ikkeforgrenete polymerer. DNA kan ha meget høy molekylær vekt, noen millioner atomenheter (a.u.), mens proteiner sjelden når opp til 2000 atomenheter.

Med utgangspunkt i Franklins struktur som Crick og Watson hadde "tyvlånt", fortsatte de videre med sin modellbygging og fant at det passet stereokjemisk at det mellom aminbasene ble dannet hydrogenbindinger. Franklin hadde ett år før med sine målinger lagt grunnlaget for skjelettet i deres modell. Hadde hun og Wilkins samarbeidet bedre, og hadde de prøvd seg på modellbygging, ville de sikkert ha funnet hele løsningen.

Etter at James Watson hadde publisert sin skandaløse, men berømte bok "The Double Helix" i 1968 (13) der Rosalind Franklin ble beskrevet som mannevond, stivsinnet og lite samarbeidsvillig, gikk Franklins student, nå professor Sir Aaron Klug, ut med en varm omtale av Rosalind Franklin i Nature (14) og mente at Watson bare fortalte den ene delen av historien og at en kommentar i Nature (15) ikke ytte Rosalind Franklin rettferdighet. Flere år seinere, i en artikkel i Nature (16), viste Klug hvor nær Franklin var til å finne den fullstendige strukturen av DNA. Han refererte da til artiklene (8) og (10) og det han hadde funnet ved å gå gjennom Franklins etterlatte loggbøker og no-

tater. Anne Sayre fra USA som hadde vært en nær venninne av Franklin i mange år, tok også til gjenmæle mot Watsons beskrivelsen av henne i sin bok (17). Brenda Maddox (1) mener at den nedverdiggende omtalen av Rosalind Franklin var utslag av dårlig samvittighet for Watsons del og var skrevet for å rettferdiggjøre deres ureglementerte bruk av hennes diagrammer. Rosalind E. Franklin døde alt for ung av kreft, 38 år gammel, den 16. april 1958 og fikk derfor ikke anledning til å få den Nobelprisen hun så absolutt hadde fortjent sammen med Watson, Crick og Wilkins i 1962.

Etterord

Det var en viss matthet blant fysikere etter at atombomben var kommet inn på verdensarenaen under den andre verdenskrigen og dominerte verdenspolitikken. I stedet for å tenke ut masseødeleggelsevåpen for megadød ble det viktigere å anvende fysikk på livsprosessene. Interessen blant fysikere for biologi etter andre verdenskrig ble også tent av Erwin Schrødingers bok "What is life?" fra 1944 (18). På den annen side fins det passasjer i denne boken som antyder at han tror at livsprosesser kanskje ikke kan beskrives med vanlige fysiske lover. Det var drøy kost i det tyvende århundret. Allerede fra begynnelsen av nittentyeårene hadde fysikere gått inn på medisinsens område ved å undre seg over hvordan ioniserende strålings virkning på celler og biologisk vev og fremkalling av mutasjoner kunne forklares. Dette resulterte tidlig i teorier som ble kalt "Quantenbiologie", "Targettheory" eller "Trefferteorie" i europeiske, særlig tyske kretser. En av opphavsmennene var biofysikeren Friedrich Dessauer (19) og teorien ble utviklet videre av flere forskere (20, 21). Den kan lettest forstås som et slags "biologisk" Rutherfordeksperiment der det gjaldt å bestemme størrelsen og følsomheten av styringssentret i celler, selve kjernen, ved å se på stråledose/ virkningskurver

Oppdagelsen av strukturen og virkemåten av DNA la et helt nytt grunnlag for radiobiologien. Jeg selv ble "tent" på biofysikk høsten 1953 under en forelesningsserie på Universitetet i Oslo av den danske gjesteprofessoren Niels Arley (22). I forelesningskompendiet blir det henvist til DNA artiklene (6, 7, 8) i en liten fotnote, men ellers var det trefferteori som ble behandlet. Under et år som stipendiat ved Max Plancks Institut fuer Biophysik i Frankfurt, i året 1956/57 kom jeg senere midt opp i omveltningene innen radiobiologien. Selveste gamle, stråleskadde, professor Dessauer foreleste om "Quantenbiologie" i et kjellerlokale, mens de yngre kreftene oppdaterte oss studenter om de siste landevinningene innen molekylærbiologi noen etasjer over. Vitalisme, tåkeprat og flere spekulative teorier og vanskelige fremgangsmåter for å finne frem til de arvbærende biologiske enhetene ble ryddet av veien. Det viktigste var at man nå fant en lett forståelig, "mekanistisk" forklaring på hvordan DNA kunne lage identiske kopier av seg selv. Dette ledet forskningen inn i et nytt

og fruktbart spor som dannet den virkelige begynnelsen til faget molekylærbiologi.

I jubileumsåret er det kommet ut en bok av James Watson (23) som går gjennom hva som er skjedd innen molekylærbiologi og genforskning i løpet av de siste 50 årene. Bioteknologi er blitt storindustri. Dessuten har tidsskriftet Nature i anledning jubileet gitt ut en særtrykkssamling og oversikt over 50 år med DNA (24). M.H.F. Wilkins er nylig også kommet med sin selvbiografi (25). BBC har feiret 50 års jubileet for oppdagelsen av strukturen av DNA med programmer og nettsider (26).

Litteratur

- [1] Maddox, B. (2002), Rosalind Franklin, The dark lady of DNA, Harper Collins Publishers
- [2] Furberg, S. V. (1950), The Crystal Structure of Cytidine, Acta Cryst. bind 3, 325
- [3] Pauling, L., and Corey, R. B. (1951), Proc. U.S. Nat. Acad. Sci., bind 37, 241
- [4] Cochran, W. and Crick, F. H. C. (1952), Evidence for the Pauling-Corey α -helix in Synthetic Polypeptides, Nature bind 169, 234
- [5] Furberg, S. (1952), On the Structure of Nucleic acids, Acta Chem. Scand. bind 6, 634
- [6] Watson, J. D. and Crick, F. H. C. (1953), A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid, Nature bind 171, 737
- [7] Wilkins, M. H. F., Stokes, A. R. and Wilson, H. R. (1953), Molecular Structure of Deoxypentose Nucleic Acid, Nature bind 171, 738
- [8] Franklin, R. E. and Gosling, R. G. (1953), Molecular Configuration in Sodium Thyminonucleate, Nature bind 171, 740
- [9] Watson, J. D. (1953), Genetic implications of the Structure of deoxyribonucleic acid, Nature bind 171, 964
- [10] Franklin, R. E. and Gosling, R. G. (1953), Evidence for 2-chain helix in crystalline structure of Sodium Deoxyribonucleate, Nature bind 172, 156
- [11] Squires, G. L. (2003), The discovery of the structure of DNA, Contemporary Physics, bind 44, 289
- [12] Als -Nielsen, J. and McMorow, D. (2001), Elements of Modern X - Ray Physics, Wiley
- [13] Watson, James D. (1968), The Double Helix, Atheneum Publishers, N.Y.
- [14] Klug, A. (1968), Rosalind Franklin and the Discovery of the Structure of DNA, Nature bind 219, 808 og bind 219, 880
- [15] Hamilton, L. D. (1968), DNA: Models and Reality, Nature bind 218, 633
- [16] Klug, A. (1974), Rosalind Franklin and the double Helix, Nature bind 248, 787
- [17] Sayre, Anne (1975), Rosalind Franklin and DNA, W. Norton & co
- [18] Schrödinger, E. (1944), What is life?, Cambridge University Press, Ny utgave 1992.
- [19] Dessauer, F. (1954), Quantenbiologie, Springer-Verlag
- [20] Timofeeff-Ressovsky, N. W., und Zimmer, K. G. (1947), Das Trefferprinzip in der Biologie, S. Hirzel Verlag, Leipzig
- [21] Lea, D. E. (1947), Actions of Radiations on living Cells, Cambridge University Press
- [22] Arley, Niels (1953), Forelæsninger over Radiobiologi, Kompendium utgitt av Landsforeningen mot kreft i Norge
- [23] Watson, J. D. and Berry, A. (2003), DNA - The secret of life. NY Alfred Knopf
- [24] Clayton, J. and Dennis, C. (2003), 50 years of DNA, Nature Publishing Group
- [25] Wilkins, M.H.F. (2003), The third man of the double helix, Oxford University Press
- [26] 50 års jubileet for DNAs strukturbestemmelse ble feiret på BBCs nettsider med adresse: <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3937941.stm>



