

KVANT

Juli
2011 2

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 22. årgang

TEMA: LIV & FYSIK

- LIV SOM FYSIK
- JORDENS TIDLIGSTE LIV
- VAND OG LIVSBETINGELSER PÅ MARS
- JAGTEN PÅ JORDLIGNENDE PLANETER
- LIV, INFORMATION, VIRKELIGHED OG FYSIK
- NATURLOVE OG MULIGHEDEN FOR LIV
- KVANT-NYHEDER

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

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

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Torsten Freltoft,
Sophion Bioscience A/S
Anja Skaar Jacobsen,
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør),
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Ørsted Lab, Københavns Universitet
Svend Erik Rugh

Korrektur

Natalia Golubeva,
Aarhus Universitet
Torben Westerberg

Foreningsrepræsentanter

Lone Djernis Olsen (KIF)
Torben Lund Skovhus (SNU),
Teknologisk Institut

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.

Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

Annoncepriser

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

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

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

Produktionsplan

Nr. 3-11 udkommer ca. 15. oktober

Nr. 4-11 udkommer ca. 15. december

Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Temanummer om liv og fysik

Michael Cramer Andersen og Svend Erik Rugh 3

Liv som fysik

Kim Sneppen 4

Livet, Solen og landet – jagten på Jordens tidligste liv

Minik Rosing 8

Vand og livsbetingelser på Mars

Christine S. Hvidberg 12

Vindmøller og helikoptere – breddeopgave 42 og 43 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 16

Stjernehimlen

Michael Cramer Andersen 18

KVANT-nyheder

Sven Munk og John Rosendal Nielsen 19

Kepler-missionen – jagten på jordlignende planeter

Lars A. Buchhave 21

Aspekter af liv, information, virkelighed og fysik

Steen Rasmussen 25

Foreningsnyt – foredrag i efteråret 29

Naturlove og muligheden for liv

Michael Cramer Andersen og Svend Erik Rugh 30

Er naturen supersymmetrisk?

John Rosendal Nielsen Bagsiden

Billedet på forsiden viser en solopgang over havet. Livet findes overalt på Jorden hvor der er flydende vand og er formentlig opstået i havet og dybt afhængigt af vores stjerne Solen. Findes der andre planeter med vand og liv? Potentialet er stort i et univers med ca. 10^{22} stjerner. I dette temanummer om "Liv og fysik" kan man først læse om de væsentligste aspekter af fænomenet liv, når det beskrives med biofysik. Herefter fortælles om de ældste spor af liv på Jorden og om betingelserne for vand og liv på vores naboplanet Mars. Man kan også læse om jagten på jordlignende planeter, der gennemgår en revolutionerende udvikling netop i disse år. Fænomenet liv bliver desuden sat i relation til begreber som information, virkelighed og naturlove.



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

Temanummer om liv og fysik

Af Michael Cramer Andersen og Svend E. Rugh, KVANT

Liv og fysik

Er livet en naturlig følge af stjernedannelse eller er det enestående i Universet? Er naturlovene indrettet så livet nødvendigvis må opstå eller skyldes det en række tilfældige sammentræf? Sådanne spørgsmål optog ofte Jens Martin Knudsen i hans mange inspirerende foredrag. Med sit store engagement i fysikken, og sin store fortælleglæde, var Jens Martin en vidunderlig inspirationskilde for en hel generation af fysikere.

Vi har i dette temanummer samlet en række artikler der omhandler aspekter af liv belyst fra mange forskellige fysiske synsvinkler. Derfor har vi kaldt temanummeret "Liv og fysik".

Livet på Jorden

Vi indleder dette temanummer med en artikel af Kim Sneppen, der har været med til at opstarte *Center for Models of Life* (CMOL) på Niels Bohr Institutet. Kim Sneppen skitserer i sin artikel nogle grundlæggende begreber ved levende systemer og indkredser kort hvad der gør biologiske systemer forskellige fra de systemer man normalt undersøger i fysik. Der gives eksempler på modeller af informationsnetværk der beskriver levende systemer.

Minik Rosing er geolog og leder af Geologisk Museum. Han har skrevet om hvordan han fandt de ældste spor af liv på Jorden og hvordan livet og Jorden har påvirket hinanden i deres parallelle udvikling. Det er bl.a. bemærkelsesværdigt, at livsprocesser har spillet en afgørende rolle ved dannelsen af den granit som Jordens kontinenter er dannet af.

Liv udenfor Jorden

Fra livet på Jorden bevæger vi os derefter ud i rummet. Christine S. Hvidberg er glaciolog ved *Is og Klima*-gruppen på Niels Bohr Institutet. Hun fortæller om vand og livsbetingelser på Mars. Der er flere tegn på, at den meget unge Mars havde betydelige mængder af flydende vand mens det i dag er meget sjældent forekommende på vores naboplanet.

Lars A. Buchhave er astronom og han arbejder med data fra Kepler-teleskopet, der leder efter jordlignende exoplaneter. Han fortæller om de seneste resultater, der bl.a. tæller mere end 1000 planetkandidater, herunder et exoplanetsystem med fem planeter. Der følger et omfattende opfølgingsarbejde i de kommende år, hvor planetkandidaterne skal bekræftes og deres egenskaber undersøges.

Teoretiske overvejelser om liv

De sidste to artikler er noget mere abstrakte.

Steen Rasmussen, der har været med til at opstarte *Center for Fundamental Living Technology* (FLinT) ved Syddansk Universitet, har skrevet om sammenhænge mellem liv, information, virkelighed og fysik. I artiklen berøres grundlaget for diskussionen omkring kunstigt liv, og hvad liv er i andre medier. Fx opbygning af kunstigt liv ud fra byggeklodser der består af ikke-biologiske (dvs. ikke-levende) materialer.

Til sidst har undertegnede bidraget med en kort introduktion (del 1 af en artikel i flere dele) om hvordan fænomenet liv (som vi kender det) afhænger af de fundamentale naturlove i Universet. Er det muligt at ændre naturlovene (eller mere specifikt naturkonstanterne) og stadig opretholde de fysiske betingelser, der er nødvendige for liv, såsom at naturlovene fx skal muliggøre eksistensen af atomkerner og atomer?

Tidligere og kommende temanumre

Tidligere temanumre, der behandlede lignende emner, er KVANT nr. 3, 2005 (Biologisk fysik) og KVANT nr. 4, 2004 (Astrobiologi).

Vi vil gerne i Kvant – af og til – samle en række artikler indenfor et mere afgrænset tema, som vi i Kvant-redaktionen finder spændende. Nogle temanumre, som vi går lidt rundt og pusler med idéer til, er

- Fysik og science fiction
- Fysik/Videnskab og Kunst II

Vi håber naturligvis altid på at læserne – uopfordret – indsender artikler til bladet. Hvis du fx har idéer til artikler om disse emner, eller andre fysikemner, må du meget gerne sende en e-mail til kvant@kvant.dk.

God læselyst!

Michael og Svend



Liv som fysik

Af Kim Sneppen, Center for Models of Life

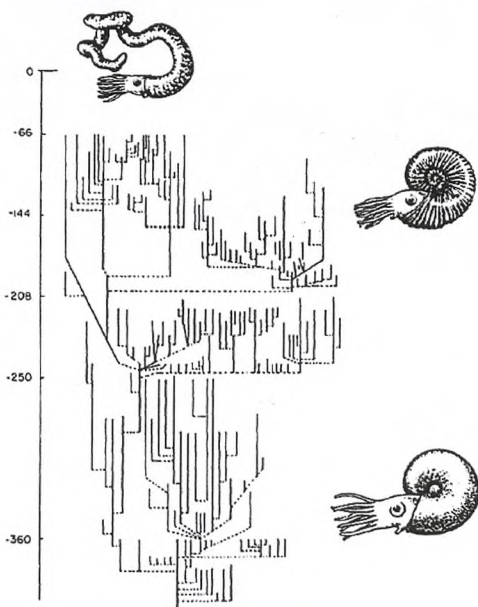
I denne artikel vil vi skitsere modellering og fysik knyttet til især biomolekyler, og hvordan disse sammen kan fungere som en levende celle. Vi skal kort gennemgå nogle grundlæggende begreber i levende systemer, med fokus på hvad der gør biologiske systemer så forskellige fra de systemer man normalt undersøger i fysik.

Hvad er liv?

“Livet” (f.eks. en levende celle) er karakteriseret ved at være: *selvreproducerende*, *vedvarende* (livet har eksisteret ca. 3.700.000.000 år), *komplekst* (af størrelsesordenen 1000 forskellige molekyler for at få selv den simpleste celle til at fungere), *emergent*, dvs. “mere” end summen af dets dele (en vilkårlig opdeling af en celle vil føre til dens død), det *høster energi* (fra omgivelserne), og det *udvikler sig*. Der findes væsentlige processer i livets funktioner fra skalaen af et enkelt vandmolekyle til balancen i Jordens atmosfære.

Livets mekanismer

Begrebsmæssigt har biologi givet os et par grundlæggende og universelle mekanismer, der ikke findes tilsvarende i fysik, fx evolution. Andre biologiske fænomener, fx stokastiske processer, er derimod velkendte i fysikken. Men den rolle disse spiller i biologien, er ofte kraftigt forstærket af livets evne til at koble det enkelte molekyles egenskaber til overlevelse af hele organismen.

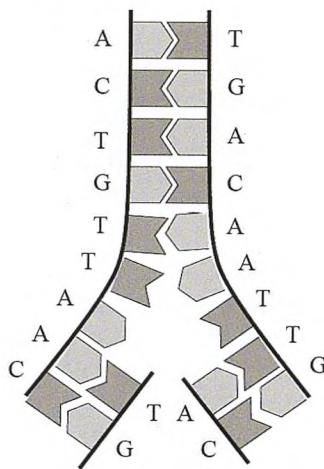


Figur 1. Ammonitstamtræ fra Eldredge (1987). Ammonitterne boede i vand på kontinentalsoklen. Deres forsteninger er tydelige, og der er omkring 7000 forskellige ammonitarter i de fossile samlinger. Igennem deres evolutionære historie (fra 400 til 66 millioner år siden) observerer man tidspunkter med hurtig opsplitning i mange arter og også eksempler på samtidig udslettelse af mange forskellige arter. Der er i dag ingen levende ammonitter.

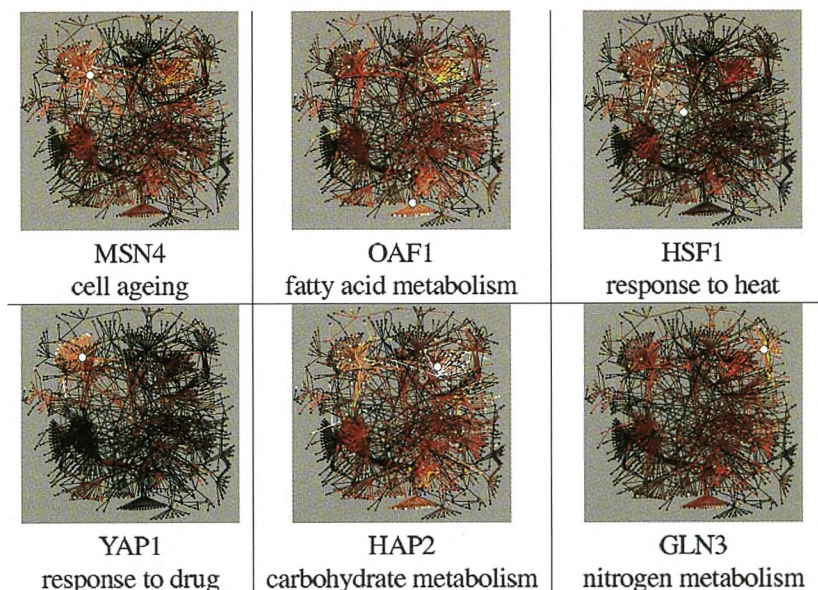
1) Livet kopierer fra sig selv og fra andet levende.

Livet kopierer og gentager egenskaber på alle skalaer – fra DNA, celler, enkeltpersoner, til os mennesker, der kopierer hinandens adfærd og opfindelser. Kopiering er godt, det giver nye livsformer mulighed for at erobre verden ved eksponentiel vækst. Kopiering af det der allerede har vist sig at virke vil sandsynligvis også virke. Kopiering inkluderer også læring som det vi gør i skoler, eller det børn og dyreunger gør når de efterligner deres forældre. Den enorme kopiering er så suppleret med opfindelse af nye ting, af mutationer og evolution, der ofte fejler, men alligevel er nødvendige for skabelse af den utroligt righoldige verden der omgiver os.

2) Biologi er resultatet af en historisk proces. Det betyder, at det ikke er muligt at “forklare” et biologisk system ved at anvende nogle få grundlæggende love på samme måde som det gøres i fysik. Et brintatom kunne ikke være anderledes end det er, ud fra hvad vi ved om naturlovene, men en E.coli-celle kunne. I evolutionen er det meget lettere at udnytte de nuværende mekanismer end at opfinde nye. På evolutionære tidsskalaer (dvs. mio. år) opstår næsten alt nyt ved at klippe og klistre i eksisterende moduler der virker. I figur 1 ses et eksempel på den tilfældighed historien fører til. Figuren viser dannelse og udryddelse af forskellige ammonitarter over en periode på 1/4 milliard år.



Figur 2. Information i livet lagres éndimensionelt i en dobbeltstrengt polymer kaldet DNA. Hver polymerstreng i DNA indeholder præcist de samme oplysninger, kodet i form af en sekvens af fire forskellige basepar. Kopiering sker ved at trådene adskilles og kopieres hver især. Dette samspil mellem hukommelse og replikering (dublering) åbnede op for livets knap 4 milliarder år komplekse historie.



Figur 4. Alle figurer viser det samme genetiske netværk for gær (*S. Cerevisiae*). Netværket består af proteiner (runde farvede objekter), og disses regulative forbindelser (pile). De forskellige figurer illustrerer hvorledes proteinmængden ændres som følge af eksterne stressfaktorer (lys farve betyder stor ændring i genudtrykket). Man kan se at responset for det meste er *lokaliseret*, dvs. forstyrrelsen transporteres ikke til alle områder af systemet. Netværket er baseret på gamle eksperimentelle data, mens farvelægningerne er baseret på mikroarray-eksperimenter med forskellige ydre stresspåvirkninger. For detaljer se [4].

3) Livets molekyler er “polymerer”, dvs. sammenføjning af mange ensartede molekyler (monomerer). På den molekylære skala er liv fremstillet af polymerer: DNA, RNA, og proteiner. Selv membraner er bygget af molekyler med store forskelle på længde og bredde. Måske kan mekanik på nanoskala kun virke når det er sammenstrikket af polymerer, dvs. molekyler der holdes sammen af stærke kræfter langs deres ryggrad, mens de danner specifikke strukturer ved hjælp af langt svagere kræfter vinkelret på ryggraden. I molekylærbiologi ser vi nanomekanik i funktion med polymerer der virker som 5-10 nm store maskiner.

4) Genetisk kode: Information lagres på et endimensionelt, dobbeltstrengt DNA-molekyle. Den endimensionale karakter af informationen afspejles i den endimensionale karakter af de polymerer, der får livet til at virke. DNA-strengene åbner for kopiering og transkription ved at adskille det dobbeltstrengede DNA i to enkelte DNA-strenger, der hver bærer den fulde information. Kopieringen foretages af DNA-polymerase¹ ved brug af komplementære basepar. Den genetiske kode læses på lignende måde af RNA-polymerase og ribosomer, der igen bruger matchning af komplementære basepar for at oversætte codons² til aminosyrer. Dette sammenfattes normalt i det meget forenklede skema i figur 3, der kaldes “det centrale dogme”:



Figur 3. Ifølge “det centrale dogme”, kontrollerer DNA dannelsen af proteiner via RNA. Denne reduktionistiske opfattelse tager ikke højde for feedback mekanismer fra proteiner til DNA.

Dette er meget forenklet: Proteiner ændrer andre proteiner og vigtigst er, at proteiner giver både positiv

og negativ feedback på alle pile. Hvis man kun har DNA i et reagensglas, sker der ingenting. Man behøver proteiner for at få DNA til at danne RNA osv. Så diagrammet i figur 3 bør suppleres med mindst en pil fra protein til DNA. Det er således ikke altid klart, hvor begyndelsen på denne løkke er, og skemaet skal udvides til molekylære netværk med masser af feedbackmekanismer der sikrer at det rigtige protein dannes når der er behov for det. Disse feedbackmekanismer er et centralt emne for forskningen ved Center for Models of Life på Niels Bohr Institutet.

5) Beregning: En levende celle har en utrolig “regnekraft”: en *E.coli* oversætter ca. 6.000.000 proteiner i løbet af en time, svarende til en regnehastighed på ca. 10 Gb/time; alt dette indenfor en celle på 1 mikrometer, hvis indhold er bestemt af ca. 5.000.000 basepar. Informations- og regnetætheden udkonkurrerer langt enhver computerchip, og selv en million *E.coli* optager meget mindre plads end en moderne CPU (Central Processing Unit) og slår dermed også pc’er på beregningshastighed.³

De simpleste organismer kan klare sig stort set uden transskriptionskontrol. En *prokaryot* celle (dvs. en celle uden cellekerne) som f.eks. “*M. Pneumoniae*” har blot 677 gener. Prokaryoter celler med større genomstørrelse har typisk brug for en række kontrolenheder, der vokser med kvadratet på antallet af gener. Mængden af beregninger i et levende system vokser naturligt med størrelsen, for eksempel når man går til *eukaryote* celler (dvs. celler med cellekerne) og især til multicellulære organismer, hvor hver celle også skal have kodet information der tillader den at udtrykke og fastholde hver af de mange hundrede celletyper vi har i vores krop.

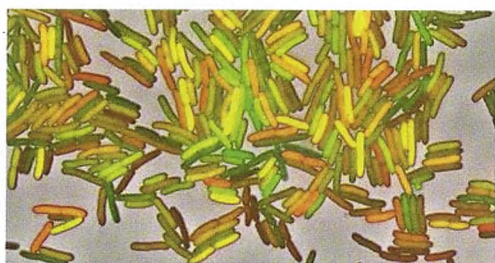
¹En *polymerase*, (af polymer og -ase) er en gruppe af enzymer, hhv. RNA-polymeraser og DNA-polymeraser, der katalyserer dannelsen af hhv. RNA og DNA.

²Et *codon*, eller en triplet, er betegnelsen for tre på hinanden følgende nukleotider i cellens DNA og mRNA, der tilsammen koder for en enkelt aminosyre under proteinsyntesen.

³En moderne computer har en regnehastighed på $3 \cdot 10^9$ operationer per sekund, i en regneenhed der fylder ca. 1 cm^3 , eller $10^{12} \text{ } \mu\text{m}^3$.

6) Livet er modulært: Livet er bygget af dele, der er bygget af dele, på en bred vifte af skalaer. Det sikrer robusthed: Hvis en proces ikke fungerer, er der ofte alternative processer der kan erstatte den. På molekylær skala ses eksempler herpå i proteiners sekundære, tertiære og kvaternære struktur (komplekser af proteiner); de kan omfatte netværksmoduler, der i praksis udtrykkes som en form for netværks-lokalitet i respons på eksterne stimuli. Dette er illustreret for gær i figur 4 [4]. Modularitet ses også i fysisk separation som i subcellulære domæner. Vigtigst er, at det mindst rimeligt uafhængige levende modul er cellen (rimeligt i den betydning, at intet liv er helt uafhængigt af alt andet liv).

7) Livet er ikke (kun) modulopbygget: Et udsagn der følger af, at livet er mere end summen af dets dele. For eksempel vil fjernelse af et enkelt gen ofte føre til døden for en organisme. En anden observation er, at antallet af regulerende proteiner til bakteriearter vokser med kvadratet på antallet af proteiner, der skal reguleres. Regulerende gen- og proteinnetværk er så sammenkoblet af feedbackprocesser, at de ikke virker synderligt modulære.



Figur 5. Genetisk identiske E.coli celler viser forskellige mængder af visse grønne og røde fluorescerende proteiner. Cellerne viser meget heterogen opførsel, der afspejler tilfældige hændelser på enkeltmolekyl-niveau. Regulative proteiner binder til de særlige steder på cellens DNA hvor de røde og grønne proteiner kodes fra. Figur fra M. Elowitz et al. (2002) [8].

8) Stokastiske processer spiller ind på alle skalaer af liv, fra molekyler over celler til liv og død af organismer såvel som hele økosystemer. På den mindste skala omfatter det især Brownske støjmekanismer, "trial-and-error" strategier, og individualitet af genetisk identiske celler på grund af deres begrænsede antal molekyler. Eksempler på trial-and-error mekanismer er vækst til vedhæftning eller kollaps af mikrotubuli⁴, den vej det enkelte virus følger til sin værtscelle, eller den enkelte molekylære mutation. I det sidste årti er individualitet af celler blevet udforsket ved direkte visualisering af enkeltgeners aktivitet i den individuelle

celle (se figur 5).

9) Biologisk fysik er " $k_B T$ -fysik" (k_B er Boltzmanns konstant og T er temperatur). Med dette menes at den relevante energiskala for de molekylære interaktioner, der styrer alle biologiske mekanismer i cellen er af samme størrelse som energien i et enkelt molekyle i den luft der omgiver os. Ved $T=300$ kelvin bliver $E = k_B T \approx 1/40$ eV. I fysik behandles typisk systemer med energier af helt andre størrelsesordener:

- Brintatomet: energierne er omkring 10 eV, ca. 400 gange $k_B T$.
- Bindingsenergi for atomer i metaller; kovalente bindinger: energi ca. 1 eV, eller 40 gange $k_B T$.
- Makroskopiske genstande hvor selv et objekt (fx et insekt) med en masse på 1 mg, der bevæger sig med en hastighed på 1 cm/sek, har en kinetisk energi på ca. 10^{-10} J eller ca. 10^9 eV.

Biologiske materialer bliver derfor anderledes. I traditionelle faststofs-systemer begynder man med en given struktur og beregner energiniveauer. Varmeenergi kan være relevant for at sparke ladningsbærere op i ledningsbåndet. Enkeltmolekylfluktuationer kan derimod ikke ødelægge den ordnede struktur.

Våde (biologiske) systemer vil ofte samle sig selv i en række forskellige strukturer. F.eks. danner amfifile⁵ molekyler i vand miceller⁶, dobbeltlag, vesikler⁷ osv. og polypeptidkæder folder og danner kugleformede proteiner. Disse ordnede strukturer eksisterer i en kamp mod den termiske bevægelses ødelæggende virkning.

Livet som komplekst informationsnetværk

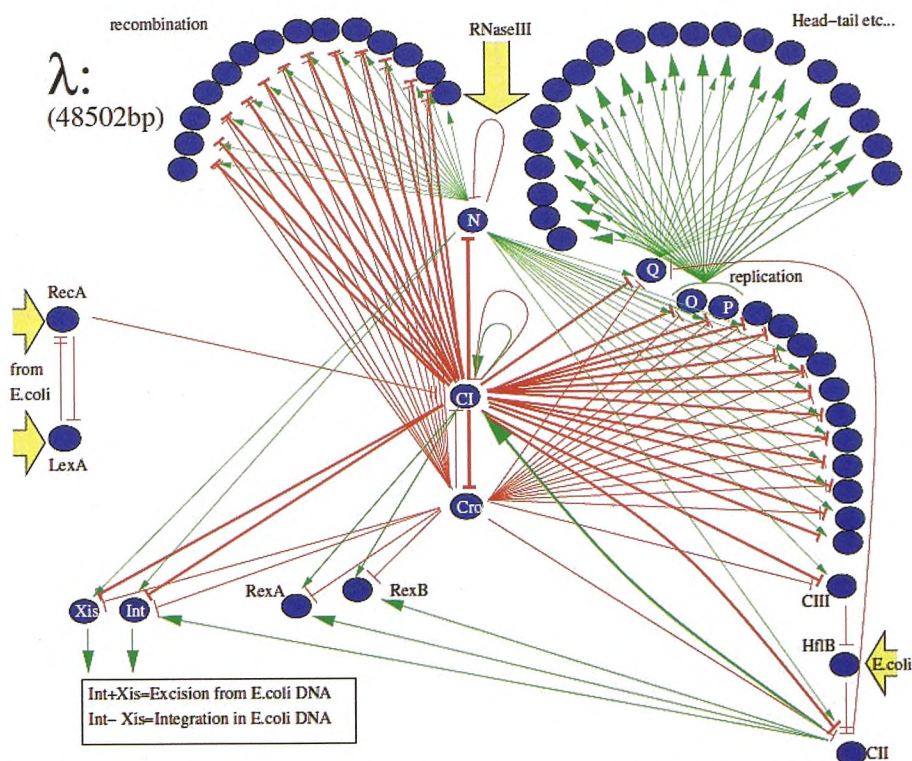
Overordnet set er en levende celle et meget kompakt komplekst system, med mange forskellige dele der er klemte inde på et minimum af plads. Mange af disse dele er proteiner, der hver for sig kun vekselvirker med ganske få andre proteintyper. Disse mange komponenter kan derfor beskrives som et slags informationsnetværk (se figur 6), der definerer specifikke signalveje på tværs af systemet. Signalveje der dirigerer cellens respons på ændringer i omgivelserne. Det er som med computere, jo mindre de er jo hurtigere respons, og jo mere konkurrencedygtig er cellen. Derfor vil vi se, at enkelte proteiner ind imellem kun kommer i meget lavt kopital, helt ned til måske 10 kopier af nogle af de bestemte regulerende proteiner i en bakteriecelle. Et antal, der stadigvæk tillader cellen at reagere fornuftigt på ændringer i eksterne forhold.

⁴Mikrotubuli er rørformede proteinstrukturer, blot 25 nm i diameter, som i plante- og dyreceller bl.a. styrer den rumlige placering af proteinkomplekser og organeller (særskilte strukturer i en celle, der er omgivet af membraner). De styrer også bevægelser af cilier (bevægelige udløbere på celleoverfladen, f.eks. fimrehår) og kromosomer under celledelingen.

⁵En amfifil er et molekyle, hvor én del er opløselig i vand (dvs. hydrofil, polær), mens den øvrige del er opløselig i fedt (dvs. lipofil, apolær). Fosfolipider, der udgør grundstammen i alle cellemembraner, har disse egenskaber.

⁶Miceller er ca. 1-100 nm små elektrisk ladede partikler bestående af fedtsyreioner i en sfærisk struktur. Kendes bl.a. fra sæbeopløsninger og når tarmceller absorberer fødens fedtstoffer.

⁷En vesikel er en lille transportpartikel med en væg af protein og fedtstoffer, ofte fosfolipider. Vesikler dannes i alle celler og transporterer f.eks. fedt, proteiner, hormoner eller andre stoffer rundt i cellen eller ud af cellen til blodet.



Figur 6. Eksempel på et gen-reguleringsnetværk, som det kendes fra “phage lambda”. Denne phage er en virus der inficerer E.coli-bakterien, bruger dens produktionsapparat til at få lavet proteiner fra phagens DNA og så derefter beslutter om den vil slå værtscellen ihjel eller leve integreret i E.coli genomet hundreder af år. De blå ovaler er proteiner, mens de grønne og røde pile er regulative vekselvirkninger. En rød pil markerer at et protein forhindrer et andet protein i at blive produceret, mens en grøn pil markerer positiv regulering. Overordnet fortæller netværket om en meget logisk struktur, der er i stand til at træffe strategiske beslutninger om liv og død (se [9]).

Modeller af liv

Center for Models of Life bygger matematiske og fysiske modeller af signalveje og reguleringsmekanismer i celler, med fokus på selvorganisering af livsprocesser. Som udgangspunkt bruger vi ofte model-organismer, specielt E.coli og visse delsystemer af mere komplicerede eukaryotiske systemer. Overordnet er filosofien, at livsmekanismer er universelle. Hvad der virker i en bakterie som E.coli virker også ofte inden i os mennesker. Derfor er simple velkontrollerede modelsystemer ofte den bedste måde at opnå en mere kvantificerbar forståelse af hvordan liv virker.

Vores mål er at udvikle en bedre forståelse af basale biologiske fænomener, såsom dynamiske mønstre i tid og rum, stress respons og epigenetik⁸. Ved at udvikle en bedre forståelse håber vi at åbne for ny indsigt i den utrolige diversitet der er af løsninger i den levende verden. En indsigt, der også involverer udvikling af simple modeller for biologisk arbejdsdeling, konkurrence og co-evolution.

Litteratur

- [1] Center for Models of Life, <http://cmol.nbi.dk>
- [2] Kim Sneppen og Giovanni Zocchi (2005), *Physics in Molecular Biology*, Cambridge University Press.
- [3] N. Eldredge (1987), *Life Pulse, Episodes in the History of Life*. New York. Pelican edition (Great Britain)

⁸Epigenetikken handler om arvelighedsmekanismer der ligger udenfor den levende organismes genetiske DNA-sekvens og som derfor forsøges forklaret med miljømæssige faktorer. En epigenetisk mekanisme kunne være, når visse enzymer regulerer de såkaldte *histoners* (molekyler der pakker DNA-molekylet ekstremt tæt) evne til at åbne og lukke for aflæsningen af de enkelte gener. Dette kan føre til celledifferentiering uden at der ændres ved den grundlæggende basesekvens i DNA.

- [4] J.B. Axelsen, S. Bernhardsson og K. Sneppen (2008), One Hub-One Process: A Tool Based View on Regulatory Network Topology. *BMC Systems Biology* bind 2:25.
- [5] D.M. Raup (1991), *Extinction, Bad genes or Bad luck?* Oxford University Press.
- [6] K. Sneppen, P. Bak, H. Flyvbjerg og M.H. Jensen (1995), Evolution as a Self-Organized Critical Phenomenon, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92, 5209-5213.
- [7] K. Sneppen, S. Krishna og S. Semsey (2010), Simplified Models of Biological Networks, *Annual Review of Biophysics* bind 39:43.
- [8] M. Elowitz et al. (2002), *Science* bind 297, 1183
- [9] M. Avlund, I.B. Dodd, S. Semsey, K. Sneppen, and S. Krishna (2009), Why Do Phage Play Dice, *Journal of Virology* 83:11416.



Kim Sneppen er leder af grundforskningscentret Center for Models of Life (CMOL) ved Niels Bohr Institutet.

Livet, Solen og landet – jagten på Jordens tidligste liv

Af Minik Rosing, Statens Naturhistoriske Museum

Livet har udviklet sig på Jorden i mere end 3.700 millioner år. De ældste spor af livet findes i sedimenter fra Isua i Vestgrønland og viser, at livet allerede på det tidspunkt var forholdsvis avanceret, og sandsynligvis istand til at benytte solenergi til fotosyntese. Fotosyntese gør organismer i stand til at gribe in i Jordens geokemiske kredsløb og derved påvirke Jordens geologiske udvikling. Der er gode argumenter for, at dannelsen af Jordens kontinenter er en konsekvens af udviklingen af fotosyntese i Jordens tidlige mikrobielle økosystemer.

Solsystemets dannelse

Solsystemets dannedes gennem en forholdsvis kortvarig serie af begivenheder for omkring 4,5 milliarder år siden. Indenfor 100 millioner år efter Solsystemets fødsel var Jorden, Månen, vore søsterplaneter og deres måner dannet. Det oprindelige inventar af grundstoffer var destilleret i temperaturgradienten mellem den varme Sol og det kolde rum, således at gasser og andre letfordampelige stoffer først kondenserede og klumpede sig sammen til planeter i den ydre del af Solsystemet. De tungere og mindre flyvske stoffer dannede metal og faste bjergarter, som hovedsagelig består af metaloxider. Disse stoffer dominerer planeterne i den indre del af Solsystemet. Materiale som ikke allerede var indfanget af de store planeter vedblev med at falde ind mod Solen gennem hundreder af millioner år, når det blev påvirket af varierende grader af resonans og dissonans mellem planeternes tyngdefelter. Denne transport forgår endnu og er årsagen til at vi stadig modtager en betragtelig mængde meteoritter i dag. I forhold til planeternes samlede masser er processen dog uden betydning i dag. I Solsystemets første halve milliard år var effekten imidlertid væsentlig større end nu. Forskellige grundstoffer, som er sjældne i jordskorpen, så som guld, og platin, og formentlig også størstedelen af oceanernes vand kom til Jorden gennem disse sene nedfald. En bred vifte af geokemiske og isotopgeokemiske forhold tyder på, at oceanerne opnåede deres nuværende omfang for ca. 4.400 millioner år siden.

Arrene på Månens overflade skyldes sådanne sene meteornedslag. Man mener at have nogenlunde styr på kronologien af nedslag på Månen, fordi man kan datere nogle små glaskugler der dannes under nedslagene, og som nu udgør en stor del af støvet på månens overflade. Ved at datere tilstrækkeligt mange mikroskopiske glaskugler fra månestøvet, kan man få et indtryk af intensiteten af meteornedslag som funktion af tiden. For at gøre en lang historie kort, mener man at nedslagsintensiteten på Månen, og derfor også på Jorden, er aftaget eksponentielt gennem Solsystemets historie, men at der har været perioder med særlige konstellationer af planeternes tyngdefelter hvor nedslagene (fra asteroider eller brudstykker heraf) har været væsentligt intensiveret. En sådan periode indtraf fra 4.100-3.700 millioner år siden. Meteornedslag frem til afslutningen af dette "Late Heavy Bombardement" kan gentagne

gange have steriliseret Jordens overflade på grund af den varmenergi nedslagene frigav.

Båndet jernmalm på Grønland

I 1960'erne foretog geologer fra Kryolitselskabet Øresund målinger af de vestgrønlandske bjergarters magnetiske egenskaber, ved hjælp af flybårne magnetometre. Denne aeromagnetiske metode er et effektivt værktøj i eftersøgningen af malme. Ved randen af indlandsisen ca. 150 km NØ for Nuuk fandt man en markant positiv anomali, og sendte et hold geologer ud for at se hvad den skyldtes. Det viste sig, at et klippeparti der skød sig ind i Indlandsisen som et næs, består af en sribet bjergart opbygget af vekslende lag af det sorte jernoxid-mineral magnetit og kridhvid kvarts. Denne specielle bjergart, der går under navnet båndet jernmalm, er dannet ved kemisk aflejring i havet og kendes kun fra meget gamle aflejringer.



Figur 1. Isua, ved kanten til Grønlands Indlandsis.

Et forbjerg hedder "Isua" på grønlandsk og sediment og andre bjergarter, der er dannet direkte på jordoverfladen, hedder supracrustler (supra = på, crust = overflade). Altså blev komplekset kendt som Isua supracrustalerne. I 1973 daterede Stephen Moorbath fra Oxford University en serie prøver fra Isua og opdagede at bjergarterne var ca. 3.770 millioner år gamle. Isua supracrustalerne var dermed langt ældre end nogen anden bjergart der var kendt på Jorden, og de viste at Jorden havde oceaner allerede på dette tidlige tidspunkt. Da Grønlands Geologiske Undersøgelse gennemførte kortlægningen af Isua i 1970'erne mente de fleste

forskere at Jordens have var kommet til forholdsvis sent og, at man nok ikke kunne finde bjergarter meget ældre end et par milliarder år på Jorden. Isua åbnede altså et nyt og uventet vindue til Jordens allertidligste og endnu ukendte historie. De havaflejrrede sedimenter viste samtidig at flydende vand – en af de væsentligste betingelser for liv på Jorden allerede var til stede for 3.700 millioner år siden. Det første spæde forskningskapløb om at finde de ældste spor efter liv på Jorden var i gang. Tænk hvis Isua rummede information om de urgamle miljøer hvori livet opstod! Her var måske selve livets vugge.



Figur 2. Borekerner med båndet jernmalm som består af vekslende lag af kvarts og magnetit.

Biologisk kulstof sætter spor i aflejringerne

I 1979 forslag den tyske geokemiker Manfred Schidlowski, at man kunne benytte kulstofisotoper til at belyse de levende organismers indflydelse på Jordens kulstofkredsløb. Kulstoffet på Jorden har et nogenlunde velkendt forhold mellem isotoperne ^{13}C og ^{12}C som antages at have været næsten uændret siden Jordens dannelse. Hvis vi analyserer de forskellige reservoirer som kulstoffet indgår i, viser det sig imidlertid, at de stort set alle sammen afviger fra Jordens gennemsnit. Marine organismers kalkskaller har en sammensætning som er ca. 5 promille beriget i ^{13}C i forhold til Jordens gennemsnit, men afviger kun en lille smule fra sammensætningen af det opløste kuldioxid i havvand. Det kulstof som farver skifer sort, og som stammer fra de bløde organiske dele af marine alger og bakterier, afviger derimod kraftigt fra gennemsnittet. Det er omkring 20 promille *forarmet*, dvs. fattigere, i ^{13}C sammenlignet med Jordens gennemsnit. Schidlowski påpegede, at hele denne opsplitning af Jordens kulstofbudget i diskrete reservoirer med forskellig isotopsammensætning, skyldes et enkelt enzym, ribolose-1,5-difosfat carboxylase-decarboxylase forkortet RuBisCo. Det er det mest udbredte protein på Jorden i dag, og er ansvarligt for optagelse af kulstof fra kuldioxid under dannelsen af organisk materiale i levende organismer. Denne proces forløber lidt mere villigt med ^{12}C end med ^{13}C , og derfor har organisk stof et underskud af ^{13}C . Hvis en tilstrækkelig stor del af Jordens kulstof bliver optaget af levende organismer og omdannet til organisk materiale,

vil atmosfærens og havets CO_2 gradvist blive beriget i det ^{13}C som blev fravalgt under dannelsen af det organiske stof. Schidlowski påpegede altså, at selv uden at have adgang til egentlige fossiler, burde man kunne konstatere omfanget af biologisk aktivitet på Jorden ved f.eks. at analysere marine kalksten. Hvis de er beriget i ^{13}C viser det, at levende organismer, gennem deres stofskifte, havde forrykket isotopsammensætningen i hele Jordens overflademiljø, da aflejringen fandt sted. Schidlowski analyserede en serie prøver fra Isua og påviste et spænd i isotopsammensætningen mellem svagt ^{13}C berigede kalksten og ^{13}C forarmet grafit, som kunne repræsentere forkullet organisk materiale. Noget kunne tyde på, at der var liv på Jorden da Isua-sedimenterne blev aflejret.

Under den fortsatte udforskning af Isua i 1980'erne og 1990'erne blev det klart, at selv om mange af bjergarterne i Isua oprindeligt var dannet som sediment eller ved vulkanske udbrud under havet, så var deres geologiske historie meget kompleks. 3.800 millioner år er ganske lang tid, og gennem alle disse mange år har det segment af Jordens skorpe som nu ligger blottet ved Isua oplevet lidt af hvert. Bjergarterne er gentagne gange blevet opvarmet og deformerede under tektoniske begivenheder. I den forbindelse har fluider, som hovedsagelig bestod af vand og CO_2 , gennemstrømmet bjergarterne ved temperaturer omkring 450-500 °C. Disse opløsninger har dels møbleret om på de kemiske komponenter internt i Isua komplekset og dels skabt forbindelse til yngre geologiske aflejringer i de omkringliggende fjeldmassiver. En given bjergart fra Isua rummer altså strukturer, kemiske komponenter og isotopforhold som er resultater af 3.800 millioner års geologiske begivenheder. Det viste sig, at de bjergarter Schidlowski havde studeret, for nogles vedkommende var resultater af meget yngre processer og for andres vedkommende var deres geologi så kompliceret, at det var umuligt at udrede hvilke parametre der var resultater af processer i Jordens tidligste hav, og hvilke der stammede fra senere geologiske forstyrrelser. Derved smuldrede de ellers en overgang så lovende tegn på liv fra Jordens ældste aflejringer.

Jagten på de ældste bevarede sedimenter

Min egen forskning i Isua havde fokuseret på at beskrive de sekundære processer som havde omdannet de oprindelige bjergarter. Målet var, at identificere de mindst omdannede bjergarter og, forhåbentlig, blive i stand til at filtrere effekten af de sekundære processer fra. Herved kunne man opnå et mere klart billede af klimaet og sammensætningen af havet og atmosfæren på den unge Jord. Isuas bjergarter kunne måske sige noget om de betingelser livet var opstået under, eller som havde rådet under livets tidligste udvikling. Under mit feltarbejde havde jeg fundet et lille isoleret område inden for supracrustalerne som stort set havde udgået deformation, og hvor man stadig kunne se fine sedimentstrukturer bevaret i bjergarterne. Her var en mulighed for at få et blik ind i en fjern og ellers helt utilgængelig fortidsverden.



Figur 3. Klippeparti med sedimentære lag, som på grund af tektoniske bevægelser er blevet tippet, så de nu hælder kraftigt. De tykke grå lag er dannet af muddervaviner som er rutsjet ned af undersøiske skråninger. De sorte lag er kulstofholdig skifer, som indeholder de tidligste spor af liv på Jorden.

Kulstof fra biologisk aktivitet

Mikroskopiske undersøgelser af de gamle sedimenter viste at skifer, som oprindeligt var aflejret som ler på oceanbunden, indeholdt en stor mængde kulstof i form af mikroskopiske grafitpartikler. Ved at studere kulstofets fordeling i skiferen var det muligt at vise, at kulstof udgjorde en del af det oprindelige sediment og ikke er introduceret i forbindelse med senere forstyrrelser. Isotopanalyser hos Bjørn Buchart på Geologisk Institut viste at kulstoffet havde den karakteristiske mangel på ^{13}C som kendetegner organisk materiale. De mikroskopiske kulstofpartikler var resterne efter det tidligste liv på Jorden.