Olav Steinsvoll (født 1931), opprinnelig biofysiker, seniorforsker, dr. philos., popularisator av forskningsmetoder og -resultater, fhv. redaktør av tidsskriftet "Fra Fysikkens Verden", mangeårig bruker av nøytronspredning innen materialforskning, fhv. leder av Nøytronlaboratoriet, IFE, Kjeller, har ansvar for trekantsamarbeidet mellom Norge, Polen og Russland ved forskningsreaktorene i Dubna og på Kjeller.

Corioliskraften og Foucaults pendul

Peter Ditlevsen, Niels Bohr Institutet, Geofysisk Afdeling

Indledning

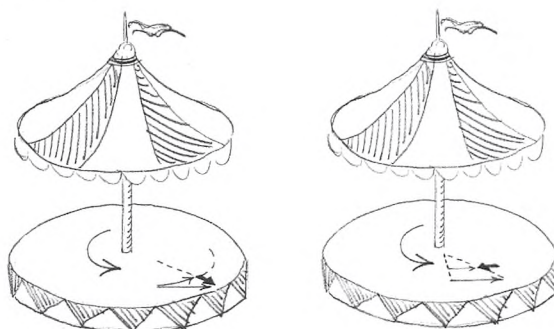
Ved verdensudstillingen i 1851 ophængte den franske fysiker Leon Foucault (1819-1868) et langt pendul fra kuplen i Pantheonkirken i Paris. Pendulet var det første instrument, som direkte viste at jorden roterer og at en lokalitet på jordoverfladen derfor ikke udgør et inertialsystem. Foucaults pendul er et ganske almindeligt pendul, der svinger så længe at vi kan iagttage jorden rotere under pendulets ophængspunkt. Pendulets bevægelse er relativt simpel at beskrive og iagttage og er derfor et godt eksempel for at forstå virkningen af de fiktive kræfter på jorden. Der findes et Foucaultpendul med offentlig adgang i Rotunden hos GEUS på Østervoldgade 10 i København.

Inertialsystemer

Newtons bevægelseslove gælder for bevægelser i forhold til inertialsystemer. Et inertialsystem er et koordinatsystem som enten ligger stille eller bevæger sig med konstant hastighed i forhold til "det absolutte rum". Postulatet om det absolutte rum (og den absolutte tid) er en af de mere vanskelige detaljer ved Newtons love, fordi vi ikke kan observere det. Hvis vi "observerer" det absolutte rum eller et andet inertialsystem ved at observere at Newtons bevægelseslove gælder i dette system laver vi en ringslutning. Når vi sidder med lukkede øjne og snurre rundt på en kontorstol er vi ikke i tvivl om at vi roterer, vi mærker altså at vi roterer i det absolutte rum. Ernst Mach forsøgte i 1893 at formulere sig ud af dette problem ved at referere til fjerne stjerner (eller fjerne galakser) frem for et ikke-observerbart absolut rum som reference for vores bevægelse. Dette kaldes "Machs princip". Problemet blev dog først fyldestgørende løst af Einstein med den generelle relativitetsteori. Her vil vi blot som Newton postulere eksistensen af inertialsystemer. I forhold til disse kan vi så måle positioner, hastigheder og accelerationer.

Fiktive kræfter

Bevægelsen af en partikel med masse set i forhold til et accelereret koordinatsystem kan beskrives med Newtons love hvis der kompenseres med fiktive kræfter som netop modsvarer massen gange koordinatsystemets acceleration. For et hvilket som helst accelereret koordinatsystem er der netop fire fiktive kræfter: Centrifugalkraften, Corioliskraften, en kraft, der modsvarer koordinatsystemets origo's acceleration og endeligt en kraft der modsvarer koordinatsystemets vinkelacceleration. Her skal vi kun beskæftige os med centrifugalkraften og Corioliskraften. De andre to vil være forsvindende små i de tilfælde vi undersøger i det følgende¹.



Figur 1. På den første karrusel er centrifugalkraften illustreret ved den fede vektor. For at følge karrusellen rundt i stedet for at følge den retlinjede inertielle bevægelse skal man påvirkes af en kraft som er modsat rettet centrifugalkraften. På den anden karrusel vil man ved en bevægelse radiale udad skulle øge sin hastighed for at følge med karrusellen, man mærker altså Corioliskraften illustreret ved den fede vektor. Totalt, som optræder i Corioliskraften, kommer fra at der er en ekstra faktor fra at koordinataksen, som følger karrusellen også flytter sig.

Centrifugalkraften er den udadrettede kraft vi mærker når vi sidder stille på en karrusel, som bevæger sig rundt. Hvis vi bevæger os rundt på en karrusel, som roterer mod urets retning, mærker vi yderligere en kraft mod højre i forhold til vores bevægelsesretning på karrusellen. Det er

¹En god matematisk udledning af de fiktive kræfter findes i Knudsen og Hjorth: "Elements of Newtonian Mechanics", Springer 2002.

²Hvis karrusellen roterede med uret, ville Corioliskraften virke mod venstre, men af uvist hvilken grund drejer alle de karruseller forfatteren nogensinde har set mod uret. Læsere med kendskab til en karrusel, der drejer med uret, opfordres til at viderebringe denne væsentlige oplysning til Kvants redaktion. Alternativt kan læseren komme med bud på en forklaring på dette "symmetribrud".

Corioliskraften². De to fiktive kræfter er illustreret i figur 1.

Newtons anden lov siger at accelerationen af et legeme er givet ved $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$, hvor $\mathbf{F}$ er kraften på legemet og m er massen. Det betyder at de fiktive kræfter i en accelereret referenceramme må være givet ved *massen* gange koordinatsystemets acceleration. Derfor er det enklere at operere med accelerationer i stedet for kræfter, altså at dividere massen ud af Newtons bevægelsesligning. Det vil blive gjort i det følgende.

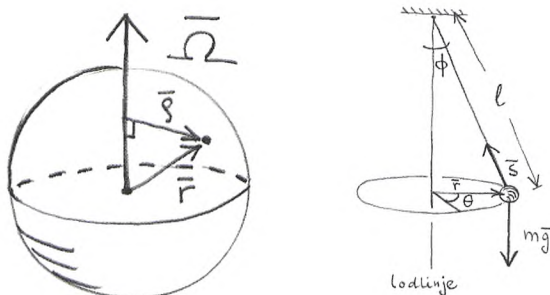
Foucaults pendul

Det er Corioliskraften fra jordens rotation som er på spil ved Foucaultpendulets bevægelse. Når vi beskriver pendulets acceleration $\ddot{\mathbf{r}}$ i et koordinatsystem som ligger stille på jordoverfladen har centrifugalaccelerationen og Coriolisaccelerationen følgende former:

$$\mathbf{A}_{ce} = \Omega^2 \rho \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_{Co} = -2\Omega \times \dot{\mathbf{r}} \quad (2)$$

Vektoren ρ peger fra jordens rotationsakse til punktet $\mathbf{r}$, og Ω er jordens rotationsvektor, se figur 2.



Figur 2. Venstre figur viser en partikels position $\mathbf{r}$ i et koordinatsystem med origo i jordens centrum som roterer med jorden. Vektoren ρ angiver afstand og retning fra jordens rotationsakse. Højre figur viser Foucaultpendulet, hvor origo er skæringspunktet imellem lodlinjen og svingningsplanet. Corioliskraften afhænger af hastigheden $\dot{\mathbf{r}}$, så den er uafhængig af hvor origo for det roterende koordinatsystems vælges. Positionen $\mathbf{r}$ kan angives med de to vinkler θ og ϕ (ikke at forveksle med breddegraden Φ).

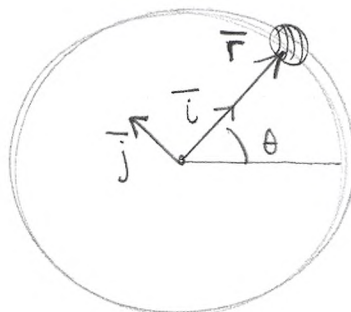
Pendulet er vist på figur 2. Det svinger på en (to-dimensional) kugleflade under påvirkning af tyngdekraften, de fiktive kræfter fra jordens rotation og en snorkraft som holder pendulet på kuglefladen. Summen af kræfternes komponent vinkelret på fladen giver anledning til accelerationen i retning af ophængspunktet og bestemmer snorkraftens størrelse. Den interessante bevægelse er

i kuglefladen. Vi betragter situationen med små udsving hvor kuglefladen kan tilnærmes ved en horisontal plan.

Hvis pendulet er i ro, vil Corioliskraften være nul og pendulets snor vil være en lodline og følge lodlinjen. Lodlinjens retning er givet ved summen af centrifugalkraften og tyngdekraften. Denne sum kan vi kalde den effektive tyngdekraft repræsenteret ved den effektive tyngdeaccelerationen $\mathbf{g}$, hvorefter vi kan glemme alt om centrifugalkraften fra jordens rotation. Newtons 2. lov for pendulets bevægelse i planen er:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{g}{l}\mathbf{r} - 2\Omega \sin \Phi \mathbf{k} \times \dot{\mathbf{r}} \quad (3)$$

Prikkerne betyder som sædvanligt differentiation med hensyn til tiden, g og l fremgår af figur 2. Det første led på højresiden er tyngdeaccelerationens komponent vinkelret på snoren. At betragte kuglefladen som en horisontal plan svarer til tilnærmelsen $\sin \phi \approx \phi$.



Figur 3. Pendulets position i planen kan beskrives i et polært koordinatsystem.

Det sidste led på højresiden er Coriolisaccelerationen, $\mathbf{k}$ er en lodret enhedsvektor og Φ er breddegraden. Se appendix for flere detaljer.

Vi indfører $2\Omega \sin \Phi = f$, hvor f kaldes Coriolisparameteren. Den optræder i ligningerne for ocean og atmosfærestrømninger og er af størrelsesorden 10^{-4} s^{-1} .

Polære koordinater

Nu kunne vi løse (3) direkte i et kartesisk koordinatsystem, men lad os i stedet opstille ligningerne i et polært koordinatsystem, der følger pendulet. I dette tilfælde har vi $\mathbf{r} = r\bar{\mathbf{i}}$ (se figur 3). Enhedsvektorerne $\bar{\mathbf{i}}$ og $\bar{\mathbf{j}}$ er tidsafhængige og ved en nem udledning fås:

$$\dot{\bar{\mathbf{i}}} = \dot{\theta}\bar{\mathbf{j}}, \quad \dot{\bar{\mathbf{j}}} = -\dot{\theta}\bar{\mathbf{i}} \quad (4)$$

(Vink: ligningerne kan enten udledes geometrisk eller ved at differentiere udtryk som $1 = \bar{\mathbf{i}} \cdot \bar{\mathbf{i}}$). Nu

får vi så venstresiden af (3) ved at differentiere to gange:

$$\begin{aligned}(\dot{r}\bar{i}) &= \dot{r}\bar{i} + r\dot{\bar{i}} = \dot{r}\bar{i} + r\dot{\theta}\bar{j} \\ (\ddot{r}\bar{i}) &= (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\bar{i} + (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta})\bar{j}\end{aligned}\quad (5)$$

Højresiden udtrykkes let i de polære koordinater, og vi får de to ligninger i radial (langs $\bar{i}$) og azimutal (langs $\bar{j}$) retning:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -\frac{g}{l}r + f r \dot{\theta} \quad (6)$$

$$2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} = -f\dot{r} \quad (7)$$

Alle andre led end $\ddot{r}$, som optræder på venstresiderne, er fiktive accelerationer som følge af at koordinatsystemet følger med pendulet, og derfor er accelereret. I (6) er leddet $r\dot{\theta}^2$ centrifugalaccelerationen, hvor fortegnet skifter fordi det flyttes til højresiden. Denne acceleration er udadrettet og af nøjagtig samme form som (1). Bemærk at $\dot{\theta}$ er vinkelhastigheden. I (7) er leddet $-2\dot{r}\dot{\theta}$ Coriolisaccelerationen. Sammenlign dette led med (2) og bemærk at de begge har form; $2 \times$ vinkelhastighed $\times$ hastighed. Det sidste led $-r\ddot{\theta} = -r\dot{\omega}$ har ikke noget navn. Dette led er nul for jordens bevægelse fordi rotationen er konstant ($\dot{\Omega} = 0$). Endelig findes der som tidligere nævnt en fjerde fiktiv acceleration. Den kommer fra at nulpunktet for vores koordinatsystem er accelereret (f. eks. jordens centrum i sin bane omkring solen). Den acceleration er en størrelsesorden mindre end de øvrige, så den ser vi bort fra. Vi har altså i dette tilfælde direkte udledt formen for fiktive kræfter. Det koordinatsystem vi benytter er accelereret i forhold til et i forvejen accelereret system (pendulet i forhold til jordoverfladen og jordoverfladen i forhold til et inertialsystem). De sidst udledte fiktive accelerationer skal altså ikke forveksles med de fiktive accelerationer som følger af at jorden roterer. Vi skal have begge dele med.