Det faktum at Isua-skiferen er kulsort skyldes at op mod 1 % af bjergarten består af kulstof, der oprindeligt er sunket til bunds i havet i form af døde organismer. Det må betyde at livet allerede levede i de frie vandmasser og, at den biologiske produktivitet i havet var stor nok til at døde organismer kunne udgøre en betydelig del af sedimentationen. Ved fortsatte studier af de gamle sedimenter i samarbejde med Robert Frei fandt vi geokemiske tegn på at havet rummede diskrete vandmasser med forskelligt iltindhold. Sammen med den store biologiske produktivitet kunne dette bedst forklares ved, at de organismer der levede i havet på Isua-tid, allerede var i stand til at udnytte Solens lys til

fotosyntese i en eller anden form. Fotosyntese fører til en iltning af organismernes umiddelbare miljø, og er en afgørende betingelse for en stor biologisk produktivitet. Livet var altså allerede forholdsvis avanceret og må derfor have haft en lang udviklingshistorie bag sig, da de sorte skifre fra Isua blev aflejret for mere end 3.700 millioner år siden.

Biologisk aktivitet påvirker Jordens dynamik

Som tidligere nævnt har et enkelt enzym – RuBisCO – stort set været ansvarligt for at styre kulstofkredsløbet på Jorden gennem milliarder af år. Det viser sig, at en lang række grundstoffer indgår i bio-geokemiske kredsløb af globale omfang. Vi kan få et indblik i vigtigheden af de levende organismers stofskifte i disse kredsløb, ved at analysere hvor megen energi de forskellige led i kredsløbene omsætter. Jordens indre dynamik, med alle dens jordskælv, vulkanudbrud og drivende kontinenter omsætter mindre end 0,1 watt per kvadratmeter af Jordens overflade udtrykt som døgn-gennemsnit over alle breddegrader. Som kontrast til denne lave omsætning, omdanner de levende organismer ca. $0,3 \text{ W/m}^2$ af Solens energi til kemisk fri energi, som også indgår i de geokemiske kredsløb. Gennem deres stofskifte påvirker de levende organismer altså Jordens dynamik meget kraftigere end Jordens indre kræfter. Begge ovenfor nævnte bidrag kan umiddelbart

virke forsvindende i forhold til Solens strålingseffekt på ca. 340 W/m² (døgngennemsnit over alle breddegrader). Men da størstedelen af solindstrålingen reflekteres eller går til opvarmning af hav og land (uden anden betydning for Jordens dynamik end erosion) bliver de to nævnte bidrag de væsentligste.

En af konsekvenserne af den omfattende fotosyntese der foregår, er en ophobning af stofskifteprodukter i atmosfæren og havet. Disse produkter er ofte i stærk kemisk uligevægt med jordskorpens bjergarter, og fører til den proces der kaldes forvitring. Forvitring er en kemisk nedbrydning af mineraler, hvorved der dannes nye mineraler og frigives stoffer til havet.

Kontinenter af granit

Vores nærmeste naboplaneter Mars og Venus blev dannet ved samme type processer som Jorden, af det samme materiale og på samme tid. Alligevel adskiller Jorden sig markant fra sine søstre. Vi har overfladetemperaturer som tillader flydende vand, vi har en atmosfære som er rig på ilt men fattig på kuldioxid og vi har meget markant liv på Jorden. Hvis vi tager et spadestik dybere viser det sig, at Jordens skorpe også afviger fra de andre planeters skorper. Skorperne på Mars og Venus, og for den sags skyld også en del af asteroiderne og vores egen Måne, består af basalt. Basalt er det første produkt der dannes, når en standard klippeplanet begynder at smelte i sit varme indre. Da basalt er lettere end det omgivende materiale i dybet, stiger det opad hvor det enten når at størkne i skorpen, eller strømmer ud på overfladen gennem vulkaner. To tredjedele af Jordens overflade, nemlig oceanbunden, består også af basalt. Imidlertid er den sidste tredjedel af Jorden dækket af et ganske tyndt lag af bjergarten granit. Granitlaget er kun omkring 20-30 kilometer tykt, sammenlignet med de 6350 km ind til Jordens midte. Så vidt vi kan se, fra de geologiske aflejringer, er Jorden ikke født med disse granit-kontinenter. Det ser ud til at Jorden først begyndte at danne egentlige kontinenter for omkring 4 milliarder år siden. Kontinenterne er vokset gradvist lige siden, og nyt kontinentmateriale dannes stadig i dag. Hvis kontinenternes granit blev dannet ved helt almindelige geologiske betingelser i planetens indre, kan det undre at kontinenterne ikke spirede frem umiddelbart efter at Jorden blev dannet. Ud fra geokemiske modeller og eksperimenter kan vi imidlertid slutte, at granit ikke kan dannes ved opsmeltning af Jordens kappe. Granit dannes ved delvis opsmeltning af forvitret basalt. Omfanget af forvitring af basalt på Jorden er direkte koblet til den biologiske aktivitet, fordi det i vidt omfang er stofskifteprodukter der reagerer med basalten når den forvitrer. Vi kan derfor forklare hvorfor kontinenterne først begyndte af spire og vokse frem på Jorden for lidt mindre end 4 milliarder år siden. Forklaringen kan være, at granitdannelse i stort omfang først blev muligt da de levende organismer havde opfundet fotosyntesen og derved kunne opretholde en biologisk aktivitet der kunne forvitte den oprindelige basalt skorpe i tilstrækkeligt omfang.

Sporene er slettet

Med vores studier af Jordens ældste sedimenter fra Grønland får vi et indblik i livets tidligste udvikling på Jorden. Vi må forestille os, at fotosyntesen som er en meget kompliceret og avanceret proces, må være et resultat af lang tids biologisk evolution, og at livets opståen derfor må ligge væsentligt tidligere end for 3.700 millioner år siden. Måske opstod livet umiddelbart efter at havene opstod for 4,4 milliarder år siden? Vi må også erkende at de overflademiljøer vi kan studere, gennem de ældste sedimenter, allerede var kraftigt påvirket af levende organismers stofskifte, og at vi derfor er afskåret fra at studere de miljøtilstande som muliggjorde livets opståen på Jorden.

Litteratur

- [1] Anbar, A. D., Y. Duan, et al. (2007). A whiff of oxygen before the Great Oxidation Event? *Science* **317** (5846): 1903-1906.
- [2] Brocks, J. J., G. A. Logan, et al. (1999). Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science* **285** (5430): 1033-1036.
- [3] Buick, R. (1992). The Antiquity of Oxygenic Photosynthesis – Evidence from Stromatolites in Sulfate-Deficient Archean Lakes. *Science* **255** (5040): 74-77.
- [4] Canfield, D. E., M. T. Rosing, et al. (2006). Early anaerobic metabolisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* **361** (1474): 1819-1834.
- [5] Rosing, M. T. (1999). C-13-depleted carbon microparticles in >3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from west Greenland. *Science* **283** (5402): 674-676.
- [6] Rosing, M. T., D. K. Bird, et al. (2006). The rise of continents – An essay on the geologic consequences of photosynthesis. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **232** (2-4): 99-113.
- [7] Rosing, M. T. and R. Frei (2004). U-rich Archean sea-floor sediments from Greenland – indications of >3700 Ma oxygenic photosynthesis. *Earth and Planetary Science Letters* **217** (3-4): 237-244.
- [8] Rosing, M. T., N. M. Rose, et al. (1996). Earliest part of Earth's stratigraphic record: A reappraisal of the >3.7 Ga Isua (Greenland) supracrustal sequence. *Geology* **24** (1): 43-46.
- [9] Schidlowski, M. (1988). A 3,800-Million-Year Isotopic Record of Life from Carbon in Sedimentary-Rocks. *Nature* **333** (6171): 313-318.



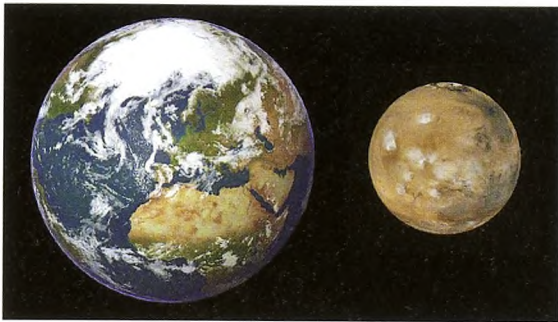
Minik Rosing Minik Rosing er professor i geologi ved Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet og co-director ved Danmarks Grundforskningsfonds Nordisk Center for Jordens Udvikling. Han har arbejdet med jordens tidligste geologiske udvikling og med livets indflydelse på jordens udvikling baseret på feltstudier i Grønland.

Vand og livsbetingelser på Mars

Af Christine S. Hvidberg, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Forekomst af flydende vand menes at være afgørende for at finde spor af liv udenfor Jorden. Mars er i dag kold og støvet, tilsyneladende uden spor af liv. Men der er spor af flydende vand og dramatiske klimaændringer gennem godt 4 mia. år i Mars' geologiske historie. Tilsyneladende var betingelserne for liv engang opfyldt på Mars' overflade.

Siden de første nærbilleder af Mars' overflade blev sendt tilbage til Jorden i 1965, har rummissioner afsløret en verden, der på mange måder ligner Jorden, men alligevel er helt afgørende forskellig. Mars har polare iskapper, en atmosfære med skyer, sne, vulkaner, årstider og døgnrytmer, der minder om Jorden. Men overfladen i dag er stenet og støvet, tilsyneladende uden spor af liv, globale støvstorme indhyller jævnligt planeten i støv, og om vinteren bliver det så koldt, at det sner med tøris (CO_2), se figur 1.



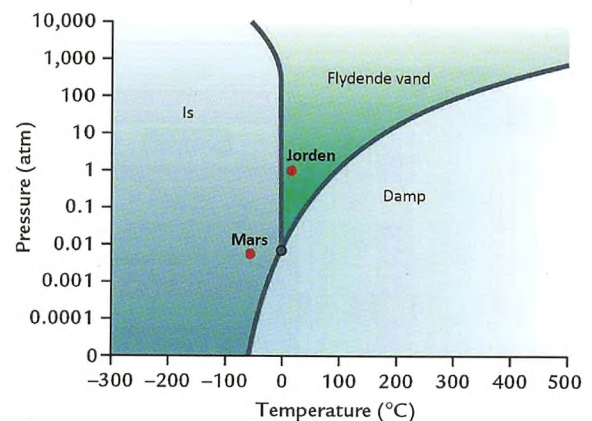
Figur 1. Jorden og Mars i korrekt størrelsesforhold (radius 6.371 km og 3.397 km, henholdsvis) [1]. To planeter, to verdener. Jorden har flydende vand og liv findes overalt. Mars er støvet og kold, men med spor efter flydende vand og dramatiske klimaændringer i planetens fortid.

Forekomst af flydende vand menes at være afgørende for at finde spor af liv udenfor Jorden, fordi liv på Jorden findes overalt, hvor der er flydende vand. Rummissioner til Mars har fundet udbredte spor i den geologiske historie efter flydende vand, der engang flød på Mars' overflade, og spor efter dramatiske klimaændringer gennem Mars' historie.

På Mars er året på 687 døgn, og døgnet er på 24,6 timer. Mars' rotationsakse hælder $25,5^\circ$ i forhold til baneplanet, næsten som på Jorden, hvor aksehældningen er $23,4^\circ$. Det betyder, at Mars i øjeblikket har årstider og døgnvariationer stort set som på Jorden. Atmosfæren består primært af CO_2 , og den er meget tynd med et gennemsnitligt overfladetryk på kun 6-8 mbar, dvs mindre end 1 % af overfladetrykket på Jorden. Drivhuseffekten er kun nogle få Kelvin, og der er derfor store variationer i overfladetemperaturen, som næsten udelukkende er bestemt af den lokale strålingsbalance. Om vinteren bliver det så koldt, at CO_2 udfældes af atmosfæren ved temperaturer ned til ca. 148 K (ca. -125°C) – det sner med tøris. Sæsonsneen kan blive flere meter tyk ved polen, og medfører op til

20 % årstidsvariation i overfladetrykket. Om sommeren fordamper CO_2 -sneen tilbage til atmosfæren igen, og temperaturen ved ækvator kan nå op på ca. 300 K (ca. 27°C) [2].

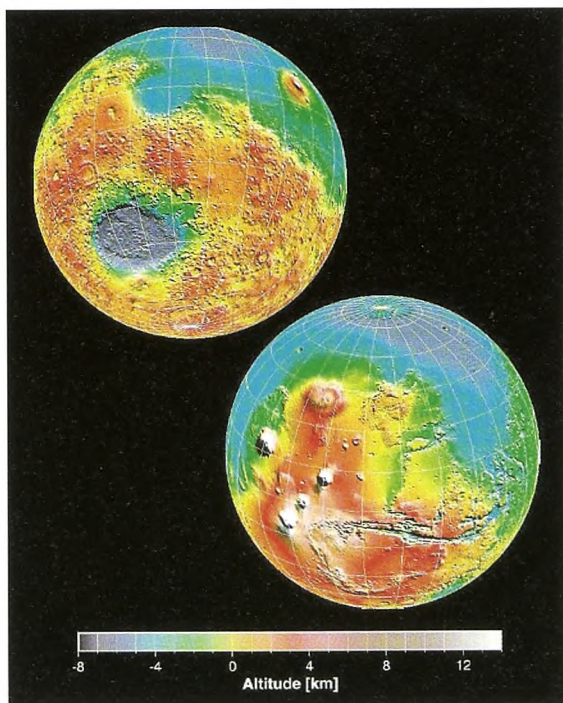
Udforskningen af Mars har fokuseret på at finde og kortlægge vand (H_2O) i alle faser på Mars. Det har vist sig, at der er masser af vand på Mars, men det findes i dag kun som is i de polare iskapper, som permafrost i undergrunden, og en lille smule som damp i atmosfæren [3]. De største kendte forekomster af is er de polare iskapper, der ligger ved polerne i både nord og syd. De er ca. 3 km tykke, og flere hundreder af km i diameter. De består mest af H_2O -is og har et volumen, der er omtrent som Grønlands Indlandsis. En anden vigtig forekomst af is er permafrost i undergrunden. Fra satellit har man kortlagt forekomst af hydrogen i den øverste meter under overfladen på Mars, og heraf konkluderet, at der er store mængder is i undergrunden. Permafrosten strækker sig fra polerne og kan detekteres helt ned til 50°N og S. Permafrosten er dækket af et støvlag, der er udtørret ved fordampning til atmosfæren.



Figur 2. Vands fasediagram [4]. De gennemsnitlige forhold ved overfladen på Jorden og Mars er vist med rødt. Den sorte cirkel angiver tripelpunktet for vand (273,16 K, 611,73 Pa). Det gennemsnitlige overfladetryk på Mars varierer omkring 6-800 Pa (på Jorden er det ca. 1 atm = 101 kPa).

Flydende vand er ikke stabilt på overfladen af Mars i dag på grund af det lave overfladetryk (figur 2), og flydende vand kan derfor kun forekomme kortvarigt på overfladen i de laveste beliggende områder. I dag er flydende vand kun stabilt dybt nede i undergrunden, hvor trykket er tilstrækkeligt højt. Hvis Mars nogensinde har haft flydende vand på overfladen, er det en

forudsætning, at atmosfæren var tykkere end i dag. En tykkere atmosfære ville både give højere tryk og formodentlig medføre øget drivhuseffekt, og dermed højere overfladetemperaturer.



Figur 3. Mars med højdekort [1]. Den øverste halvkugle er set lidt fra syd. Det store, dybe krater er Hellas Planitia kraterbassinet. Den nederste halvkugle er set lidt fra nord. Ved nordpolen kan man skimte den nordlige polare iskappe, og de tre store vulkaner danner sammen Tharsis, et vulkansk plateau. Olympus Mons ses længere mod vest, og er den største vulkan på Mars (og i Solsystemet). Den store kløft er Valles Marineris, der strækker sig over 4.000 km, og er op til 10 km dyb.

Mars' geologiske udvikling

Mars' overflade blev kortlagt med laser-altimeter i 1999 under Mars Global Surveyor-missionen (figur 3). Kortlægningen gav en helt ny viden om den geologiske historie, og blev en milepæl i udforskningen af Mars. Den geologiske datering af overfladen foregår dels ved optælling af krater-tætheder, og dels ved at geologiske strukturer sættes ind i en relativ kronologi for området. Jo ældre en overflade er, des større er krater-tætheden, og fra Månen har man en sammenhæng mellem krater-tætheder og alder kalibreret gennem datering af sten fra Månen. Den geologiske kortlægning afslørede udtørrede flodsystemer, søer, voldsomme vulkanudbrud med lavastrømme, og enorme flodbølger. Sidenhen er mineralogien i overfladen blevet kortlagt både fra satellit og fra Mars roverne, og der tegner sig et samlet billede af de dramatiske ændringer, Mars har gennemgået [3], [5].

Mars' geologiske historie inddeles i 3 perioder:

- *Noachian* (4,1-3,7 mia. år siden)
- *Hesperian* (3,7-3 mia. år siden)
- *Amazonian* (3 mia. år – i dag).

Fra den tidligste periode fra planetens dannelse ved 4,5 mia år og frem til 4,1 mia år er der ikke mange spor, men man ved, at Mars tidligt havde et magnetfelt, og at der blev dannet mange store nedslagskratere, herunder Hellas Planitia med en dybde på over 7 km og en diameter på 1.500 km, der markerer overgangen til den ældste periode, Noachian.

Noachian er karakteriseret ved mange kratere, høje erosionsrater, og det er i denne periode, man finder spor efter udbredte dal- og flodsystemer (figur 4). Vulkanisme var koncentreret omkring Tharsis, et vulkansk plateau med nogle af Solsystemets største vulkaner, der blev dannet i denne periode. Man finder lermaterialer overalt i denne periode. Lermaterialer dannes ved forvitring af klipper med flydende vand, som derfor jævnlige menes at have forekommet. Ved afslutningen på Noachian skete der en markant nedgang i erosions- og forvitringsprocesserne, bortset fra vulkanismen som fortsatte gennem Hesperian, hvor en tredjedel af overfladen efterhånden blev dækket af lavastrømme. Det er også i Hesperian, at man ser spor efter voldsomme flodbølger, der opstod episodisk, formodentlig ved udslip af vand og gasser i kølvandet på vulkanudbrud, og efterlod søer af stillestående vand, og sedimentære aflejringer af sulfatholdige mineraler (figur 4).



Figur 4. Venstre: Forgrenet dalsystem fra Mars. Forgrenede dalsystemer indikerer, at flydende vand har dannet flodsystemer og eroderet overfladen. Højre: Spor efter en flodbølge. Kraterne er 8-10 km i diameter [1].

I Amazonian skete der en yderligere nedgang i den geologiske aktivitet, og forekomst af flydende vand på overfladen blev reduceret til sjældne, mindre udløb af vand. Den vigtigste proces i denne periode er oxidering af de jernholdige mineraler på overfladen, som har givet Mars den kendte røde farve, den har i dag. De sidste 3 mia. år har været en periode karakteriseret af et koldt og tørt klima.

Tegn på flydende vand

Sporene efter flodsystemer og de udbredte forekomster af lermaterialer i Noachian indikerer, at perioden i det mindste engang imellem var varm og tillod flydende vand på overfladen. Det er i aflejringer fra denne periode, at man mener, der er bedst chance for at finde spor af fortidigt liv på Mars. På Jorden dannes forgrenede flodsystemer ved, at det regner i området, og at afløb af regnvandet foregår langs overfladen i større og større floder. De forgrenede flodsystemer på Mars adskiller sig imidlertid fra tilsvarende strukturer på Jorden ved, at

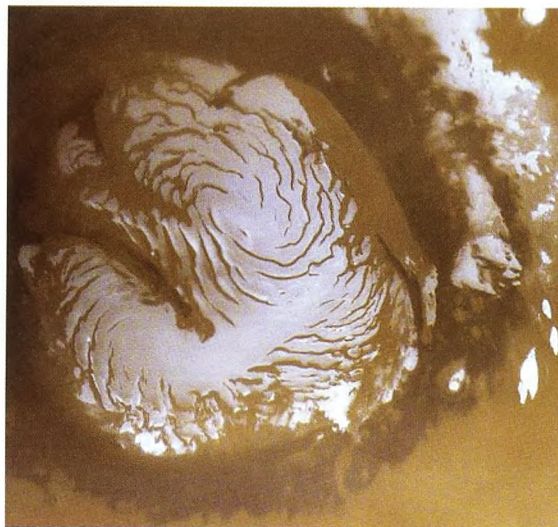
de mangler de fineste grene, altså de mindste bække i den øverste del af forgreningen, og ved at erosionen har været meget mindre end på Jorden. Det kan indikere, at andre processer end regn har dannet dem, og at overfladen ikke nødvendigvis har været varm hele tiden. Muligvis kan nedbøren have faldet som sne, der senere er smeltet, og afløb af smeltevandet har dannet flodsystemerne. Eller flodsystemerne kan være dannet ud fra underjordiske kilder med udspring af varmt, saltholdigt grundvand, som man kender eksempler på fra Jorden i det nordlige Canada. Det er muligt, at voldsomme vulkanudbrud eller sammenstød med kometer eller meteorer har tilført varme og gasser, der midlertidigt har kunnet opretholde en tyk atmosfære og dermed højere tryk og varmere overfladetemperaturer end i dag.