Løsninger til bevægelsesligningerne

Lad os først finde løsninger til ligningerne (6) og (7) for tilfældet $f = 0$, altså et pendul ophængt på en planet som Venus, der (næsten) ikke roterer. Her kan vi med det samme finde to løsninger,

$$(r(t), \theta(t)) = (r_0 \cos \omega t, \theta_0) \quad (8)$$

og

$$(r(t), \theta(t)) = (r_0, \pm \omega t), \quad (9)$$

hvor $\omega = \sqrt{g/l}$. Den første løsning er det matematiske pendul. Den anden løsning svarer til en jævn cirkelbevægelse, fortegnet beskriver løsninger med rotation mod (+) og med (−) uret set ovenfra. De to forskellige typer løsninger er vist på figur 4. I begge tilfælde er pendulperioden givet som $T = 2\pi/\omega$. Det er overladt til læseren at vise at centripetalaccelerationen i det sidste tilfælde præcis er den som fremkommer ved tyngdekraftens projektion. At pendulperioden er den samme i de to tilfælde er indlysende, hvis vi et øjeblik betragter pendulet i et fast (x, y) -koordinatsystem. I dette er den jævne cirkelbevægelse intet andet end en superposition af det matematiske pendul i henholdsvis x - og y -retningen. Da pendulets periode som bekendt er uafhængig af amplituden fås alle linearkombinationerne, elliptiske baner, med samme periode. Dette ræsonnement holder kun for små vinkler, hvor $\sin \theta \approx \theta$, men det vender vi tilbage til i en senere artikel.



Figur 4. Professoren illustrerer de to svingningsløsninger for det to-dimensionale pendul. Den sidste løsning er blot en superposition af det matematiske penduls svingning i to på hinanden vinkelrette retninger. ©Hergé/Moulinsart: De syv krystalkugler.

Nu vender vi tilbage til situationen hvor f ikke er nul. En løsning til (6) og (7) kan fås ved at antage $(r(t), \theta(t)) = (r_0 \cos(\alpha t), At)$, hvor α og A skal bestemmes. Indsættes dette fås,

$$(-\alpha^2 + g/l) \cos(\alpha t) = A(A + f) \cos(\alpha t) \quad (10)$$

$$(2A + f) \sin(\alpha t) = 0 \quad (11)$$

som har løsning, $A = -f/2$ og $\alpha^2 = g/l - f^2/4$. Hermed er Foucaultpendul-planets (det lodrette svingningsplan) omløbstid T_f , som kaldes en pendul-dag, bestemt fra $2\pi = |A|T_f = (f/2)T_f$ og vi får,

$$T_f = \frac{2\pi}{f/2} = \frac{2\pi}{\Omega \sin \Phi} = \frac{1 \text{ døgn}}{\sin \Phi} \quad (12)$$

hvor vi skal huske at 1 døgn i denne sammenhæng er et stjernedøgn = 23t 56 min. Hvorfor? Bemærk at denne løsning har negativ omløbsretning,

altså bevæger Foucault-pendulets svingningsplan sig med uret rundt (på den nordlige halvkugle). I København ($\Phi = 56^\circ N$) er omløbstiden 28t 53min. Vi kan umiddelbart, også uden at have fundet løsningerne, sammenligne størrelsesordenen for de forskellige led i ligningerne. Tidsskalaen for pendulets svingningstid må være af størrelsesorden $\tau_p = \sqrt{l/g}$, da det er den eneste størrelse af dimension tid vi kan konstruere fra de fysiske størrelser, der indgår (og det er jo netop pendulets svingningsperiode på nær en faktor 2π). For et pendul med $l = 10$ m har vi $\tau_p \approx 1$ s. Fra Coriolisaccelerationen har vi direkte tidsskalaen $\tau_f = f^{-1} \approx 10^4$ s, altså $\tau_f/\tau_p \approx 10^4$, så pendulet svinger frem og tilbage omkring 10.000 gange for hver gang pendulplanet roterer én gang rundt. (Hvis vi bruger den eksakte løsning for et 10 m pendul får vi $T_f/T_p = 16.717$).

Hvis vi i stedet sætter pendulet i bevægelse med en hastighed vinkelret på retningen til lodlinjen, kan løsninger som er jævne cirkelbevægelser også findes. Vi gætter på løsningen $(r(t), \theta(t)) = (r_0, At)$ og indsætter i (6). Bemærk at (7) er opfyldt for alle værdier af r_0 og A . Vi definerer igen $\omega^2 = g/l$ og får ligningen,

$$A^2 + fA - \omega^2 = 0 \Rightarrow$$

$$A = -\frac{f}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f}{2}\right)^2 + \omega^2} \approx \pm\omega - \frac{f}{2} \quad (13)$$

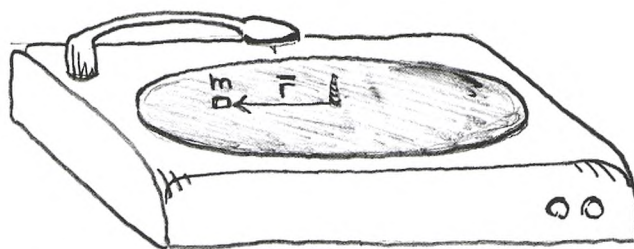
I dette tilfælde er symmetrien imellem rotation med og mod uret brudt. Som øvelse kan læseren opstille kraftbalancen i de to tilfælde. Disse to tilfælde har analogier i meteorologien.

Atmosfæren

Vi betragter vinden omkring et lavtryk. Her vil luften være påvirket af trykgradientkraften som peger ind imod centrum for lavtrykket. Trykgradientkraften erstatter tyngdekraften for pendulet, men er meget mindre. Trykgradientkraften, der presser luften fra områder med højt tryk mod områder med lavt tryk, er af samme størrelsesorden som Corioliskraften, så Corioliskraften spiller en stor rolle for vinden. I det meteorologiske tilfælde er f altså ikke længere en lille parameter.

Den ene løsning, rotation mod uret, kaldes et normalt lavtryk og i meteorologisk terminologi kaldes bevægelsen cyklonisk. Det er langt det mest almindelige. Den anden løsning, rotationen med uret (anti-cyklonisk) kaldes et anomalt lavtryk og er karakteriseret ved høje vindhastigheder. Hvorfor? Vink: opstil kraftbalancen imellem trykgradi-

entkraften, Corioliskraften og centrifugalkraften i de to tilfælde.



Figur 5. Partiklen ligger stille i forhold til stuen mens gramfonpladen roterer under partiklen

Havet

Et andet eksempel på Corioliskraftens indflydelse på bevægelser kommer fra oceanerne. Når en vandmasse strømmer, uden at være påvirket af kræfter i horisontal retning, vil impulsen i den horisontale bevægelse være bevaret. Det er en såkaldt inertialstrømning. Den fås som løsning til ligningerne (6) og (7) når der ikke er nogen kraft ind imod centrum (leddet $+r$ i (6) forsvinder). I det tilfælde får vi løsningen,

$$(r(t), \theta(t)) = (r_0, -ft). \quad (14)$$

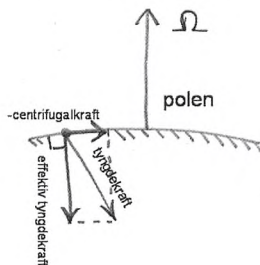
Det er altså en jævn (anti-cyklonisk) cirkelbevægelse, men med den dobbelte hastighed af Foucault-pendulplanets drejning, så omløbet tager kun en halv pendul-dag. Antag at vi havde en inertialstrømning i polarhavet præcis rundt om Nordpolen. En bølge i denne strømning vil bevæge sig med uret omkring polen på 1/2 dag. Dette er et overraskende resultat i forhold til hvad vi naivt skulle vente.

Den halve pendul-dag

Vi kan sammenligne med en gammeldags gramfon, figur 5. Hvis vi lægger en gnidningsfri partikel på gramfonpladen, således at partiklen ligger stille i forhold til stuen, så vil den bevare sin inertielle hastighed (som er 0). Set fra gramfonpladens koordinatsystem vil den udføre en jævn cirkelbevægelse med en omdrejningshastighed $(-\Omega)$ som er præcis det modsatte af gramfonens omdrejningshastighed (Ω) (altså en hel pendul-dag). Fra gramfonpladens synspunkt accelererer partiklen ind imod rotationsaksen i sin jævne cirkelbevægelse med accelerationen $\Omega^2 r$ hvor r er afstanden ind til aksen.

Denne acceleration følger af summen af centrifugalkraften på $\Omega^2 r$ væk fra rotationsaksen og Corioliskraften $2\Omega v = 2\Omega^2 r$ ind imod rotationsaksen.

Hvorfor får vi så en rotation med den dobbelte rotationshastighed i tilfældet med strømmingen på jorden? Det samme resultat ville vi få hvis vi forestillede os en kugle som rullede rundt om polen langs en breddegrad. Luk bladet, tag en kop te, og tænk over det inden du læser videre.



Figur 6. Jordens form er bestemt af at summen af tyngdekraften, som peger imod jordens centrum, og centrifugalkraften er vinkelret på overfladen. Denne form kaldes geoiden. Tyngdekraften tæt ved polen vil have en vandret komponent ind mod polen.

Svaret er at centrifugalkraften fra jordens rotation indgår i de kræfter, som virker vinkelret på bevægelsesfladen. Derfor skyldes acceleration i cirkelbevægelsen alene Corioliskraften. Den dobbelte omløbshastighed kommer af at bevægelsen foregår på den fladtrykte jord, geoiden, frem for på en kugleformet jord. Vi kan forstå situationen ved at betragte figur 6. Her er normalkraften til vandoverfladen, den effektive tyngdekraft, summen af tyngdekraften og centrifugalkraften. Hvis vi nu betragter situationen fra et inertialsystem, hvori jorden roterer, så vil tyngdekraft alene virke på partiklen. Tyngdekraften vil have en komponent parallel med overfladen rettet mod polen af størrelsen $\Omega^2 r$, nemlig modsat centrifugalkraften fra jordens rotation. Denne tiltrækning imod polen giver anledning til en jævn cirkelbevægelse omkring polen netop med rotationshastighed Ω . Da jorden roterer i dette inertialsystem med rotationshastigheden Ω , er partiklens rotationshastighed i forhold til jorden $\omega + \omega = 2\Omega$ (eller $\omega - \omega = 0$ hvis den bevæger sig samme vej rundt som jorden, altså ligger stille på jordoverfladen). Dette er et rigtigt godt eksempel på hvordan de fiktive kræfter kommer og går afhængigt af hvilket koordinatsystem vi betragter situationen fra.

Appendix

Coriolisledet i ligning (3) fremkommer fra

udtrykket $A_{C0} = -2\Omega \times \dot{\mathbf{r}}$ ved at bruge $\Omega = (\Omega \cos \Phi, 0, \Omega \sin \Phi)$ i et (øst-vest, nord-syd, op-ned) koordinatsystem beskrevet ved enhedsvektorerne $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$. Da bevægelsen foregår i det horisontale plan kan hastighedsvektoren skrives $\dot{\mathbf{r}} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$, hvor u og v er hastighederne i de to horisontale retninger. Coriolisaccelerationen bliver $A_{C0} = -2\Omega(\cos \Phi \mathbf{i} + \sin \Phi \mathbf{k}) \times (u\mathbf{i} + v\mathbf{j})$. Det er overladt til læseren at udregne at den horisontale komponent af accelerationen bliver som angivet i ligning (3).

Corioliskraftens komponent vinkelret på planen, som er ubetydelig i forhold til tyngdekraften, kompenseres af snorkraften. Snorkraften vil, da snoren er spændt, hele tiden være netop så stor at bevægelsen forbliver i planen (eller rettere på kuglefladen). Den varierer derfor hele tiden og kaldes med et fint ord en bibetingelseskraft. Bibetingelsen er at bevægelsen skal foregå i planen.



Peter Ditlevsen forsker i turbulent flow, atmosfærens og klimaets dynamik. Derudover underviser han i den klassiske mekanik ved Niels Bohr Institutet.

Naturens Verden

– søger forfattere til artikler indenfor astronomi og fysik

Er du interesseret i at skrive populærvidenskabelige artikler om dit forskningsområde til Naturens Verden? Læserne vil nemlig meget gerne have mere fysik og astronomi.

Teksten bør kunne forstås uden specielle forudsætninger og være lettilgængeligt for enhver gymnasieelev og den alment orienterede læser, som interesserer sig for naturvidenskab.