Klimaskift som konsekvens af kæmpenedslag

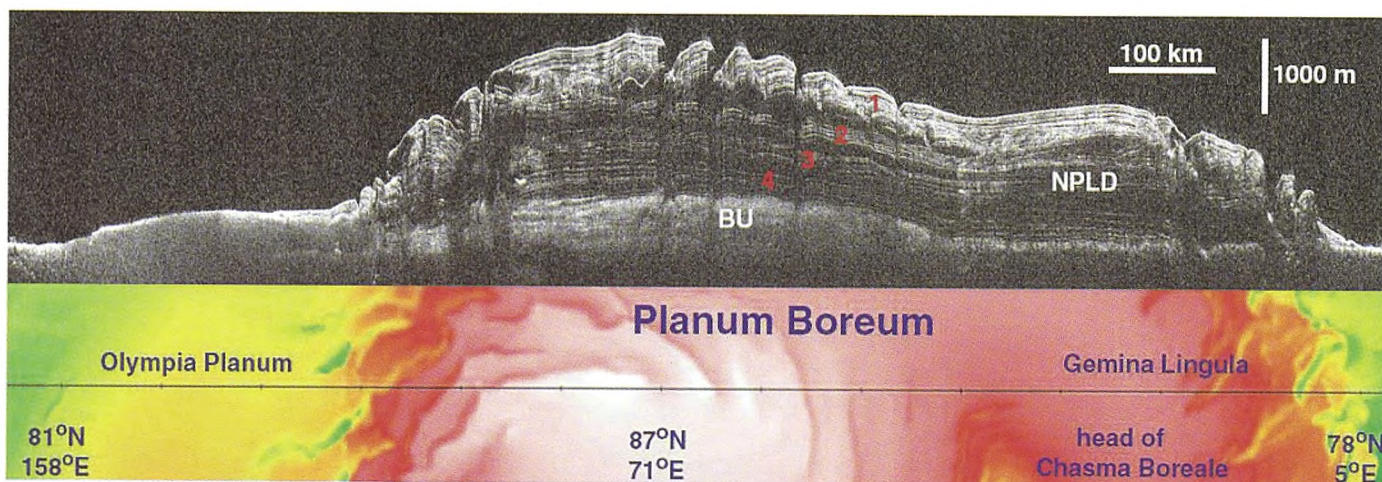
De mineralogiske og geomorfologiske indikationer af udbredt flydende vand i Noachian er overbevisende, men det er endnu ikke kendt, hvordan de varme forhold kunne opstå, eller hvorfor de så pludseligt ophørte med afslutningen af Noachian. I forhold til Jorden har Mars en mindre tyngdekraft til at holde på atmosfæren, og den mangler et magnetfelt, der beskytter atmosfæren. Måske mistede Mars sin atmosfære i denne periode, måske var atmosfæren blevet opretholdt gennem Noachian af vulkanisme og gasser, der blev frigivet i store mængder under opbygningen af Tharsis plateauet, og måske var hele den gunstige situation opstået som en eftervirkning af det kæmpe nedslag, der dannede Hellas krateret ved overgangen til Noachian. Tharsis ligger nemlig på den anden side af Mars lige modsat til Hellas krateret. Under alle omstændigheder markerer overgangen til Hesperian afslutningen på en periode med udbredte forekomster af flydende vand. Herefter frøs vandet til is, kun afbrudt af enkeltstående udbrud af flydende vand.

Den kolde Mars af i dag

Igennem de sidste tre mia. år har forholdene på Mars som nævnt været karakteriseret af et koldt, tørt og støvet klima. De mest markante processer i perioden involverer is og støv, og i de polare områder er der efterhånden opbygget kilometertykkede aflejringer af is og støv (figur 5). De polare iskapper, der hovedsageligt består af H_2O -is, har en lagdeling der strækker sig gennem iskappen over hundreder af kilometer [6]. Lagene dannes på grund af variationer i støvindholdet, og vidner om klimaændringer igennem tiden, på samme måde som Jordens klima kan aflæses af iskerner fra iskapperne på Jorden (figur 6).



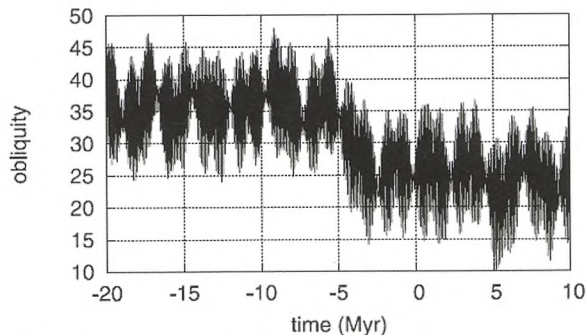
Figur 5. Den nordlige iskappe på Mars er ca. 3 km tyk og 900 km i diameter [1]. Billedet er taget om sommeren på den nordlige halvkugle, hvor CO_2 -sneen er fordampet, og den hvide H_2O -is er blotlagt på overfladen. Iskappen har en spiralformet struktur, der menes at opstå som følge af sublimation af is ved sydvendte skråninger og vekselvirkning med vindsystemer over iskappen.



Figur 6. Den nordlige iskappes indre struktur og lagdeling er opmålt med radar fra satellit [6]. Forskellige geologiske strukturer er markeret: den nordlige iskappe (NPLD), rester af en ældre iskappe og støvrige lag (BU), interne stratigrafiske strukturer i isen (1-4). Det nederste udsnit viser et højdekort af et udsnit af iskappen, og den sorte linie markerer satellitbanen.

Klimaskift og ændring af aksehældningen

På Mars ved man nu, at baneparametrene har varieret gennem tiden og givet anledning til store variationer i klimaet formodentlig gennem hele Mars' historie [7]. Aksehældningen er i dag tæt på Jordens, men beregninger har vist, at den har svinget mellem 15° og 35° med en periode på ca. 100.000 år igennem de sidste 5 millioner år. For 5 millioner siden skiftede svingningen fra et højere niveau, hvor den havde svinget mellem 25° og 45° (figur 7).



Figur 7. Beregning af variationen i aksehældning (obliquity) i grader fra 20 millioner år før nu til om 10 millioner år [7]. Aksehældningen varierer med en periode på ca. 100.000 år, og en periode på 2,4 millioner år. For 5 millioner år siden skete der et skift i niveau fra ca. 35° til de nuværende ca. 25° .

Klimamodeller har vist, at for aksehældninger højere end ca. 35° bliver det så varmt ved polen om sommeren, at H_2O -is ikke længere er stabilt på overfladen, men sublimerer op i atmosfæren [8]. Man mener derfor, at iskappen i nord først blev dannet for 5 millioner år siden, hvorefter aksehældning permanent har været under 35° , men man har endnu ikke kunnet påvise en entydig sammenhæng mellem solindstrålingen og iskappens lagdeling, der ville kunne bekræfte denne datering. Det er kun muligt at beregne variationerne i solindstråling sikkert tilbage til 20 millioner år før nu. Før 20 millioner år er beregningen ikke længere entydig, og man mener, at aksehældningen tidligere kan have svinget mellem 0° og 60° . Ved middelbreddegrader er der fundet isaflejringer og geologiske indikationer af gletscheraktiviteter, og det er muligt, at disse strukturer er dannet på et tidspunkt, hvor aksehældningen i en længere periode var meget høj, og isdannelse ved lave breddegrader var mest favorabel. Klimamodelberegninger har vist, hvordan isaflejringer kan flytte sig ved fordampningsprocesser som følge af ændringer i solindstråling, og de indikerer, at også de store forekomster af permafrost på høje breddegrader indgår i denne proces. Vi kan derfor ikke vide med sikkerhed om de permafrostholdige områder, der findes i Mars' undergrund i dag, har haft is igennem de sidste tre mia. år, eller om de måske har været udtørrede i perioder.

Liv på Mars?

Udforskningen af Mars viser, at der engang var flydende vand på planetens overfladen. De lerminerale og sedimentære klipper, som man har fundet på Mars,

er dannet ved processer med flydende vand for 3,5-4 milliarder år siden, og de viser at flydende vand engang må have eksisteret gennem tusinder, måske millioner af år på overfladen af Mars. En afgørende betingelse for liv er opfyldt, men det er endnu uafklaret, om der var liv i vandet på Mars. Indtil videre er det bedste spor efter liv på Mars meteoritten Allan Hills 84001 (ALH84001), som blev fundet på Antarktis af et hold amerikanske meteoritjægere i 1984. Den menes at stamme fra Mars, og er dateret til knap 4 milliarder år før nu, det vil sige i den periode, hvor Mars var varm og havde flydende vand. Man har fundet nogle strukturer i ALH84001, som muligvis er rester af fossile bakterier, men det er endnu uafklaret om strukturerne kunne være dannet ved ikke-biologiske, fysisk/kemiske processer, hvor der ikke indgik liv, eller om meteoritten kunne være forurenet af organisk materiale fra Jorden. Den næste mission til Mars er NASAs Mars Science Laboratory, som er en rover, der skal sendes afsted i slutningen af 2011. Formålet med denne mission er at analysere jordprøver og boreprøver fra sten for at afklare om Mars var, eller stadig er, beboelig for mikrobiologisk liv. Om livet engang fandtes på Mars, eller om det stadig eksisterer i Mars's undergrund, er åbne spørgsmål, der fortsat er målet for kommende missioner.

Litteratur

- [1] Billederne er fra NASA's Planetary Photojournal: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- [2] I. de Pater og J. J. Lissauer (2007). Planetary Sciences. Cambridge University Press.
- [3] M. H. Carr og J. W. Head III (2009). Geologic history of Mars. Earth and Planetary Science Letters, doi:10.1016/j.epsl.2009.06.042.
- [4] W. F. Ruddiman (2008). Earth's climate. Past and Future. W. H. Freeman and Company Publishers. Chapter 2 from 1st edition; <http://www.whfreeman.com/Catalog/static/whf/ruddiman/>
- [5] J.-P. Bibring og 7 andre, the OMEGA team (2006). Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. Science, 312, 400-404.
- [6] R. J. Phillips og 26 andre (2008). Mars North Polar Deposits: Stratigraphy, Age and Dynamical Response. Science, 320, doi:10.1126/science.1157546.
- [7] J. Laskar, A.C.M. Correia, M. Gastineau, F. Joutel, B. Levrard og P. Robutel (2004). Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities on Mars. Icarus, 170, 343-364.
- [8] B. Levrard, F. Forget, F. Montmessin og J. Laskar (2007). Recent formation and evolution of northern Martian polar layered deposits as inferred from a global climate model. Journal of Geophysical Research, 112, E06012, doi:10.1029/2006JE002772.



Christine S. Hvidberg er lektor ved Is og klima gruppen på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Hun arbejder med isflydning og massebalance af iskapper, især rettet mod studier af Grønlands Indlandsis, og med is og klima på Mars.

Vindmøller og helikoptere – breddeopgave 42 og 43 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af KVANT var disse breddeopgaver fra RUC (nr. 42 og 43 i rækken her i KVANT):

Breddeopgaver 42 og 43. Vindmøller og helikoptere

42. Giv en øvre grænse for effekten af en vindmølle. Begrund svaret.

43. Hvilken effekt skal motoren i en helikopter yde for at holde helikopteren svævende? Begrund svaret.

Løsninger

42. Løsningen af vindmølleopgaven gives i form af en udfoldet version af den:

“En vindmølle omsætter bevægelsesenergi i vinden til f.eks. elektrisk energi. Vindhastigheden kaldes v og luftens massefylde ρ .

1. Hvor stor er vindens bevægelsesenergi pr. rumfangsenhed?

Møllevingernes overstrykningsareal kaldes A . Vingerne er stillet vinkelret på vindens retning.

2. Hvor stort et rumfang luft passerer A i et tidsrum Δt ?

3. Hvor stor en mængde bevægelsesenergi når frem til overstrykningsarealet i et tidsrum Δt ?

Møllen kan ikke levere større effekt (energi pr. tidsenhed) end bevægelsesenergien af den mængde luft, der når frem til overstrykningsarealet pr. tidsenhed (svarende til total opbremsning af luften ved møllen).

4. Hvad er formelen for denne øvre grænse for effekten af vindmøllen udtrykt ved A , v og ρ ?

Svarene er henholdsvis $\frac{1}{2}\rho v^2$, $Av\Delta t$, $\frac{1}{2}\rho Av^3\Delta t$ og endelig $\frac{1}{2}\rho Av^3$ som facit. Den øvre grænse for effekten af en vindmølle, $P_{\max}$, er altså:

$$P_{\max} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (1)$$

Den kan, bortset fra talfaktoren, også findes ved dimensionsanalyse.

43. Løsningen af helikopteropgaven ligger i en kombination af overslag over impuls- og energitilførslen per tidsenhed til luften. Antages virkningen af helikopterpropellen at være en lodret nedadgående luftstrøm med strømningshastigheden v og tværsnitsarealet A , vil impulstilførslen til luften per tidsenhed være $\rho Av \cdot v$, hvor ρ er luftens massefylde. Det er så ifølge Newtons anden lov lig med helikopterens kraftpåvirkning på luften og ifølge Newtons tredje lov også lig med luftens samlede kraftpåvirkning på helikopteren. Hvis helikopteren ikke bevæger sig i op- eller nedadgående retning, må det igen være lig med tyngdekraften, mg , på helikopteren, dvs.:

$$\rho Av^2 = mg \quad (2)$$

Energитilførslen til luften per tidsenhed er $\frac{1}{2}\rho Av \cdot v^2$. Indsættes v bestemt af ligning (2) heri, fås:

$$P_{\min} = \sqrt{\frac{m^3 g^3}{4\rho A}} \quad (3)$$

for den minimale effekt helikopterens motor skal yde for at holde helikopteren svævende. Hvis luften af helikopterens propel sættes i bevægelse udover den nedadgående, er kravet til motoren større end $P_{\min}$. Da mg optræder som samlet størrelse i problemet her, kan også ligning (3), bortset fra talfaktoren, findes ved dimensionsanalyse. For at benytte ligningen overslagsmæssigt kan A identificeres med helikopterpropellens overstrykningsareal.

Kommentarer

1. Breddeopgaverne har indtil sommeren 2007 i første omgang været stillet som eksamensopgaver på det såkaldte Breddekursus på RUC. Breddekurset, som var på 18 ECTS point og lå på tredje studieår efter det toårige basisstudie på RUC, er siden ved opdelingen af studierne i adskilte bachelordele og kandidatdele blevet delt i de to kurser “Fysisk problemløsning I” på 7,5 ECTS point og “Fysisk problemløsning II” på 7,5 ECTS point. Herefter ligger Fysisk problemløsning I (modsvarende den første halvdel af det gamle Breddekursus) som en del af bachelorstudiet og kan enten følges på basisstudiets andet år eller på bacheloruddannelsens tredje år efter basisstudiet. Hvorimod Fysisk problemløsning II (modsvarende den anden halvdel af det gamle Breddekursus) modsat er tænkt som “kronen på værket” mod slutningen af kandidatstudiet, hvor både de studerendes større fysikfaglige modenhed og deres større teoretiske ballast kan komme i spil. Det primære formål med begge de to nye kurser er fortsat, som med det tidligere Breddekursus, populært sagt, at man skal trænes i at tænke som en fysiker. Sekundært skal kurserne styrke deltagernes viden om og forståelse af fysiske fænomener og teorier indenfor klassisk og moderne fysik i bredden.

På grund af den forskellige placering i fysikstudiet af de to halvdele af det tidligere Breddekursus adskiller eksamenerne efter de to kurser sig nu fra hinanden. Eksamen i Fysisk problemløsning I inddrager kun det halve pensum af eksamen i Fysisk problemløsning II. Og vi forsøger at gøre opgaverne til eksamen i Fysisk problemløsning I mindre krævende end opgaverne til Fysisk problemløsning II. Modstillingen af vindmølleopgaven og helikopteropgaven i artiklen her kan tjene som illustration af det sidste. De to opgaver ligger pensummæssigt tæt op af hinanden. Men den ene er mere krævende end den anden efter vores vurdering. Vindmølleopgaven kunne være stillet til en Fysisk problemløsning I eksamen, hvorimod helikopteropgaven blev stillet for nylig til eksamen i Fysisk problemløsning II.

2. I KVANT nr. 3, oktober 2000, i KVANT nr. 1, april 2001 og i KVANT nr. 2, juli 2008 blev løsningerne til tre breddeopgaver som her med vindmølleopgaven givet i form af udfoldninger af opgaverne. De fire udfoldede og formaliserede opgaver tilhører et sæt på 12, der modsvarer 12 breddeopgaver. Som tidligere nævnt i serien af breddeopgaveartikler har jeg lavet sættet som et af midlerne til for de fysikstuderende på RUC at tydeliggøre, hvad det er for en slags bolde, der går efter i en undervisning byggende på de åbent formulerede opgaver. Selvom der er et spring i sværhedsgrad fra vindmølleopgaven til helikopteropgaven, er det erfaringsmæssigt ikke så grundlæggende som springet fra den udfoldede til den åbne version af vindmølleopgaven. Det er derfor vigtigt at gå i dialog med de studerende om både størrelsen og relevansen af udfordringerne i arbejdet med åbent stillede problemer frem for de opgavetyper, de oftest har oplevet og er vant til.

3. Ovenstående udregning af den øvre grænse for effekten af en vindmølle er u fysisk derved, at den går ud fra fuldstændig opbremsning af vinden ved møllen med en umulig ophobning af luftmasserne til følge. Tages der højde for den nødvendige bortstrømning af luften efter dens nedbremsning ved møllen kan der argumenteres for at sænke den fundne øvre grænse med faktoren 16/27 under antagelse af, at luftens fart ved vindmøllen er gennemsnittet af farten før og efter møllen i et pænt strømmerlinierør. Under alle omstændigheder er resultatet $\rho A v^3$ gange et ukendt tal, som allerede fremgår af en dimensionsanalyse, væsentligt uanset tallet. Det har selvfølgelig f.eks. afgørende betydning for overslagsmæssige vurderinger af energiudbyttet ved forskellige placeringer og vindmøllehøjder, at v indgår i formelen i potensen 3 og ikke i f.eks. potensen 2 eller 4.

For mig er dette et eksempel på en af måderne fysik vekselvirker med teknologi på, nemlig ved at levere søkort for teknologiudviklingssejladsen. Men et er skib at føre, et andet søkort at forstå. Og teknologiudvikling er noget mere og andet end anvendt fysik.

Vindmølleverdenen er også leveringsdygtig i eksempler, der viser en tæt sammenvævning af fysik- og teknologiudvikling. Det gælder f.eks. ved udregningen af optimale vingeprofiler som en sag for specialister i aerodynamik.

For mig er vindmøller et godt case til illustration af forskelligartede eksempler på vekselvirkning imellem fysik og teknologi.

Breddeopgave 44.

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave (nr.44 i rækken her i KVANT):

Hvor knækker en væltende murstensskorsten under faldet? Begrund svaret.

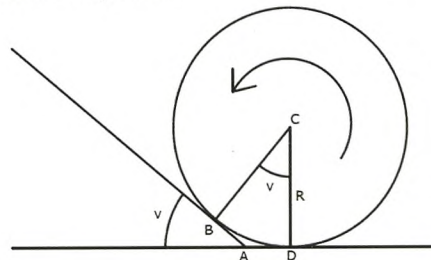
Løsning og kommentar bringes i næste nummer.

Kommentarer til breddeopgaven om rulning

I min oprydning i forrige nummer af tanketorsken ved retfærdiggørelse af brugen af momentsætningen om røringpunktet ved rulning med henvisning til, at punktet er i øjeblikkelig hvile, havde jeg selv introduceret en tanketorsk. Hvis overgangen imellem det vandrette plan og skråplanet ikke er udjævnet med en krumningsradius større end kuglens vil der ved overgangen finde et stød med tilhørende energitab sted, som der ikke var taget højde for i regningerne. Hvis der omvendt var en udjævning af overgangen kan opgaven løses med en energibetragtning som gjort, men så er det ikke simpelt at integrere bevægelsesligningerne. Jeg er blevet gjort opmærksom på fejlen af E.H. Hauge, som sammen med J.S. Høye har gennemregnet stødproblemet, der både er kompliceret og lærerigt at undersøge. Beregningerne kan findes på webadressen: <http://home.phys.ntnu.no/rulleproblem>.

En anden læser, Carl-Erik Sølberg, har sendt en alternativ løsning af breddeopgave nr. 41 om rulning:

Lad os først bemærke, at den lodrette højdeforskel mellem C og B (på figuren nedenfor) er $R \cdot \cos v$. Hvor B er røringpunktet mellem skråplan og cylinder, og C er centret for den cirkulære cylinder.



Når vi skal bruge energisætningen

$$\Delta E_{\text{kin}} + \Delta E_{\text{pot}} = W_{\text{indre}}^{\text{non}} + W_{\text{ydre}}^{\text{non}} \quad (4)$$

skal vi først bemærke, at systemet, vi anvender den på, er cylinderen og dernæst, at de ikke-konservative kræfters arbejde (højresiden) er nul. De indre kræfters arbejde er nul, da legemet er stift og friktionens arbejde er nul, da angrebspunktets hastighed er nul. Cylinderen ruller nemlig uden at glide. De konservative tyngdekrafters arbejde indregnes i den potentielle energi.

Så længe cylinderen ruller på det vandrette underlag er dens kinetiske energi lig:

$$\begin{aligned} E_{\text{kin}} &= E_{\text{trans}} + E_{\text{rot}} \\ &= \frac{1}{2} M v_0^2 + \frac{1}{2} I \omega_0^2 = \frac{1}{2} (1 + k) M v_0^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Når den er kommet op i det højeste punkt på skråplanen, da er massemidtunktet løftet den lodrette højde:

$$x_{\text{top}} \cdot \sin v + R \cdot \cos v - R \quad (6)$$

Da B er løftet $x_{\text{top}} \cdot \sin v$, og udgangshøjden var R :

Dens potentielle energitilvækst er derfor:

$$\Delta E_{\text{pot}} = Mg(x_{\text{top}} \cdot \sin v + R \cdot \cos v - R) \quad (7)$$

Da den kinetiske energi er nul i toppunktet, er dens tilvækst:

$$\Delta E_{\text{kin}} = -\frac{1}{2} (1 + k) M v_0^2 \quad (8)$$

Vi finder altså, at

$$x_{\text{top}} = \frac{1 + k}{2g \cdot \sin v} v_0^2 + \frac{R \cdot (1 - \cos v)}{\sin v} \quad (9)$$

Når dette resultat afviger fra Højgaards, skyldes det, at man skal anvende massemidtunktets højdetilvækst og ikke røringpunktets. Når fejlen ikke opdages i forbindelse med de alternative løsningsmetoder, skyldes det, at massemidtunktets koordinat langs skråplanen sættes til nul, i det øjeblik cylinderen berører planen første gang. Altså, at Højgaard sætter x_0 til 0. Den bør rettelig sættes til AB , altså $x_0 = R \cdot (1 - \cos v) / \sin v$. Bevægelsesmængdesætningen skal anvendes på massemidtunktspartiklen. Det er A , der har koordinaten nul!

Svar: Carl-Erik Sølberg har ret. Det er så tanketorsk nummer to i tilknytning til rulleopgaven (med den rigtige morale, at den normale retfærdiggørelse af momenttagning om røringpunktet som om det var et fast punkt med henvisning til, at det momentant er i hvile, er en tanketorsk). For at undgå begge tanketorsk skulle opgaven have lydt: *En hul og en massiv cylinder ruller til en begyndelse med samme fart op ad et skråplan. Hvad er forholdet imellem, hvor langt de ruller yderligere op ad skråplanet? Begrund svaret.* Det er denne opgave beregningerne i KVANT-artiklen er løsningerne til.



Stjernehimlen
den 15/7 kl. 0.00

Månens faser



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

Solsystemet ca. 15. juli

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

Astronomiske begivenheder

- 21/6 Sommersolhverv
- 15/6 Total måneformørkelse. Midten af totaliteten kl. 22.12
- 7/8 De lyse nætter ender
- 12/8 Stjerneskydssværmen *Perseiderne* kulminerer
- 23/9 Efterårsjævndøgn



Af Sven Munk og John Rosendal Nielsen, KVANT

Den buleløse galakse

ASTROFYSIK. Det Europæiske Syd Observatorium har frigivet nedenstående smukke billede af en noget usædvanlig spiralgalakse, idet spiralgalaksen ingen central bule har. Stjernerne i spiralgalaksen er typisk placeret i en tynd skive og i centrum er der en bule. NGC 3621, som spiralgalaksen hedder, har ikke en central bule, men er flad som en pandekage. Spiralgalaksen NGC 3621 findes i stjernebilledet Hydra (Søslangen) i en afstand af ca. 22 millioner lysår fra Jorden.



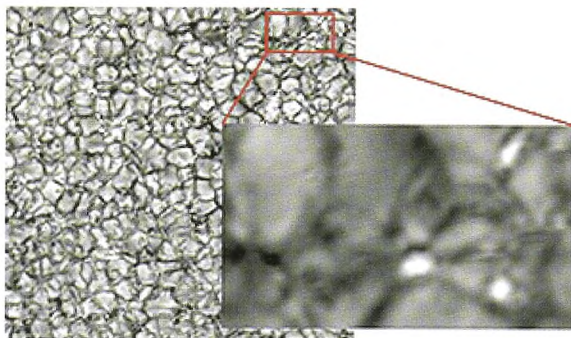
Astronomer mener, at galakser dannes uden en bule og bule skabes ved forstyrrelser fra andre galakser som ved et sammenstød. Et galaktisk sammenstød vil forstyrre den tynde skive af stjerner og skabe bule i centrum af galaksen. Det er sandsynligt at galakser vokser ved at smelte sammen med andre galakser, hvilket skulle resultere i flere og flere spiralgalakser med store centrale bule. Nyere forskning har dog indikeret, at buleløse galakser som NGC 3621 måske ikke er så ualmindelige som hidtil antaget.

NGC 3621 giver rig lejlighed til at studere en galakse uden en bule, idet den ligger forholdsvis tæt på. Billedet er optaget med Wide Field Imager af MPG/ESO 2,2 meter teleskopet på ESO's La Silla Observatorium i Chile.

Kilder: www.tycho.dk/article/articleview/6270; www.eso.org/public/denmark/news/eso1104.

Solen iagttages fra ballon

SOLFYSIK. Det ballonbårne teleskop "Sunrise" var på sin 5 dages rejse fra Kiruna til Canada i stand til at skaffe ny viden om processerne på solens overflade. Spejlteleskopet, der har en diameter på 1 m, kunne præstere en opløsningssevne på 100 km, hvorved udprægede lyse punkter (se billedet) i fotosfæren kunne undersøges nærmere. Da ballonen bevægede sig i en højde på 35-37 km var det desuden muligt at registrere den UV-stråling, som ellers bliver absorberet i atmosfæren.



I de lyse punkter ("bright spots") kan magnetfeltets styrke nå op på 0,18 T, hvilket er 3000 gange jordens magnetfelt. Desuden er temperaturen omkring 1000 K højere end i de omgivende umagnetiske områder. Forskerne har også bestemt styrken af UV-strålingen i disse punkter. Her viste det sig, at denne er 5 gange højere end i omgivelserne. På sin vej til Jordens overflade bliver Solens UV-stråling absorberet i den øvre del af atmosfæren. Derved bliver luften opvarmet. Det kunne være interessant at vide om Solens varierende UV-stråling har en klimatisk effekt.

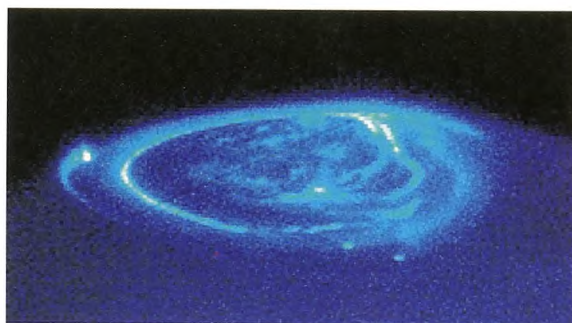
Solens overflade koger bestandigt. Varm plasma stiger op fra det indre, afkøles og synker tilbage. Disse kogende strømme viser sig som netagtige strukturer (også betegnet granulation) med en karakteristisk længde på nogle tusind kilometer.

Kilder: *Astrophysical Journal Letters* **723**, L127-L189 (2010) – 12 artikler om Sunrise-missionen.

Radioteleskop kan finde exoplaneter

PLANETFYSIK. Det ser nu ud til, at det bliver lettere at opdage store exoplaneter a la Jupiter og Saturn, der bevæger sig i stor afstand fra centralstjernen. Den engelske forsker Jonathan Nicols har påvist, at sådanne exoplanter over afstande på mange lysår afslører deres tilstedeværelse gennem radiostråling fra polarlys (aurora). Med denne metode kan radioteleskoper på Jorden deltage i eftersøgningen af exoplaneter.

Som illustration af metodens muligheder angiver Jonathan Nicols, University of Leicester, at en Jupiter-lignende planet, som bevæger sig i en bane som Plutos om Solen, kan detekteres over afstande på måske 150 lysår. Når afstanden mellem exoplanet og centralstjerne bliver meget stor, er betydningen af solvinden for styrken af polarlyset aftaget meget. På Jupiter og Saturn skyldes polarlyset primært, at der kommer elektrisk ladede partikler hidrørende fra vulkanisme på disse planeters måner.



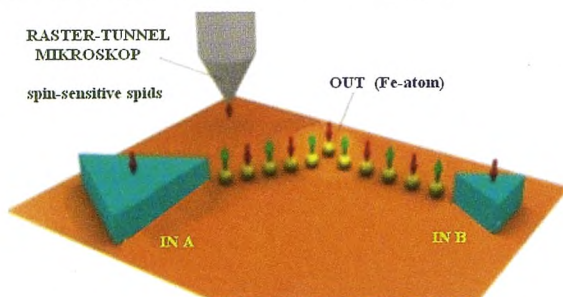
Billedet viser polarlys på Jupiter. En fordel ved at måle radiosignaler er, at exoplanetens omløbstid (Jupiter: 12 år og Saturn: 30 år) ikke spiller nogen rolle. Som måleinstrument kunne det nye europæiske antennenet for lavfrekvent radiostråling, LOFAR, formentlig gøre god fyldest. Dette net er spredt ud over hele Europa og omfatter omkring 10.000 enkeltantenner.

Kilder: "M-I coupling at Jupiter-like exoplanets: implications for detectability of auroral radio emissions", J. Nicols; National Astronomy Meeting (NAM 2011); University of Leicester, LOFAR.

Logisk OR med få atomer

FASTSTOFFYSIK. Med atomer af jern (Fe) og kobolt (Co) har A.A. Khajetoorians med flere lavet en spintronik-OR-gate, som i princippet fungerer uden strøm. Binære talværdier bæres af atomernes spin frem til de tre Fe-atomer, som udgør den egentlige gate og som måler omkring 3 nm.

De turkisfarvede trekanter er gatens to INPUT. Hver består af 100 koboltatomer, som ligger i to lag. På tegningen repræsenterer gule kugler enkeltatomer af jern, der, som vist, ligger på to rækker, der mødes, hvor gatens OUTPUT befnder sig. Spinretningerne vises med pile (rød = NED og grøn = OP). Spin-retningerne i de to øer af koboltatomer styres ved hjælp af raster-tunnel-mikroskopet.



Den magnetiske omlejring i atomerne sker i løbet af 0,1 ps (10^{-13} s) og derfor er ultra-højhastigheds-logik i det mindste en teoretisk mulighed. Om dette så kan udmøntes i praksis, vides endnu ikke.

Kilde: "Realizing All-Spin Based Logic Operations Atom by Atom", A.A. Khajetoorians et al., *Science*, DOI: 10.1126/science.1201725, 2011; <http://www.sciencemag.org/content/early/2011/05/04/science.1201725>.

Elektrisk pincet holder protein

BIOFYSIK. Elektrostatisk kræfter kan bruges til at fastholde enkelte molekyler, som man vil måle på. Hvis undersøgelserne retter sig mod nanopartikler, biomolekyler eller vira synes den nye metode at åbne nye perspektiver. Den ellers potentialrige optiske pincet – med to krydsede laserstråler – er ikke tilstrækkelig, hvis partikelstørrelsen er under 100 nm. Forskerne Madhavi Krishnan m.fl. fremhæver, at metoden kontaktløst kan indsluse og fastholde molekyler.



Billedet viser en lettere idealiseret udgave af det målekammer, som benyttes. De gule kugler skal forestille molekyler, som fastholdes af det elektriske felt. I artiklen beskrives hvordan der blev ridset meget smalle kanaler med en bredde på 0,1 μm i et stykke siliciumdioxid. Over disse blev anbragt en glasskive med elektriske ladninger og det var det elektriske felt herfra, som blev brugt til at flytte og fastholde molekylerne. Med en passende mængde omhu under justeringen af det elektriske felt kunne forskerne manipulere med nanopartikler af guld, kunststof samt fedtmolekyler.

Kilder: "Geometry-induced electrostatic trapping of nanometric objects in a fluid", Madhavi Krishnan et al.; *Nature*, Vol. 467, S. 692, doi: 10.1038/nature09404; ETH Zürich, <http://www.lpc.ethz.ch/index.0>

Luft som laser-medium

LASERFYSIK. Med en UV-laser (226 nm) kan man med tilstrækkelig strålingstæthed spalte iltmolekyler, så de bliver frie atomer. Dette kan i princippet ske et vilkårligt valgt sted i luften. De frigjorte iltatomer befnder sig umiddelbart efter spaltningen i en exciteret tilstand. Ved henfald udsender disse atomer IR-stråling med en bølglængde på 845 nm. Da mange iltatomer befnder sig i samme tilstand opstår der en kollektiv virkning, som den kendes fra f.eks. gaslasere. Da der ikke er optiske spejle til at styre strålingen vil stråle-retningen skifte på tilfældig måde, men, skriver forskerne, fortrinsvis i retninger mod den exciterende UV-laser.

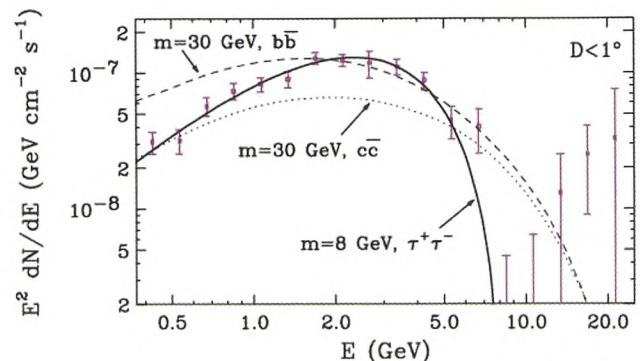
Kilde: "High-Gain Backward Lasing in Air", A. Dogariu et al.; *Science*, DOI: 10.1126/science.1199492, 2011.

Gammastråling fra mørkt stof

ASTROFYSIK. Det amerikanske "Fermi Gamma Ray" teleskop har i to år samlet på gammakvanter, som skulle have deres oprindelse i Mælkevejens centrum. I dette område forventer forskerne at finde, foruden det allerede kendte sorte hul, en ansamling af mørkt stof. Man skønner, at dette er fordelt over et større område og det derfor vil fremtræde som en diffus strålingskilde (i modsætning til en punktformet).

Allerede i 2002 opfangede den europæiske satellit "Integral" gammastråling, som kunne stamme fra henfald af mørkt stof i Mælkevejens centrum. Imidlertid var udstyret ikke følsomt nok til at understøtte denne hypotese.

Ombord på Fermi-teleskopet findes "Large Area Telescope" (LAT), som kan registrere gammastråling i energintervallet 0,3-100 GeV. Det kan 'se' i alle himmelrummets retninger, og dermed også mod Mælkevejens centrum.



Figuren viser et energispektrum for højenergi-gammafotoner, som er opfanget med Fermi-teleskopet. Forskerne gør opmærksom på, at måleresultaterne peger i retning af en proces, hvor partikler af mørkt stof (med en energi i intervallet 7,3-9,2 GeV) primært annihilerer til tau-leptoner. Det er dog stadig usikkert, om partikler af mørkt stof henfalder spontant. Forskerne har overvejet andre teoretiske processer (partikler), men de har endnu ikke fundet en, de synes bedre om.

Kilde: Dan Hooper, Lisa Goodenough: "Dark Matter Annihilation in The Galactic Center As Seen by the Fermi Gamma Ray Space Telescope", FERMILAB-PUB-10-414-A, arXiv: 1010.2752v1 [hep-ph] 13 Oct 2010.

Kepler-missionen – jagten på jordlignende planeter

Af Lars A. Buchhave, Niels Bohr Institutet og StarPlan, Københavns Universitet

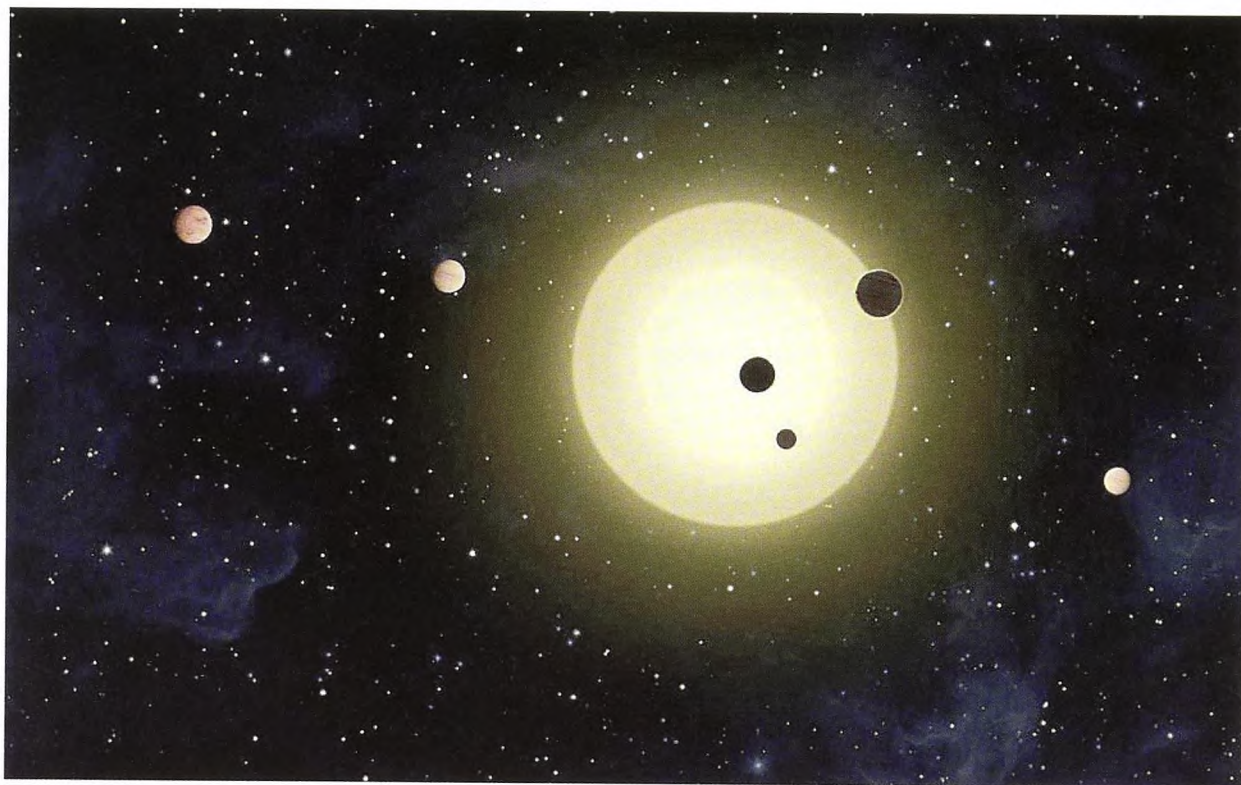
NASAs rummission Kepler, hvis hovedformål er at finde formørkende exoplaneter (planeter omkring andre stjerner end Solen), er i færd med at revolutionere exoplanet-feltet med sine opdagelser. Senest er over 1200 formørkende planetkandidater blevet offentliggjort, hvilket har mere end tredoblet antallet af kendte planeter og næsten trettendoblet antallet af kendte formørkende planeter. Vi kan hermed begynde at få et indblik i hyppigheden af forskellige planettyper omkring andre stjerner, og i den nære fremtid måske besvare spørgsmålet om, hvorvidt Jorden er unik eller almindelig i Mælkevejen. Blandt dette væld af planetkandidater er blandt andet det tætpakkede Kepler-11-system, som består af ikke mindre end seks formørkende planeter.