Artikler bør inkl. illustrationer højst fylde 8 trykte sider, hvoraf ca. halvdelen er illustrationer. Se vejledning på www.naturens-verden.dk

Interesserede forfattere kan kontakte:
Lone Bruun, lb@lb_fm.dk, www.lb_fm.dk
Dr. Priemes vej 10, 1.tv., 1854 Frederiksberg C.
Tlf. 3324 0100 eller mobil 2175 6628.

Nordisk Astrobiologi

Anja C. Andersen og Axel Brandenburg, NORDITA

Astrobiologi er en forholdsvis ny disciplin inden for astrofysik og dækker hele det område af astronomien som støder op mod biologi, biokemi, biofysik og visse områder af geologi og geofysik.

I år 2000 blev der dannet et europæisk netværk under navnet "The European Exo/Astrobiology Network Association" (EANA) [1], og i år 2002 fulgte Finland og Sverige så efter med "The Swedish Astrobiology Network" (SWAN) [2], og "The Finnish Astrobiology Network" (FAN) [3].

I år har NORDITA haft astrobiologi som ét af de nordiske projekter institutteret påbegynder jævnlige. Det har resulteret i to nordiske møder. Det første 2 1/2 dags møde blev holdt i København i januar med titlen "Astrobiological problems for physicists", hvor der udover fysikere også deltog biologer, geologer m.m. Mødet kunne delvis følges live på nettet og samtlige talks kan ses (eller genses) på NORDITAS webside [4].



Figur 1. Axel Brandenburg under mødet i København.

I starten af august blev det andet nordiske møde

afholdt i forbindelse med det årlige FAN møde på Turla Observatoriet i Finland, også herfra er samtlige talks tilgængelige via nettet [5].



Figur 2. Anja Andersen under det finske møde.

Næste møde vil blive afholdt 13.-15. januar i København på NORDITA/NBI og har titlen "Astrobiology and Origins of Life".

Deltagelse er åben for alle og tilmelding sker på [6]:

www.nordita.dk/conference/AstroBio2005/

Vi håber på at se mange af jer!

Litteratur

- [1] www.graz-astrobiology.oeaw.ac.at/eana.html
- [2] www.astrobiologi.nu
- [3] users.utu.fi/hlehto/fan/
- [4] www.nordita.dk/conference/AstroBio2004/
- [5] www.nordita.dk/conference/AstroBio2004B/
- [6] www.nordita.dk/conference/AstroBio2005/

Opgave-hjørnet - Relativistisk tyngdepunktsflytning

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. I sidste nummer af KVANT blev denne breddeopgave fra RUC (fra vintereksamen 2002, nr. 18 i rækken af KVANT) bragt:

18. Relativistisk tyngdepunktsflytning.

En pistolkugle affyres fra en pistol fastgjort på den ene ende af en kasse og stoppes i en klods på den anden ende af kassen. Kassen er anbragt på et vandret, glat underlag. Flytter kassen sig? Begrund svaret.

Max Born opstillede et "Gedankenexperiment",

hvor pistolen er erstattet med en lyskilde og klodsens med en absorber. Ved at benytte relationen mellem energi og impuls for elektromagnetisk stråling (som leveres af den elektromagnetiske feltteori) og reglen om bevarelse af tyngdepunktsimpulsen for et isoleret system, kan man nemt nå frem til Einsteins energi-masse-ækvivalensrelation ($E = mc^2$). Eftersis dette.

Løsning

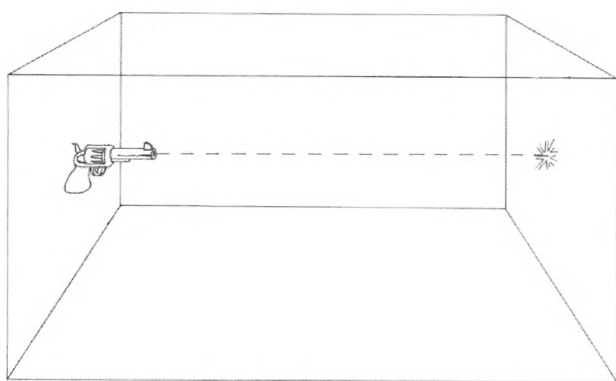
Kaldes pistolkuglens masse for m , kassens masse for M og kassens længde for L , flytter kassen sig afstanden x , givet ved:

$$M \cdot x = m \cdot (L - x) \quad (1)$$

idet tyngdepunktet for systemet kasse + pistolkugle ligger fast, fordi der ikke er ydre kraftpåvirkninger på systemet. I den tid pistolkuglen bevæger sig fra kassens ene endevæg til den anden, flytter kassen sig altså på grund af rekylen fra affyringen af pistolkuglen afstanden:

$$x = m/(M + m) \cdot L \quad (2)$$

Herefter står kassen igen stille på grund af opbremsningen medens pistolkuglen stoppes af klodsen.



Figur 1. Pistolen i kassen. Tegning: Kaj Ove Roland.

I Max Borns Gedankenexperiment (Max Born: *Moderne Physik*. Berlin 1933. Side 36) udsendes et lyssignal, dvs. elektromagnetisk strålingsenergi, E , fra lyskilden på kassens ene endevæg. Al strålingsenergien, E , absorberes siden i absorberen på kassens anden endevæg. I tidsrummet mellem lysudsendelse og lysabsorption bevæger kassen sig. Da lyssignalets impuls ifølge den elektromagnetiske feltteori er givet ved $P = E/c$, er farten, v , som kassen bevæger sig med, på grund af impulsbevarelsen for systemet kasse + lyssignal givet ved:

$$E/c = M \cdot v \quad (3)$$

Max Born forestiller sig så, at lyskilden og absorberen i kassen er ens apparater, der kan befinde sig i en anspændt eller en udløst tilstand. Ved lysudsendelsen overgår apparatet fra den anspændte tilstand til den udløste tilstand. Og ved absorptionen overgår apparatet fra den udløste tilstand til den anspændte tilstand. Vi kan derfor efter lyssignalets flytning af energi fra den ene endevæg til den anden og kassens samtidige flytning i modsat retning genetablere udgangssituationen inden i kassen, hvis vi inde i kassen foretager en ombytning af de to apparater. Og hvis apparaterne vejer

det samme i deres anslåede tilstand og deres udløste tilstand, kan det ske uden at kassen bevæger sig, således at den eneste forskel på situationen før lysudsendelsen og situationen efter ombytningen af apparaterne er, at kassen er flyttet et stykke. Øvelsen kan så gentages et vilkårligt antal gange, hvorved vi indefra kan flytte kassen, som det passer os, uden at kassen er påvirket af ydre kræfter. For at undgå denne absurditet er vi derfor nødt til at regne med, at der i tankeeksperimentet udover energien E også er flyttet en vis masse m fra det ene apparat til det andet. Altså at apparatet i den anspændte tilstand har en masse, der er m større end massen af apparatet i den udløste tilstand. Så vil kassen nemlig flytte sig tilbage svarende til (2), når vi ombytter de to apparater.