Introduktion til exoplaneter

Den første exoplanet omkring en sollignende stjerne blev opdaget i 1995, og med den opstod et forskningsfelt indenfor astronomien, som siden har været i rivende udvikling. I dag kender vi over 500 exoplaneter, hvoraf flere end 120 er formørkende planeter. Kepler-missionen har i februar 2011 offentliggjort over 1200 formørkende planetkandidater (se forklaring af begrebet kandidater nedenfor). Jeg har tidligere skrevet om formørkende planeter og NASAs Kepler-mission (KVANT nr. 2, maj 2009, [1]), og vil derfor her blot give en kort introduktion til emnet.

De fleste af de over 500 exoplaneter er fundet via radialhastighedsmetoden, hvor man måler refleksbevægelsen af værtsstjernen, når planeten bevæger sig rundt i sin bane omkring den. Ud fra radialhastighederne og viden om værtsstjernen kan man bestemme planetens

masse, men da orienteringen af baneplanet er ukendt, kan man kun finde den nedre grænse for planetens masse. Den observerede masse er givet ved $M \cdot \sin i$, hvor M er planetens sande masse, og i er inklinationen af baneplanet. Mange af planeterne er glohede Jupiter-lignende planeter, som i modsætning til vores egen Jupiter, der har en omløbstid på over 4000 dage, har utrolig korte omløbstider, helt ned til nogle få dage. Den korte omløbstid betyder, at disse planeters afstand til deres værtsstjerne er meget lille, de modtager en enorm mængde stråling, og har derfor meget høje overfladetemperaturer. Disse planeter hører sandsynligvis til sjældenhederne, men er alligevel den type planeter, der er fundet flest af, fordi de simpelthen er nemmere at opdage, da de på grund af deres store masse og korte omløbstid påvirker deres værtsstjerne mere, end hvis de havde en mindre masse, og/eller befandt sig længere væk.



Figur 1. En kunstners fortolkning af Kepler-11-systemet med seks formørkende planeter.

Når en planets baneplan er orienteret således, at den passerer ind foran værtsstjernen, og dermed formørker dennes lys, er der tale om en formørkende planet. Formørkende planeter giver os muligheden for at bestemme ikke blot den eksakte masse af planeten (da vi nu kan bestemme inklinationen af baneplanet) men også planetens radius, som er direkte proportional med lysstyrkeændringen af værtsstjernen, når planeten formørker denne. Dermed kan vi bestemme planetens gennemsnitlige tæthed, hvilket kan hjælpe os med at forstå planeternes sammensætning og indre struktur. Ud over bestemmelse af planeternes masse, radius og tæthed, giver formørkende planeter os muligheden for at udføre et væld af spændende opfølgende observationer. Der er eksempler på sådanne observationer af planetatmosfærer, hvor stoffer som metan, kulmonooxid og vand er opdaget. Der er også foretaget observationer af exoplaneters sekundære formørkelse, altså når de glohede "hot-Jupiters", som på grund af deres høje temperatur stråler kraftigt i det infrarøde, selv bliver formørket af værtsstjernen. I forbindelse med dette er det blevet postuleret, at vi har set de første beviser på vejrsystemer på exoplaneter, da planeterne er gravitationelt bundet, således at den samme side altid peger mod stjernen, og man kan observere, at varme bliver transporteret via kraftige vinde fra denne glohede "dag-side" til den koldere "natte-side" af planeterne.

Kepler-missionen og de første resultater

Kepler-missionen består af et rumbaseret fotometer, der blev opsendt i marts 2009. Keplers hovedformål er at udforske vores "nabolag" i Mælkevejen for Jordlignende planeter i eller i nærheden af den beboelige zone (den afstand fra værtsstjernen hvor der kan være flydende vand på overfladen af planeterne), og dermed vurdere hvor mange af de milliarder af stjerner i vores galakse, der kan have sådanne planeter. Kepler er specificeret til at opnå en utrolig præcision i målingerne, lysændringer på kun 20 milliontedele, og vil observere det samme felt i hele missionens levetid på 3,5 år.

I februar 2011 offentliggjorde Kepler-holdet over 1200 planetkandidater fra de første fire måneders observationer [2]. Til sammenligning har det taget over 10 år at opdage de over 100 formørkende planeter, vi kendte inden Kepler-missionen.

Falske positiver

Planeterne opdaget af Kepler betegnes "kandidater", fordi der er andre astrofysiske fænomener end planeter, som kan være årsag til lyskurverne. Disse kaldes "falske positiver", og kan f.eks. være formørkende dobbelt- eller tripelstjernesystemer, som f.eks. består af en kæmpestjerne og et par mindre stjerner, som formørker hinanden. Listen over mulige systemer, som kan efterligne en planets lyskurve, er lang.

Det er med andre ord nødvendigt at bekræfte, at de lyskurver man observerer, faktisk stammer fra planeter. For hovedparten af de over 120 formørkende planeter vi kender til i dag, er radialhastighedsmetoden (RH)

blevet brugt som uafhængig bekræftelse. Når planeterne bevæger sig i deres bane omkring stjernen, trækker deres tyngdekraft nemlig i deres værtsstjerne, og denne "rokken" kan måles som en Dopplerforskydning af stjernens spektrum. Hvis man observerer den samme periodicitet i formørkelserne i lyskurven, som man ser i Dopplerforskydningen af stjernens spektrum, er det en meget stærk indikator på, at det faktisk er en planet, man observerer, da man med to helt uafhængige målemetoder finder den samme periodicitet.

For langt hovedparten af de over 1200 planetkandidater Kepler har opdaget, findes ingen radialhastigheder, dels fordi det kræver mange ressourcer at observere et så stort antal stjerner og dels fordi radialhastighedsamplituden, for de fleste af Keplers planeter, vil være så lille, at vi simpelthen ikke kan opnå en høj nok præcision til at detektere dem. Det skyldes blandt andet, at mange af planeterne simpelthen er så små, at signalet drukner i målestøjkluder, og at mange af Keplers værtsstjerner er meget lyssvage, og dermed svære at måle på.

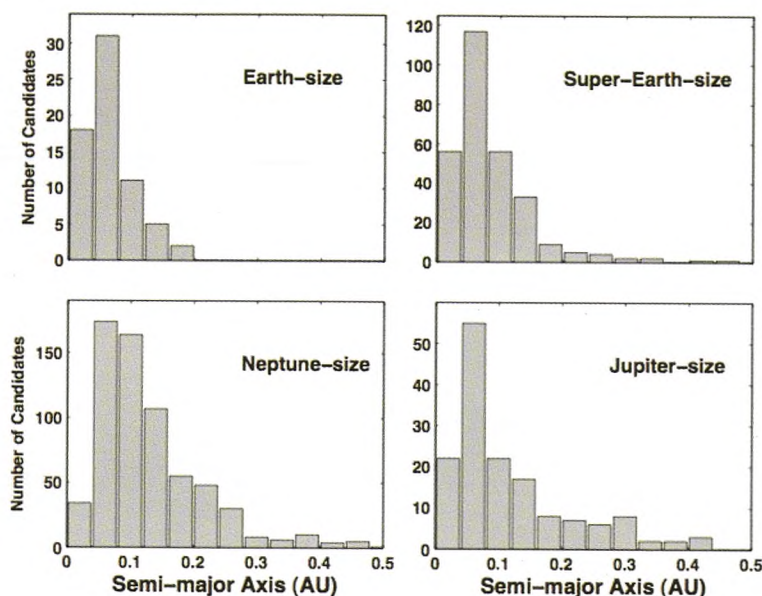
For at sætte opfølgingsarbejdet med radialhastigheden lidt i perspektiv er her et hurtigt estimat af, hvor lang tid det vil tage at lave radialhastighedsmålinger på de 1200 kandidater. Der er meget stor forskel på, hvor lang observationstid hver planet kræver for at opnå en passende radialhastighedspræcision, men et eksempel på observationstiden for en typisk Keplerkandidat er omkring 30 minutter for et enkelt radialhastighedspunkt. For at kunne bestemme planetens bane og dermed dens masse, skal man have ca. 10 sådanne punkter. Et gæt på den samlede observationstid for alle 1200 kandidater er altså 6000 timers(!) nettoobservationstid, og dette er endda temmelig underestimeret, da hovedparten af de små kandidater har behov for længere observationstider (hvis vi altså havde spektrografer med den nødvendige præcision). På en typisk observationsnat er der ca. seks timers nettoobservationstid, hvilket giver 1000 nætters observationer, men da Keplerfeltet kun er synligt i ca. fem måneder om året, vil det tage næsten syv år at observere radialhastigheder for alle 1200 kandidater med et enkelt teleskop ud fra dette "back-of-the-envelope" gæt.

Keplerholdet har dog gjort sig store anstrengelser for at sikre, at langt hovedparten af planetkandidaterne faktisk er planeter. Lyskurverne og et væld af opfølgende jordbaserede observationer er blevet gennemanalysert for at sikre, at planeterne faktisk er planeter, og hver kandidat har fået en karakter som skal illustrere, hvor sikker den er. Keplerholdet skønner, at omkring 80 % af de gode kandidater er planeter, mens det for de kandidater, som er markeret med dårligere karakterer, nok kun er 60 %, som vil vise sig at være planeter. Der foreligger med andre ord et enormt arbejde med at verificere kandidaterne, og der er samtidigt brug for nye metoder til at opnå dette mål. Keplerholdet, inklusiv undertegnede, arbejder i øjeblikket målrettet på netop dette, men det vil være for omfangsrigt at komme ind på detaljerne af det arbejde her.

Keplers 1200 planetkandidater

Når man kigger på de over 1.200 planetkandidater, må man altså tage et hav af forbehold. Dels ser vi kun planeter med korte baner, da vi jo kun ser på Keplers resultater fra de først fire måneders observationer. Samtidigt er de stjerner som Kepler observerer valgt på en sådan måde, at der er større sandsynlighed for

at opdage planeter omkring dem, og de er altså ikke repræsentative for alle stjerner i Mælkevejen. Og dels vil en del af kandidaterne vise sig ikke at være planeter, som beskrevet ovenfor. Dertil kommer, at kandidaternes radier på nuværende tidspunkt er baseret på en knap så robust bestemmelse af værtsstjernes radier, så størrelserne af kandidaterne er altså heller ikke sikre.



Figur 2. Antallet af planetkandidater som funktion af planetens afstand fra værtsstjernen. Antallet af alle typer af planeter er højere tættere ved stjernen, men falder ved ca. 0,04 AU (AU: 1 astronomisk enhed = afstanden fra Solen til Jorden). Antallet af jordlignende planeter falder hurtigt efter 0,2 AU, dels fordi sandsynligheden for, at planeten formørker værtsstjernen, er mindre her, og dels fordi der skal højere præcision til at detektere små planeter.

Type	Radius (R) i Jordradier	Antal af planetkandidater
Jord-størrelse	$R_p \leq 1,25$	68
Super-Jord-størrelse	$1,25 < R_p \leq 2,0$	288
Neptun- størrelse	$2,0 < R_p \leq 6,0$	662
Jupiter- størrelse	$6,0 < R_p \leq 15$	165
Meget store	$15,0 < R_p \leq 22,4$	19
Ikke-planeter	$R_p > 22,4$	15

Tabel 1. Antallet af forskellige typer planetkandidater Kepler har opdaget i de første fire måneders data. Før Kepler var kun en håndfuld af formørkende planeter kendt med størrelser mindre end eller lig med Neptuns. Kepler har fundet over 1000 kandidater med radier på størrelse med eller mindre end Neptuns.

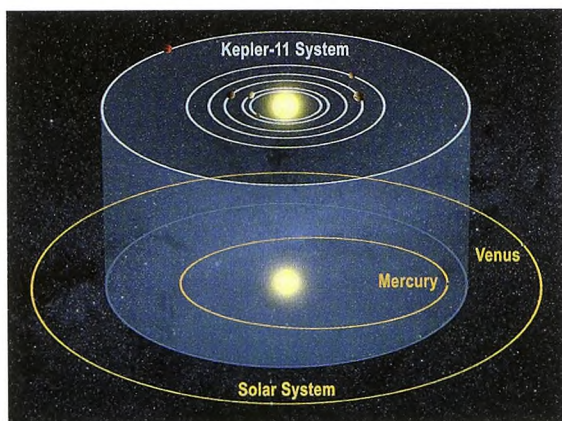
På trods af alle forbeholdene er det naturligvis meget spændende at se på sammensætningen af de mange planetkandidater. I figur 2 og i tabel 1 kan antallet af de forskellige planetkandidater ses, og tabel 1 definerer desuden fire forskellige typer af planeter ud fra deres størrelse. Før Kepler kendte vi kun til en håndfuld af formørkende planeter på størrelse med eller mindre end Neptun, men nu er der altså over 1000 sådanne planetkandidater; 300 af disse er af typerne super-Jorde eller Jorde, som vi før kun kendte to af. De første data tyder altså på, at mindre planeter er ganske almindelige.

Større planeter, der er tættere på deres stjerne, er de letteste at opdage, men antallet af Jupiterplaneter dominerer ikke antallet af planeter som Kepler har opdaget. Man kan derfor umiddelbart konkludere, at mindre planeter tæt på deres stjerne er mere almindelige end

store Jupiterplaneter. Desuden ses et fald i antallet af planeter helt tæt på stjernen, og dette må også formodes at være et virkeligt fænomen, da det, som sagt, er lettere at finde planeterne tættere på stjernen. Derimod kan faldet i antallet af jordlignende planeter længere væk end 0,2 astronomiske enheder sandsynligvis tilskrives, at der simpelthen er mindre geometrisk sandsynlighed for, at små planeter formørker deres værtsstjerne, og at det kræver højere målepræcision at finde mindre planeter. Antallet af observerede formørkelser vil stige i takt med, at Kepler opsamler mere data, og signal-til-støj forholdet af formørkelserne vil således stige, så vi bedre kan finde mindre planeter længere væk fra værtsstjernen.

Kepler-11-systemet

Nogle af Keplers 1200 planetkandidater er blevet valideret, karakteriseret, offentliggjort og dermed officielt navngivet. De har fået navnet Kepler-xb, hvor x er et fortløbende tal og b indikerer, at der er tale om den første planet i systemet. Kepler-1b til Kepler-3b var planeter, der allerede var opdaget i Keplerfeltet inden missionen blev sendt op. Kepler-4b til Kepler-8b er de første fem Keplerplaneter, som blev publiceret, hvor vi for Kepler-7b benyttede det Nordisk Optiske Teleskop på La Palma til at bestemme massen. Kepler-9 er et system bestående af to Saturn-masse-planeter samt en meget lille planet helt tæt på værtsstjernen og Kepler-10b er Keplers første verificerede planet med en fast overflade, som har en gennemsnitstæthed tæt på jern.



Figur 3. En kunstners fortolkning af Kepler-11-planetsystemet sammenlignet med vores eget Solsystem. Alle seks planeter i Kepler-11-planetsystemet befinder sig tættere på deres stjerne end Venus på Solen. Kepler-11 er således et særdeles tætpakket planetsystem sammenlignet med vores eget Solsystem. Stjernen er ca. 8 mia. år og har en lysstyrke svarende til Solen. Planeterne befinder sig således ikke i den beboelige zone og er for varme til at der findes flydende vand på dem. Der kan stadig gemme sig flere planeter længere ude.

Kepler-11 er et fantastisk system bestående af 6 planeter (se figur 1 og 3), som alle formørker deres værtsstjerne, 3 af dem endda på samme tid! Jeg vil anbefale interesserede at se en film [3] af Kepler-11-systemet, hvor man får et godt indtryk af, hvor kompakt systemet er.

Når flere planeter kredser omkring en stjerne i et så kompakt system, vil planeterne påvirke hinandens baner. Hvis kun én planet kredser omkring en stjerne, vil en eventuel formørkelse ske efter nøjagtig samme tidsinterval, hver gang; planeten vil altså have samme periode hele tiden. Formørkelsestidspunktet for de forskellige planeter i Kepler-11 systemet vil derimod ændre sig en smule på grund af planeterne indbyrdes gravitationelle påvirkninger. Dette fænomen kaldes "transit timing variations" eller TTV, og ved at modellere dette kan man for det første verificere, at der er tale om et system af planeter og derudover også estimere planeterne masser.

Det lader til at de super-Jorde, der hidtil er opdaget, hvor vi både kender radius og masse, har meget forskellige kompositioner, fra Neptun-lignende gasplaneter til jordlignende planeter med en fast overflade og alt derimellem. F.eks. har super-Jorden GJ 1214, som vi fandt med MEarth observatoriet i slutningen af 2009, en gennemsnitlig tæthed, som indikerer, at planeten består næsten udelukkende af vand (dette debatteres dog stadig).

Fremtiden

Med Kepler-missionens offentliggørelse af satellittens første resultater står det klart, at Kepler vil komme til at revolutionere exoplanetfeltet. Allerede nu kan vi begynde at se de første indikationer på, hvordan sammensætningen af planeter i vores omegn af Mælkevejen ser ud. Og i takt med at Kepler indsamler mere og mere data, vil vi få en mere komplet viden om, hvad hyppigheden af forskellige planettyper er omkring andre stjerner. I særdeleshed er hyppigheden af jordlignende planeter i og omkring den beboelige zone, hvor der er mulighed for flydende vand, uhyre interessant. I de kommende år vil vi få at se, om Kepler er i stand til at besvare spørgsmålet om, hvorvidt Jorden er en unik planet i vores galakse, eller om vores planet er en helt almindeligt forekommende planettype, der også findes omkring andre stjerner.

Mængden af ny information fra Kepler-satellitten er overvældende, og jeg håber, at denne artikel giver et indblik i, hvor stort et opfølgingsarbejde, der er nødvendigt før Keplers data kan omsættes til endegyldige opdagelser og statistiske resultater. Kepler-missionens levetid er i øjeblikket sat til 3,5 år, hvilket er den tid det vil tage at observere tre fortløbende formørkelser af en jordlignende planet i en jordlignende bane omkring en sollignende stjerne.

Litteratur

- [1] Lars Buchhave (2009), Exoplaneter og Kepler-missionen, KVANT nr. 2, maj 2009.
- [2] Borucki et al. (2011)
- [3] Kepler-11-film, http://www.nbi.ku.dk/english/news/news11/the_universe_is_teeming_with_planets/video_kepler/



Lars A. Buchhave er Carlsberg Fellow ved Niels Bohr Institutet og StarPlan ved Københavns Universitet. Han er bl.a. involveret i det spektroskopiske opfølgingsarbejde af formørkende planetkandidater fra NASAs Keplermission, MEarth og HATNet-projektet.

Aspekter af liv, information, virkelighed og fysik

Af Steen Rasmussen, Center for Fundamental Living Technology (FLinT), Institut for Fysik og Kemi, Syddansk Universitet og Santa Fe Institute, Santa Fe New Mexico, USA

I denne artikel diskuteres nogle grundlæggende spørgsmål, som uundgåeligt opstår i vores forsøg på at forstå, hvad liv er. Det er overraskende, at disse forsøg konfronterer os med både grundlagsproblemer i fysik og med filosofiske spørgsmål om definition af virkeligheden.

Indledning

Vi nærmer os systematisk det tidspunkt, hvor mennesket kan skabe levende systemer ud fra ikke-levende materialer. Der er imidlertid ikke generel enighed om, hvad liv er, hvilket gør diskussion om kunstigt liv kompliceret. I dag er der dog videnskabelig enighed om, at liv er en fysisk proces, der opstår som følge af særlige vekselvirkninger mellem de materielle komponenter, som et levende system er opbygget af. Denne opfattelse er imidlertid af nyere dato. Vi ved at mennesket indtil ca. midten af det 19. århundrede troede, at liv også havde en iboende vital metafysisk kraft, der ikke kunne beskrives ved hjælp af naturlovene. Denne opfattelse kan dokumenteres helt tilbage til oprindelsen af Hindu medicin for ca. 5000 år siden og er sandsynligvis meget ældre.

John von Neumann, faderen til den moderne computer, var i 1950'erne en af de første til at påpege, at hvis liv er en fysisk proces, bør det også være muligt at realisere levende processer i andre materialer, for eksempel ved hjælp af en helt anden kemi end moderne biokemi, eller i robotter eller computere. Dette perspektiv vinder i disse år hurtigt indpas i mange videnskabelige og ingeniørmæssige kredse, selvom der forståeligt nok stadig er en sund skepsis overfor denne temmeligt radikale idé.

Forskningen på FLinT centret i Odense fokuserer i store træk på at skabe liv fra grunden i fysisk-kemiske systemer ved at benytte ikke-biologiske (dvs. ikke-levende) materialer som byggeklodser. En aktuel diskussion af dette arbejde på dansk, findes fx i [1] og [2], eller på vores hjemmeside [3], hvor henvisninger til de videnskabelige detaljer også kan findes. De samfundsmæssige, miljømæssige, sikkerhedsmæssige, etiske og religiøse konsekvenser af anvendelserne af kunstigt liv, i levende teknologi kan findes under sektionen "Living technology" på hjemmesiden for Initiativet for Videnskab, Samfund og Policy [4]. Desuden har Teknologirådet og Etisk Råd udgivet et relevant diskussionsoplæg [5], der handler om syntetisk biologi, dvs. potentielle nye biologiske systemer eller andre fysisk-kemisk baserede livsformer.