Udover således kvalitativt at kunne benyttes til at indse nødvendigheden af, at energioverførslen følges af en masseoverførsel, kan tankeeksperimentet også benyttes til at udregne, hvor stor denne masseoverførsel er. Den tid lyssignalet er om at bevæge sig fra den ene endevæg til den anden er $(L - x)/c$. Da kassen i det samme tidsrum bevæger sig afstanden x med farten v , har vi:

$$(L - x)/c = x/v \quad (4)$$

Da massen m skal have en størrelse, så tyngdepunktet af vores isolerede system ligger fast, skal (1) gælde for den. Sammenholdes (1) og (4) fås:

$$v/c = m/M \quad (5)$$

Sammenholdes dette igen med (3) fås:

$$E = m \cdot c^2, \quad (6)$$

som var det, der ifølge opgaven, skulle eftervises.

Kommentar

Ved besvarelsen af opgaven har jeg i det væsentlige refereret Max Born. Herved er besvarelsen blevet mere udpenslet end det, der kunne forventes af de studerendes eksamensbesvarelser. Opgaven skyldes ikke mig, men min kollega Bent Jørgensen (og altså Max Born). Da jeg, som den på RUC der skulle gennemse det pågældende opgavesæt for Bent forud for eksamen, regnede på opgaven, generede den mig. Einsteins fundamentale energi-masse-ækvivalensrelation fremkommer jo ud fra tilnærmede beregninger. Og hvis der regnes eksakt og relativistisk opstår der tilsyneladende problemer. Så kan det ikke være (6) vi skal nå frem til, da noget af hvileenergien mc^2 ved lysudsendelsen går til kassens rekylenergi. Den eksakte energibevarelsesligning må være:

$$E = mc^2 - Mc^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) \quad (7)$$

Den elektromagnetiske strålingsenergi E er lidt mindre end mc^2 . Men indsættes (5) i den eksakte udgave af impulsbevarelse-ligningen (3):

$$E/c = \frac{M \cdot v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (8)$$

fås:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (9)$$

altså at E i modstrid med (7) er større end mc^2 !!! Et eller andet er ravraskende galt. Hvad? En opgave for læseren inden der læses videre? Modstriden fremkommer ved kombinationen af ligningerne (1), (4), (7) og (8). I hvilken af dem ligger fejlen? Det var min kollega Jeppe Dyre, som ledte mig på sporet af, at fejlen ligger i ligning (1). Max Borns grundantagelse om at tyngdepunktet ikke flytter sig i vores isolerede system er kun rigtig til samme orden af de små størrelser m/M og v/c som ligning (3) og ligning (6) er det. Det helt grundlæggende i den klassiske mekanik, at tyngdepunktet i et hvilende system ikke kan sætte sig i bevægelse uden ydre påvirkninger, gælder ikke relativistisk. I den klassiske mekanik kan det fastholdte tyngdepunkt udledes fra impulsbevarelsen for et isoleret system, fordi masserne af systemets bestanddele ikke afhænger af tiden. Men den forudsætning holder ikke relativistisk.

Tværtimod at ligge fast flytter tyngdepunktet sig i Max Borns tankeeksperiment, selvom der ikke finder ydre påvirkninger sted af systemet. Og vi kan også finde ud af hvor meget det flytter sig. Ved kombination af ligning (7) og (8) kan v/c findes som funktion af m/M , hvorefter kassens flytning, x , kan findes som funktion af m/M ved indsætning i (4). Ligning (2) viser, når der regnes eksakt, ikke kassens flytning, men tyngdepunktets flytning i forhold til kassen i modsat retning. Ved at trække tyngdepunktets flytning i forhold til kassen fra kassens flytning i forhold til underlaget kan tyngdepunktets flytning i forhold til underlaget efter mellemregninger findes til at have størrelsen:

$$\Delta x_{CM} = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{m+M} \right)^2 \cdot L \quad (10)$$

Retningen af tyngdepunktsflytningen er den samme som den lyssignalet bevæger sig i. Kassens flytning i modsat retning finder jeg til at have størrelsen:

$$x = \frac{m}{m+M} \cdot L - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{m+M} \right)^2 \cdot L \quad (11)$$

Ved tilsvarende mellemregninger findes den eksakte sammenhæng imellem strålingsenergien, E , og den overførte hvileenergi, mc^2 , at være:

$$E = mc^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \frac{m}{m+M} \right) \quad (12)$$

Det er en pudsighed, at Max Born i sin påvisning af $E = mc^2$ betjener sig af en egenskab ved tyngdepunktet, som netop ikke gælder relativistisk. Når det går godt, skyldes det at han regner til laveste betydende orden i de små størrelser v/c og m/M . Og at tyngdepunktet, som det ses af (10), faktisk ligger stille til første orden af m/M .

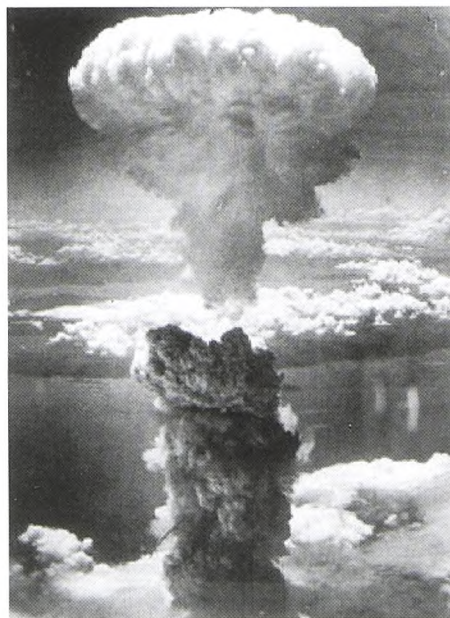
Jeg har ikke hørt andet end at opgaven fungerede tilfredsstillende som eksamensopgave. Og der er åbenbart problemer, der sidenhen kan forfølges i undervisningen. Jeg har også selv stadig problemer med den: Flytter tyngdepunktet afstanden givet ved (10) tilbage til udgangspunktet, hvis der på Born-vis byttes rundt på absorber og emitter efter energioverførslen? Og hvorfor det, hvis det er tilfældet? Hvis det ikke er tilfældet er vi på en ny måde tilbage ved Borns vilkårligt flytbare kasse uden vekselvirkning med omgivelserne. Måske er der blandt KVANTs læsere med et mindre overfladisk forhold til relativitetsteori end mit nogle, der kan rede trådene ud?

Inden næste nummer af KVANT udkommer kan læserne overveje denne breddeopgave (fra den første breddemoduleksamen sommeren 1976):

19. Havebål og brintbomber

Hvad er forholdet mellem typiske temperaturer i brændende havebål og eksploderende brintbomber? Be- grund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.



Figur 2. Brintbombe.