¹Ontologi er den gren af filosofien (eller mere specifikt: metafysikken), der beskæftiger sig med de grundlæggende måder, noget kan være til på. Ontologiske spørgsmål handler altså om hvad der kan eksistere.

1. Baggrund

I denne artikel diskuterer jeg nogle grundlæggende spørgsmål, som uundgåeligt opstår i vores forsøg på at forstå hvad liv er. Disse fundamentale spørgsmål bliver mest klart sat i relief, hvis vi ser på levende processer implementeret på computere og internettet. Sådanne levende processer bliver stadig mere relevante dels fordi en traditionel styring ikke er mulig af vores hurtigt voksende netværk af kommunikerende, intelligente "devices" (mobiltelefoner, ipads, computere, og internettet), men må baseres på selvorganisering og adaptive algoritmer, der i stigende grad minder om levende processer. Stadigt mere avancerede computervira og medfølgende netværkssikkerhed peger i samme retning, og denne trend kan også tydeligt ses for automatiserede, industrielle produktionsprocesser, der i stadig højere grad bliver styret af kontrolsystemer, der undergår evolutionsprocesser. Jeg tror ikke der kan herske tvivl om, at vores teknologi bliver mere og mere levende. For en diskussion af konsekvenserne af den fremvoksende levende teknologi, se fx [6].

Men nu til essensen af liv: Følgende betragtninger stammer i al væsentlighed fra en videnskabelig artikel jeg publicerede i 1991 [7], hvilket er fra den periode, hvor det for alvor gik op for mig, hvad liv er. Jeg var på dette tidspunkt en ung forsker ansat på Los Alamos National Laboratory og Santa Fe Institutet i New Mexico, USA, hvor mine opgaver bl.a. bestod i at konstruere levende processer på computernetværk. Originale referencer findes i artiklen.

Det var dengang overraskende for mig, at disse forsøg på at skabe liv på computernetværk konfronterede mig med både grundlagsproblemer i fysik og med filosofiske spørgsmål om definitionen af virkeligheden. En del af mine opfattelser ligner John Wheelers idéer [8], [9] om "Meaning Circuits" og om præ-geometri [10]. Disse ligheder eksisterer til trods for, at både det centrale problem vi søger at besvare og den aktuelle kontekst er meget forskellige. Følgende argumenter kan derfor give en ny vinkel på diskussionen af nogle af grundlagsproblemerne i fysik såvel som nogle af vore klassiske erkendelsesteoretiske problemer. De nye ontologiske¹ spørgsmål er omformuleringer af klassiske

problemer, og de vedrører spørgsmål om hvorvidt der eksisterer en virkelighed uafhængigt af os, såvel som aspekter af problemet om det fremmedpsykiske². Disse ontologiske spørgsmål er imidlertid forankret i en ny eksperimentel og teknologisk kontekst, som giver os mulighed for ikke blot at stille disse spørgsmål på en ny måde, men også at drage nogle nye konklusioner baseret på eksperimenter. Denne nye vinkel til grundlagsproblemerne i fysikken samt de filosofiske problemer er foranlediget af udviklingen og brugen af digitale computere. Det er fremkomsten af dette nye værktøj, der har gjort det muligt for os at se disse problemer i et nyt perspektiv, og som tvinger os til at revidere vores opfattelse af forholdet mellem information, liv, virkelighed, og fysik.

Følgende tekst er med vilje gjort så kort som mulig, så idéerne ikke forsvinder i forbehold og diskussioner. Det betyder, at meget af den relevante diskussion samt mange vigtige spørgsmål og referencer er udeladt. Jeg opstiller postulater, kommenterer disse postulater, stiller spørgsmål og drager logiske konklusioner. Jeg fremlægger argumenter for at se, hvad der følger af postulaterne og søger dermed at begrunde en nærmere undersøgelse af holdbarheden af disse postulater. Bemærk, at jeg ikke per se hævder, at alle postulater er sande; jeg udforsker i første omgang de logiske konsekvenser af dem, hvis de antages at være sande.

2. Information og liv

Postulat 1. *En universel computer på Turing-maskineniveau kan simulere enhver fysisk proces* (Fysisk "Church-Turing"-tesen³).

Da vi kan konstruere universelle computere, ved vi, at vores fysik understøtter universelle beregninger. Eftersom vi indtil nu har været i stand til at simulere transformationsreglerne for enhver fysisk mekanisme, hvor disse regler er kendte (at kende og formulere reglerne er den svære del af dette), er det fristende at påstå, at fysiske processer selv kan ses som "beregninger". Denne idé er diskuteret i detaljer af Fredkin [11] og kan være en god arbejdshypotese. Men vi ved ikke, om Naturen er i stand til at understøtte en mere kraftfuld og generel form for informationsbehandling, end der understøttes af en universel computer af Turing-klassen.

Postulat 2. *Liv er en fysisk proces.*

Denne idé blev fremhævet af John von Neumann [12], og den er senere blevet opdateret af Christopher Langton [13], hvorved den var med til at starte den moderne forskning i kunstigt liv. Liv er forbundet med den funktionelle organisation af de forskellige dele af en organisme. Detaljer af en sådan funktionel

organisation vil naturligvis være bestemt af de aktuelle materialer, men disse detaljer er ikke centrale for liv som en proces, fordi funktionerne også kunne være skabt ved brug af andre materialer. Bemærk, at i princippet bør enhver form for "hardware" kunne implementere levende processer.

Korollar 1. *Ifølge postulat 1 og 2 bør det være muligt at simulere levende processer på en universel computer. Men en simulering af en levende proces er ikke det samme som den levende proces selv.*

Postulat 3. *Der findes kriterier, ifølge hvilke vi er i stand til at skelne levende fra ikke-levende processer.*

Det er svært at opstille objektive kriterier, med hvilke vi kan definere liv, og jeg har endnu ikke set en tilfredsstillende definition. Uanset hvor præcist vi forsøger at definere liv, synes der altid at være en gråzone mellem det ikke-levende og det levende, hvor det er vanskeligt at afgøre, om en givet proces er i levende eller ej. Den operationelle definition, som mange forskere benytter inden for kunstigt liv, siger: Et levende system skal kunne omdanne ressourcer til byggestene, så systemet kan vokse og dele sig, hvor en arvelig information delvis kontrollerer denne vækst og delingsproces. Den arvelige information skal kunne ændres lidt fra den ene generation til den anden, så en evolution kan ske gennem en selektion mellem forskellige vækst- og delingsprocesser forårsaget af forskellige informationer. Der er en omfattende litteratur om, hvilke egenskaber livet skal have, se fx diskussionen i bogen om "Protoceller" [14].

Selv om der ikke er formel enighed om dette spørgsmål, har vi alle en intuitiv opfattelse af, hvad der er i live og hvad der ikke er. Af hensyn til argumentet antager vi, at Postulat 3 i princippet er muligt.

Korollar 2. *Fra postulat 3 bør det for eksempel være muligt at afgøre, om potentielle computerprocesser er levende eller ej.*

3. Liv og virkelighed

Postulat 4. *En kunstig organisme må opfatte en virkelighed ('R' for 'reality') R2, som for den er ligeså virkelig som vores 'virkelige' virkelighed, R1, er for os (R1 og R2 kan være den samme).*

Et af kriterierne for, at en proces kan være i live, indebærer en aktiv organisme-miljø vekselvirkning, der som minimum består af et stofskifte: Dvs. indtagelse af ressourcer og omdannelse af ressourcerne til byggesten vha. fri energi fra miljøet, samt udskillelse af stofskifteaffald til miljøet. Organismen kan derudover have et

²Problemet om det "fremmedpsykiske" vedrører den manglende mulighed for det enkelte menneske at have direkte adgang til oplevelser, som andre mennesker eller andre levende væsener måtte have af sig selv og deres virkelighed.

³Church-Turing-tesen er en hypotese om computeres opførsel. Tesen påstår, at enhver mulig udregning kan udføres af en algoritme på en computer, givet at der er tilstrækkelig meget tid og lagerplads til rådighed. Tesen kan ikke bevises matematisk. Den bliver nogle gange brugt som en definition på en computer.

ugal af mere sofistikerede vekselvirkninger, fx hvis organismerne har sanser og kan flytte til mere opportune steder i miljøet eller er intelligent og derved mere aktivt kan manipulere miljøet. Dette indebærer, at selv det simpleste levende objekt, for eksempel en proces implementeret på en computer, har en primitiv intern model eller opfattelse af sig selv og det omgivende miljø. I den mest primitive forstand, betyder "en intern model af omgivelserne", at det har et stofskifte, der fungerer i miljøet. Uden denne interne spejling eller repræsentation af miljøet ville organismen simpelt hen ikke kunne eksistere. Denne stofskifte-repræsentation indebærer eksistensen af en intern model af verden. Ved at strække dagligsproget lidt, kan vi sige at organismen ved denne interne miljørepræsentation "opfatter" den virkelighed, den eksisterer i. Det er klart, at en intelligent organisme, dvs. en organisme der fx kan lære og modificere sin adfærd afhængigt af hvad der sker i omgivelserne, har en mere sofistikeret opfattelse af sin virkelighed, som rækker langt ud over dens stofskifteindretning. For en grundlæggende diskussion af denne organisme-miljø repræsentation, se fx Dennet (2005) [15].

Vi antager, at en tilstrækkelig betingelse for eksistensen af en virkelighed er eksistensen af liv. Der er en omfattende filosofisk litteratur om, hvad virkeligheden er, som jeg ikke vil gå ind på. Her skal jeg henvise til John Wheelers "Meaning Circuit" [8], [9]. Den grundlæggende idé bag dette koncept er, at verden eksisterer som et selv-syntetiserende system. På den ene side giver fysik midlerne til kommunikation (energi, materialer, lys, lyd, osv.). Virkelighed kan dermed erhverve sin 'mening' gennem en opfattelse af verden, fx via en organisation af de oplysninger, vi får fra vores vekselvirkninger med resten af verden. På den anden side giver fysik også anledning til kemi og biologi, og gennem dem en observerende deltagelse, nemlig fremkomsten af liv og senere udviklingen af mennesket.

Postulat 5. *Virkelighederne R1 og R2 har samme ontologiske status.*

Antager vi, at R2 findes i en computer, kan dens egenskaber være meget forskellige fra egenskaberne af R1. Fra et logisk synspunkt er det muligt at skabe samspil med R2, som ikke på nogen direkte måde adlyder fysikken i R1. Vi kan derved skabe en mere almen fysik i vores computere end den fysik vi kender. Sådan en uafhængighed eksisterer, selv om R2 er indlejret i R1 materielt. På grund af den fysiske forankring kan vi påvirke R2 fra R1 ved 'at trække stikket' eller via en omprogrammering af koden, der understøtter R2. Imidlertid kan R2 i princippet også påvirke R1, da muligheden for selv-programmering eksisterer i R2, og dermed er en omprogrammering af interface-systemer, dvs. kontakten mellem R1 og R2, også være mulig fra 'undersiden' (fra R2). Man kunne hypotetisk tænke sig, at hvis levende processer i R2 vil have adgang til flere ressourcer, end de umiddelbart har, kunne det ske

gennem en sådan interface-omprogrammering. Derved manipulerer livet fra R2 'ud' i R1. Flere berømte og ikke særlig realistiske Hollywood film handler om denne mulighed.

I Postulat 4 fremførte vi, at en virkelighed får sin betydning i kraft af eksistensen af en observatør. Da R2 bliver opfattet, ligesom R1 bliver opfattet, opnår virkeligheden R2 samme ontologiske status som R1, når R2 har en levende observatør. Hvorfor skulle den ene virkelighed have fortrinsret frem for den anden?

Bemærk, at alle R2 processer har en fysisk (materiel) implementering i R1. Den fysiske implementering af en computerproces er primært elektroner der flytter rundt i halvledere i R1 bestemt af processerne i R2.

Vi kan nu benytte postulat 5 til at omformulere korollar 1 og sige, at den ontologiske status af en levende proces er uafhængig af den hardware, der bærer den. Dette perspektiv fjerner problemet med begrebet 'simulere' og betyder, at processer foregår i 'et eller andet' hardware. Da de to processer har samme ontologiske status kan den ene ikke være mere virkelig end den anden.

Korollar 3. *Virkeligt liv på et digital computernetværk er dermed muligt.*

4. Virkelighed og fysik

Antagelserne og logikken fra afsnit 3 (Liv og virkelighed) viser, at hvis der eksisterer levende computerprocesser, eksisterer der også computerprocesser genererede virkeligheder forbundet med disse levende processer. Dette åbner op for følgende postulat:

Postulat 6. *Det er muligt at lære noget om de grundlæggende egenskaber ved virkeligheder i almindelighed, og af R1 i særdeleshed, ved at studere detaljerne af forskellige R2'er. Eksempler på sådanne egenskaber er virkelighedens fysik og biologi.*

Vi er nu i stand til at drage nogle interessante konklusioner. Den sunde fornuft siger os, at der eksisterer en fysisk verden, en absolut fysisk virkelighed, der er uafhængig af os, og hvor geometrien af denne virkelighed har lighed med en meget stor 'tre-dimensionel kasse', indenfor hvilken alle begivenheder indtræffer. Dette kaldes også den Newtonske opfattelse af virkeligheden. Vi ved imidlertid fra moderne fysik ('geometrodynamics'), at fx stof og geometri er koblet, og at det er umuligt at definere det ene uden det andet. Det tog mange år for fysikken at indse dette. Den informationsmæssige tilgang, vi har fulgt, viser, at man umiddelbart kan nå til denne konklusion, og at man endda kan gå et skridt videre: Stof såvel som geometri kan udledes af informations-vekselvirkninger. I de computerprogrammer vi konstruerer, er det ikke muligt at adskille de topologiske (geometriske) og funktionelle egenskaber (vedrørende stoffet: partikler, kræfter, reaktioner) fra hinanden. Intet enkelt stykke computerkode definerer kun topologien eller kun de

funktionelle enheder. Koder for det ene indeholder med logisk nødvendighed også implicit komponenter af det andet. At betragte geometri, og dermed rum, på den måde jeg her gør, har visse ligheder med Ernst Machs [16] syn på rum, nemlig som den samlede øjeblikkelige afstand mellem alle materielle punkter. Både geometrien og kræfterne i disse R2-universer er skabt gennem det logiske og informationsmæssige samspil mellem software og hardware på computeren. Vi ender dermed med en forestilling, der ligger meget tæt på Wheelers idéer om præ-geometri: Bearbejdning af logiske udsagn som grundlag for alt. Ifølge Wheeler ligger præ-geometri forud for fysikken, ligesom logiske regler for funktionelt samspil ligger forud for enhver egenskab vores computersystemer har. Jeg er imidlertid ikke klar over, hvor langt denne analogi mellem vores fysik og vores simuleringssystemer vil holde. At vi i stadig større udstrækning lærer væsentlige aspekter om R1 ved at opstille computersimuleringer af fysiske og biologiske fænomener er indlysende, og dette kan verificeres ved at følge den senere tids videnskabelige udvikling. Det er imidlertid endnu ikke klart om en dybere fortolkning af nogle af disse processer, som værende i stand til at generere R2'er, kan hjælpe os med en bedre forståelse af vores verden.

Konklusion

Det er mit håb, at denne artikel kan klargøre grundlaget for diskussionen omkring kunstigt liv, og om hvad liv er i andre medier. Specielt håber jeg at teksten kan hjælpe med til at belyse hvilke kontroversielle logiske og eksistentielle problemstillinger kunstigt liv konfronterer os med.

I dag støttes konklusionerne i afsnit 2 (Information og liv) af de fleste forskere inden for mit område. Konklusionerne i afsnit 3 (Liv og virkelighed) er stadig kontroversielle, og det er min vurdering, at der er delte meninger mellem forskerne om hvorvidt R1 og R2 kan have samme ontologiske status. Mine professionelle erfaringer med emnet gennem de sidste 20 år har imidlertid styrket min tro på postulaterne og derved konklusionerne i afsnit 3. Tilbage i 1991 var disse tanker meget kontroversielle.

Afsnit 4 (Virkelighed og fysik) er jeg mest usikker på, idet jeg ikke har fulgt udviklingen omkring fysikkens grundlagsproblemer på så nært hold i de sidste mange år. Det er også min opfattelse, at både højenergifysikken og kosmologien, som kunne tage disse spørgsmål op på den mest kompetente måde, har haft mere end nok at gøre med at løse andre vigtige mysterier om vores virkelighed.

Tak

Jeg takker Philipp Löffler og Svend E. Rugh for kritisk og konstruktiv gennemlæsning og kommentering af denne danske omarbejdede tekst. Jeg takker også for konstruktive tilbagemeldinger fra to årgange af studenter fra vores kursus i "Assembly of minimal living systems" (KE819) på SDU, hvor grundlagsproblemer

for liv diskuteres. Den oprindelige artikel fra 1991 var aldrig blevet til uden støtte fra mange af mine kollegaer i efteråret 1989 og foråret 1990 både på Los Alamos og på Santa Fe Institutet. Jeg er især taknemmelig for, at William Wootters i første omgang gav direkte henvisninger til relevant litteratur om præ-geometri og tog sig tid til at drøfte disse emner med mig. Jeg er også taknemmelig for, at Mark Bedau, Jeffery Davitz, Doyne Farmer, Rasmus Feldberg, Stuart Hameroff, Carsten Knudsen, Chris Langton, og Warner Miller, kritisk har gennemgået tidligere versioner af den oprindelige artikel.

Litteratur

- [1] Nielsen, P.L. og Rasmussen, S., *Kaskelot*, Biologiforbundets Tidsskrift, bind 15, februar 2011, s. 12-15.
- [2] Svandeborg, C., Albertsen, A. og Rasmussen, S., *Fra syntetisk liv til levende teknologi*, *Aktuel Naturvidenskab*, (i print) 2011.
- [3] <http://www.sdu.dk/flint>
- [4] <http://www.science-society-policy.org>
- [5] Teknologirådet, 2011: <http://www.teknologidebat.dk/issue/it-og-nye-læringstilgange/article/syntetisk-biologi>
- [6] Bedau, M.A., Hansen, P.G., Parke E. and Rasmussen, S., (eds.) *Living Technology: 5 Questions*, Automatic Press (2010).
- [7] Rasmussen, S. (1991), Aspects of information, life, reality and physics, *Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity*, bind X, edited by C. C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen, Addison-Wesley (1991) s. 767-773.
- [8] Wheeler, J. A., *World as System Self-Synthesized by Quantum Networking*, *IBM Journal of Research and Development* 32(1) (1988): 4-16.
- [9] Wheeler, J. A., *Information, Physics, Quantum: The Search for Links, i Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, redigeret af W. H. Zurek. *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*, bind VIII, 3-28. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1990.
- [10] Misner, C., K. Thorne, og J. Wheeler, *Beyond the End of Time*, kap. 44 i *Gravitation*, Freeman, 1973.
- [11] Fredkin, E (1990), *Digital Mechanics*, *Physica D* 45 (1990): 254-270.
- [12] von Neuman, J., *Theory of Self-Reproducing Automata* (redigeret og afsluttet af A. W. Burks), Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- [13] Langton, C (1989), *Artificial Life*, i *Artificial Life*, redigeret af C. Langton, *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*, bind VI, 1-47. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1989.
- [14] Rasmussen, S., Bedau, M.A., Chen, L., Krakauer, D., Packard, N., and Stadler, P. (eds.), *Protocells: Transitions from nonliving to living matter*, Cambridge: MIT Press, 2009.
- [15] Dennet D., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*, Simon and Schuster (1995).
- [16] Mach, E. *The Science of Mechanics, A Critical and Historical Account of its Development*, (engelsk oversættelse af T. McCormack), La Salle, ILL: Open Court Publications, 1960. (Original: *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historische Kritisch Dargestellt*, Brockhaus, Lipzig, 1912).



Steen Rasmussen er professor i fysik og centerleder for Center for Fundamental Living Technology (FLinT) co-sponsoreret af Grundforskningsfonden og SDU.