Verdens Fysik År 2005 – Einstein i det 21. århundrede

Henrik Flyvbjerg og Michael Cramer Andersen, KVANT

I 1905 indsendte en 26-årig medarbejder ved patentbureauet i Bern en ph.d.-afhandling til universitetet i Zürich. Det var hans andet forsøg på at opnå ph.d.-graden. Han havde i sommeren 1900 afsluttet den fire-årige gymnasielæreruddannelse i matematik og fysik ved det tekniske universitet i Zürich, med et karaktergennemsnit på 5 ud af 6 mulige. Hans efterfølgende forsøg på at fortsætte som ph.d.-studerende var fejlet, idet han fik afslag på alle sine ansøgninger om assistentstillinger ved universiteter.

Så han var arbejdsløs, vikarierede som gymnasielærer nogle måneder her og der, fik et par værdiløse videnskabelige artikler publiceret – én af dem forsøgte han forgæves at få ph.d.-graden for – og blev så i 1902 ansat på patentbureauet efter anbefaling fra en vens far. I kalenderåret 1905 færdiggjorde han, foruden ph.d.-afhandlingen, fem manuskripter til videnskabelige artikler. Fire af disse blev publiceret endnu i 1905, det femte og ph.d.-afhandlingen i 1906.

Han fik sin ph.d. i dette andet forsøg, og en fremmelse på patentkontoret, hvor han forblev til 1909. Mange år senere fik han også Nobelprisen i fysik, med henvisning til den første af 1905-artiklerne, skrevet før ph.d.-afhandlingen. Afhandlingen blev hans mest citerede artikel, og indeholdt sammen med de andre 1905-artikler stof til endnu to Nobelpriser. Ingen anden videnskabsmand har før eller siden udvist en sådan kreativitet. Kun Isaac Newtons indsats som 24-årig tåler sammenligning.



Hundredåret for Einsteins “mirakuløse år” er udnævnt til *Verdens Fysik År* eller *Einstein År* af *The International Union of Pure and Applied Physics* og UNESCO.

I Danmark er der aktiviteter flere steder i landet,

koordineret af *Dansk Videnskabsformidling* [4]. Formålet er bl.a. at formidle begejstringen for fysik til offentligheden og inspirere en ny generation af forskere. Alle kan være med til at fejre fysik og dens betydning for vores liv. På de officielle web-sider [5], findes bl.a. information om aktiviteter, konkurrencer og undervisningsmateriale.

KVANT markerer *Verdens Fysik År* med et temanummer om Einstein i marts 2005. I en række artikler beskrives Einsteins forskellige bidrag til fysikken, samt deres anvendelse, videreudvikling, eller historiske studium i dansk forskning idag:

- * Helge Kragh: *Einsteins specielle relativitetsteori*
- * Poul Olesen og Jan Ambjørn: *Kosmologi, kvantekosmologi og Einsteins almene relativitetsteori*
- * Klaus Mølmer: *Den fotoelektriske effekt og lysets kvantisering: Nobelpris for et uholdbart argument*
- * Nicolai Nygaard: *Bose-Einstein Kondensation: Når Atomer Synger i Kor*
- * Paul Michael Petersen: *Einsteins arbejde som førte til udvikling af laseren*
- * Per Hedegaard: *Faste stoffers varmfylde: Mærkbar kvantemekanik*
- * Henrik Flyvbjerg m.fl.: *Brownske bevægelser, fra Einstein til optiske pincetter*
- * Henrik Flyvbjerg m.fl.: *Brownske bevægelser og mikroorganismers motilitet*
- * Benny Lautrup: *Einstein og Virkeligheden*
- * Henry Nielsen: *Hvorfor fik Einstein først Nobelprisen i 1921/22?*

Referencer:

- [1] Abraham Pais (1982), 'Subtle is the Lord...' *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- [2] Peter D. Smith (2003), *Einstein, Life & Times*. Haus Publishing, London.
- [3] Ove Nathan og Henrik Smith (1999), *Den harmoniske Begejstring*, afsnit 2.14. Gyldendal.
- [4] Dansk Naturvidenskabsformidling, www.formidling.dk
- [5] World Year of Physics 2005, www.wyp2005.org (Europa); www.physics2005.org (USA)
- [6] American Institute of Physics: *A. Einstein – Image and Impact*, www.aip.org/history/einstein, har mange links til andre web-sider om Einstein.

Ny film om fortolkning af kvantemekanikken

“Hvis du synes du har forstået hvad kvantemekanikken går ud på, så har du slet ikke forstået noget”. Sådan sagde Niels Bohr med henvisning til komplementaritetsprincippet.

Noget må instruktøren, Lars Becker-Larsen, imidlertid have forstået af den vanskelige fysik, som kvantemekanikken er, for hans nye film formidler ganske godt nogle af de centrale problemstillinger i fortolkningen af kvantemekanikken. Den centrale idé i filmen er den fortolkning Niels Bohr stod fadder for og derfor betegnes “Københavnertolkningen”. Her indtager observatøren og *måleprocessen* en fremtrædende position.

“Verden kan ikke være så forrykt” udtalte Albert Einstein om Bohrs filosofiske lære og den har da også været omstridt siden den kom frem i 1920’erne. Der findes alternative fortolkninger af f.eks. David Bohm og Hugh Everett og disse bliver ligeledes diskuteret indgående i filmen af en række fremtrædende fysikere som Steven Weinberg, Roger Penrose, Bryce De Witt, Anton Zeilinger m.fl. Fysikerne er meget delte i synet på Københavnertolkningens vidtgående konsekvenser for, hvad man skal forstå som virkelighed.

Filmene er meget aktuel ved at bringe interviews med førende eksperimentelle forskere, som med moderne teknologi kan afprøve nogle af de forudsigelser som f.eks. Københavnertolkningen giver. Dette var ikke muligt, da Bohr og Einstein diskuterede så ivrigt.

I Wien har man således klart demonstreret, at de mærkelige kvantefænomener kan konstateres selv på store afstande og der arbejdes målrettet på at udnytte dette i meget hurtige *kvantecomputere*.

Til premieren den 27. oktober hvor fysikere på universiteter og gymnasier var indbudt, gav fysiker Benny Laustrup, fra Niels Bohr Institutet, en introduktion til filmen [1]. I næste nummer af KVANT, skriver Benny Laustrup om “Einstein og Virkeligheden – Om kvantemekanik og fysisk realitet”.



Figur 1. Præsentation af filmen (design Soffi Beier).

Københavnertolkningen har en spilletid på 58 min.

Instruktion: *Lars Becker-Larsen*. Musik: *Anders Koppel*. Animation *Søren Tomas og Søren Buus*. Producent: *Arentoft Aps* 2004.

Distribution: *Det Danske Filminstitut*, www.dfi.dk

Referencer:

- [1] Benny Laustrup (2004), Københavnertolkningen – Indledning til en film af Lars Becker-Larsen, www.nbi.dk/laustrup/artikler/fortolkning.html.