Foreningsnyt – foredrag i efteråret

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Sep.				
5/9	19.15	Supernovaer (oversigt)	Henry Nørgaard	AS (Kbh)
12/9	19.00	Supernovaer (oversigt)	Henry Nørgaard	AS (Årh)
13/9	17.00	Umulighed i Matematik: Fra meta-udsagn til matematiske sætninger	Jesper Lützen	VHS
19/9	19.30	Katalyse: En vigtig del af fremtidens energiproduktion	Ib Chorkendorff	SNU
26/9	19.15	Supernovaer og de ældste stjerner	Birgitta Nordström	AS (Kbh)
Okt.				
3/10	19.00	Supernovaer og de ældste stjerner	Birgitta Nordström	AS (Årh)
3/10	19.30	Nye resultater fra Center for Metalstrukturer i 4 Dimensioner	Henning Friis Poulsen	SNU
10/10	19.15	Støv fra supernovaer	Anja C. Andersen	AS (Kbh)
11/10	17.00	Philipp Frank and the Definition of Relativism	David Bloor	VHS
31/10	19.00	Støv fra supernovaer	Anja C. Andersen	AS (Årh)
31/10	19.30	Nye resultater fra Center for Membranpumper i Celler og Sygdom	Poul Nissen	SNU
Nov.				
7/11	19.15	Supernovaneutrinoer	Steen Hannestad	AS (Kbh)
14/11	19.00	Supernovaneutrinoer	Steen Hannestad	AS (Årh)
21/11	19.30	Smag på kemien	Ole G. Mouritsen	SNU
28/11	19.15	Sorte huller fra supernovaer	Malene Flagga	AS (Kbh)
Dec.				
5/12	19.00	Sorte huller fra supernovaer	Malene Flagga	AS (Årh)
12/12	19.30	Om nye resultater fra Center for Geogenetik	Eske Willerslev	SNU

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

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

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

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

Astronomisk Selskab

Denne foredragsrække omhandler nogle af de voldsomste begivenheder i Universet: supernova-eksplosioner. Supernovaerne kan siges at være grundlaget for livet på Jorden, da de er årsagen til, at de tunge grundstoffer der dannes i stjernernes indre, eller i selve supernova-eksplosionen, bliver spredt ud i galaksen. Disse tunge grundstoffer indgår herefter i byggematerialet for nye generationer af stjerner, for planeter og, i den sidste ende, mennesker. Vi skal i denne foredragsrække høre om supernovaerne, om hvordan de gennem tiderne har beriget vores galakse med tunge grundstoffer, om neutrinoer skabt i supernova-eksplosionerne, og om sorte huller dannet i forbindelse med supernovaer.

Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Tycho Brahe Planetarium og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Anja C. Andersen, Torben Arentoft og Michael Quaade.

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Fortsættelse af temarækken om nye resultater fra centre under Grundforskningsfonden.

Videnskabshistorisk Selskab

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

PFEIFFER VACUUM

Turbopumpe HiPace™



Ring for yderligere information

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

Naturlove og muligheden for liv. Del 1

Af Michael Cramer Andersen og Svend Erik Rugh

Vi vil skitsere nogle principper og resultater i et omfattende projekt, der prøver at undersøge sammenhænge mellem muligheden for liv, som vi kender det, og fysikkens naturlove, som vi kan forestille os dem.

Introduktion

Naturlovene er både et *fængsel* og en kilde til *frihed*. Naturlovene har virketrang overalt på vor scene af tid og rum og naturlovene er noget som vi og alt andet må adlyde. Samtidig muliggør naturlovene en opbygning af *livet* som i vore livsformer har udviklet begreber om vilje og frihed (fængslet muliggør friheden). Som levende væsener puster vi liv i et fængslende spil med spilleregler, herunder nogle vi p.t. drister os til at kalde naturlove, som er blevet beskrevet i et stadigt mere nuanceret og forfinet sprog. Ikke mindst i forrige århundrede blev sproget udviklet så skørt og mærkeligt [1] at ingen science fiction forfatter nogensinde ville have haft fantasi til at formulere tanker så ekstremt bizarre og vilde. Dette er sjovt illustreret i George Gamows historier om “Mr. Tompkins i drømmeland” [2]



Figur 1. Mr. Tompkins cykler rundt i “Einstein stad”, hvor lysets hastighed er sat ned med en faktor ca. 100 millioner, til $c = 15$ km/time (og de øvrige naturkonstanter er uændrede). Han ser en mand på en cykel som bliver kortere jo hurtigere han kører. Mr. Tompkins tager en cykel og følger efter manden. Til hans store overraskelse bliver han ikke selv kortere men bygningerne og gaden bliver kortere idet han prøver at indhente manden. Mr. Tompkins ræsonnerer: “Alt hvad der bevæger sig relativt til mig bliver forkortet!” Tegning af John Hookham fra [2].

Mr. Tompkins kommer til verdener hvor naturkonstanterne antager radikalt andre værdier end de sædvanlige (fx er lysets hastighed i “Einstein Stad” sat til $c = 15$ km/timen). De hverdags-fremmede og kontra-intuitive konsekvenser af vort (moderne) fysiske verdensbillede bliver derved fremhævet så meget, at de bliver umiddelbart fremtrædende (Mr. Tompkins oplever effekterne af relativitetsteorien, urene går anderledes osv., mens han cykler!).

Til den danske udgave af “Mr. Tompkins i drømmeland” (1942) skrev Niels Bohr et forord, hvor vi ikke er i tvivl om at Bohr satte Gamow, og hans festlige fantasi og humor, meget højt. Det er imidlertid velkendt at Bohr udtrykte (dog ikke i selve forordet) at man skal passe på med at lege med fysikken på denne måde. Hvis man ændrer på én naturkonstant – fx leger sig ind i et univers med en radikalt lavere værdi af lysets hastighed – så vil en sådan ændring også udbrede sig bredt hen over fysikkens mangeartede discipliner, fx atomernes verden. Der vil, muligvis, slet ikke være stabile atomer, og derfor slet ingen Mr. Tompkins, ingen cykel at cykle på, ingen luftmolekyler at indånde, og ingen ure at se på! Selvom vi er mange, i dag, der, sammen med George Gamow, fornøjeligt spiller med og leger os ind i kontrafaktuelle konstruerede universer (som teatergæster der *helt udefra* får lov til at få et kig ind i radikalt anderledes konstruerede universer) så foregriber denne anke, fremsat af Niels Bohr, et projekt som har interesseret flere og flere fysikere:

- Hvad er samspillet mellem naturlovene og muligheden for at konstruere liv?
- Er det fx muligt (hvordan og hvor meget?) at ændre på naturlovene og stadig have mulighed for at konstruere liv?

George Gamow satte i sin historie lysets hastighed ned med – hold fast! – *en faktor på knap 100 millioner*, fra 300.000 km/s til 15 km/time. Hvis alle andre naturkonstanter fastholdes bliver den elektromagnetiske finstrukturkonstant og den stærke kernekraft derfor skaleret op med en tilsvarende faktor (se tabel 1). Sammenhold evt. dette med, at en ændring på blot *nogle få procent* i styrken af disse kræfter vil forårsage overmåde drastiske ændringer af strukturen af stoffet i Universet. Helt uden mulighed for at konstruere Mr. Tompkins. Vi vil i denne artikel prøve at ridse problemet op om hvad det vil sige at “ændre på naturlovene” og i en senere del 2, forsøge at give et overblik over nogle vigtige resultater i projektet.

Naturlovene og naturkonstanterne

Formuleringen af naturlovene benytter sig af en række – i kvantesproget udviklede – “frihedsgrader”. Nogle har halvtalligt spin (fermioner) og andre har heltalligt spin (bosoner). Lidt groft kan vi sige, at frihedsgraderne med halvtalligt spin refererer til en række partikler (byggeklodser) – kvarker og leptoner – mens frihedsgraderne

med heltalligt spin refererer til de kræfter, der virker imellem byggeklodserne (og kræfterne virker også på sig selv). Endvidere er der, muligvis, en (eller flere) Higgs boson(er) med spin nul.

I den Standardmodel, som siden 1980'erne har været accepteret, af de fleste, som standardteori for det lag af (effektive) naturlove, der gælder ved de mindste afstande og højest tilgængelige energier (som vi har kunnet udsætte for et eksperimentelt pres, ca. $\sim 10^3$ GeV $\sim 10^{-7}$ J pr. frihedsgrad), gælder:

- **Byggeklodserne** er kvarker og leptoner, der findes i tre ens kopier (generationer), som kun varierer mht. masserne af partiklerne.
- **Kræfterne** er udformet i overensstemmelse med det helt afgørende væsenstræk, at der både er frastødende og tiltrækkende kræfter. Mere detaljeret er disse udfoldet i form af fire forskellige kræfter: gravitationskraften, den elektromagnetiske kraft, den svage og den stærke kernekraft. Kun de sidste tre har kunnet beskrives i kvantesproget.

Naturlovene, eller "spillereglerne", der gælder for disse byggeklodser og kræfter, i "spillet", udtrykkes i et matematisk sprog som vi, lidt groft, her inddeler i to forskellige strukturelle kategorier¹:

1) Formen af naturlovene. Fx skal teorien være formuleret i overensstemmelse med relativitetsteori (dvs. respektere den uhyre mærkelige – og stærkt kontraintuitive – egenskab at noget der udbreder sig med lysets hastighed har den samme hastighed i alle reference systemer, $c' = c$). Teorien skal være formuleret i kvantesproget (inkl. fx spin og Paulis udelukkelsesprincip), der i relativistisk form bliver til en kvantefeltteori (som skal være renormerbar, så den giver håndterbare forudsigelser). Teorien skal have indre (gauge-) symmetrier baseret på grupper, som fx U(1), SU(2), SU(3), og der er mange andre morfologiske (formmæssige) strukturtræk ved teorien.

2) Parametre der indgår i naturlovene. Efter at have 'lagt sig fast på formen af naturlovene', indgår der yderligere i alt godt 25 parametre (naturkonstanter) i den præcise formulering af naturlovene. Disse parametre² angiver fx masserne af partiklerne, styrken af vekselvirkningerne, og parametriseringer af andre (mere eller

mindre spekulative) sagsforhold i Standardmodellen. Blandt disse mange parametre i Standardmodellen (og gravitationsteori, som udgør en selvstændig teori) kan man fx nævne de *dimensionsløse*³ *koblingskonstanter* (eller *finstrukturkonstanter*), der angiver styrken af de fire kendte kræfter, se tabel 1:

Symbol	Formel	Talværdi
α	$e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	$\approx 1/137$
α_G	$Gm_p^2/\hbar c$	$\approx 6 \cdot 10^{-39}$
α_W	$G_F m_p^2 c/\hbar^3$	$\sim 10^{-5}$
α_S	$g_s^2/\hbar c$	~ 1

Tabel 1. Dimensionsløse koblingskonstanter (fra Uzan (2003) [12]), der er et mål for den relative styrke af de fire kendte naturkræfter: 1) *Elektromagnetismen* (α eller α_{EM} , hvor e er elementarladningen og $1/4\pi\epsilon_0$ er Coulombkonstanten) 2) *Gravitationen* (angivet af en gravitationel finstrukturkonstant, α_G , hvor m_p er protonens masse) 3) *Den svage kernekraft* (α_W , hvor G_F er Fermi-konstanten fra Fermis teori for den svage kernekraft) og 4) *Den stærke kernekraft* (α_S).

Den svage og stærke kernekraft har uhyre kort rækkevidde (hhv. $\sim 10^{-18}$ m og $\sim 10^{-15}$ m) og de virker kun indenfor en atomkernes udstrækning. I modsætning hertil falder den elektromagnetiske og gravitationelle kraft som en potenslov, $1/r^2$, så de virker over store afstande. I tabel 1 ses, at gravitationskraften (her angivet af α_G , med protonens masse som karakteristisk masse) er *uhyre svag*: Vi kan som små levende væsener overvinde hele Jordens gravitationskraft og (ikke mindst med en passende vilje og kontrol over elektromagnetiske kræfter) løfte os selv – og andre genstande – op fra jordoverfladen. Selvom alle Jordens bestanddele trækker denne genstand ned mod jordoverfladen. Så svag er gravitationskraften!⁴

Liv og andre objekters forankring i naturlovene

Hvis man afbilder masse og radius (dvs. karakteristisk størrelse) af stabile objekter i Universet vil man se noget i stil med figur 2. Nogle af objekterne er listet i tabel 2 (hvor et overslag over deres rumlige udstrækning er udtrykt ved fundamentale parametre der indgår i fysikken for disse objekter).

¹Grænsen mellem kategorierne (1) og (2) er lidt flydende. Visse af de formmæssige træk ved teorierne har også i sig nogle karakteristiske parametre. Er fx 1,2 og 3 ikke i en vis forstand parametre når vi siger at Standardmodellen er en gauge teori med gauge grupperne U(1), SU(2) og SU(3)? Er antallet af dimensioner i rummet ($d = 3$) også en parameter? osv.

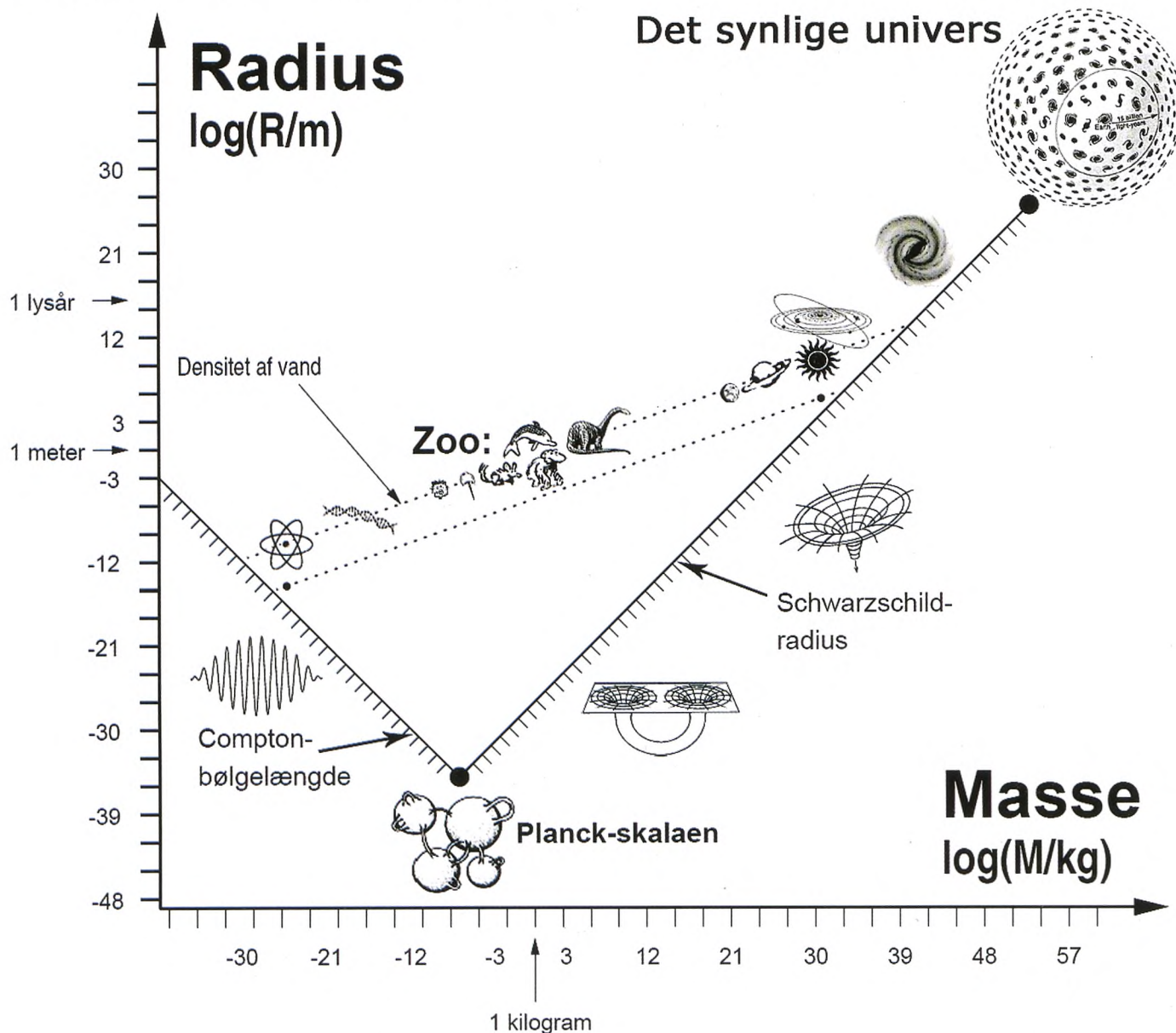
²For en kort omtale af disse parametre, se fx Robert N. Cahn (1996) [3] eller fx Tegmark et al. (2006) [4], hvor der redegøres for 26 parametre i Standardmodellen (som direkte indgår i dens dynamiske ligninger) og yderligere 5-11 kosmologiske parametre (der parametriserer en række væsensforhold i Universets storskalastruktur og som mere kan betragtes som en art "randbetingelser"). I Standardmodellen er de 26 parametre: Seks kvark-masser og tre lepton-masser (angivet via Yukawa-koblinger), et par parametre der specificerer Higgs-sektoren, nogle koblingskonstanter der fortæller om styrken af de fire vekselvirkninger (jfr. tabel 1), og fire parametre der angiver en "mixing" mellem kvarkerne i de forskellige generationer (beskrevet ved en "Cabibbo-Kobayashi-Maskawa"-matrix = CKM-matrix). Tre neutrinomasser og en "mixing" CKM-matrix for neutrinoer giver yderligere 7 parametre. Endelig er der nogle parametre, der er mystisk tæt på nul: En CP-brydende parameter θ (for de stærke kernekraft), der måske er nul, og en mystisk lille kosmologisk konstant, Λ , i teorien for den gravitationelle vekselvirkning.

³Vores SI-enhedssystem med fx meter, sekund, kg og J, er defineret ud fra jordiske forhold og derfor noget arbitrært. Ved brug af de tre naturkonstanter, c , G og $\hbar$, kan man fastlægge et *Planck-enhedssystem*, der gør det muligt at udtrykke fysiske størrelser som *dimensionsløse* tal (størrelsen i forhold til Planck-enheden, fx $m_{\text{jord}}/m_{\text{planck}}$), således at arbitrært valgte fysiske enheder divideres ud. Derved kan vi i princippet blive forstået af en "7-armet blæksprutte i Andromeda-galaksen" med helt andre "Blæksprutte-SI-enheder". Det er sjovt nok konstanterne c , G og $\hbar$, der ændres i Gamows historier om Mr. Tompkins, men som i virkeligheden regnes for noget af det mest faste.

⁴Det, at tyngdekraften trods sin svaghed overhovedet mærkes – og på astrofysiske skalaer ofte *dominerer* – skyldes, at mange makroskopiske objekter har en total elektrisk ladning meget tæt på nul, hvorved de frastødende og tiltrækkende elektriske kræfter ophæver hinanden.

Mange 'dagligdags objekter', opbygget af atomart stof, ligger på en ret linie med en hældning på 1/3 i figur 2 (der er et log-log plot), idet $R \propto (M/\rho)^{1/3}$. De har (indenfor en faktor 10) den samme densitet angivet af

protonens masse divideret med et volumen sat af Bohr-diameteren (jfr. fx Press og Lightmann (1983), [5], s. 324): $\rho_{\text{atom}} \sim \frac{m_p}{(2a_0)^3} = \frac{1}{8} m_p \left(\frac{\alpha m_e c}{\hbar} \right)^3 \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$.



Figur 2. Et dobbeltlogaritmisk diagram, der afbilder masse og radius (karakteristisk størrelse) for en række objekter i Universet. På den øverste stiplede skrå linje (med hældning på 1/3), svarende til densiteten af vand (og andre atomare stoffer), ligger en lang række velkendte objekter: Kulstofatom, DNA-molekyle, celle, goble, mus, delfin, primat, dinosaur, planeter (repræsenteret ved Jorden og Saturn) og stjerner (Solen). Den sorte plet under atomet er en atomkerne (med en radius på $\sim 10^{-15}$ m) og den sorte plet under Solen er en neutronstjerne (de har samme densitet, ca. 10^{15} gange større end densiteten for vand; denne er antydnet med den nederste stiplede skrå linje). Ovenover Solen ses vores solsystem og skråt til højre over dette ses en galakse (Mælkevejen). Øverst til højre markerer den sorte prik hele det synlige univers (også illustreret ved en ballon med galakser på). Begge akser løber over mange størrelsesordener. Hele den zoologiske have af dyr, atomer, planeter og stjerner ligger i passende afstand fra de to sorte linjer. Den skrå linje til venstre, "Compton-bølgelængden" er omvendt proportional med massen: $\lambda_C = h/mc$ (dvs. med hældning på -1 i log-log-plottet). Den angiver en form for ubestemthed for kvantepartikler. For hvis en partikel lokaliseres (fx med kortbølget lys) til sin Compton-bølgelængde, vil der være energi nok til at danne en tilsvarende partikel med samme masse: $hf = hc/\lambda_C = mc^2$ (egentlig kan der som en kvante-effekt dannes et partikel-antipartikelpar ved den halve bølgelængde). Den skrå linje til højre, "Schwarzschild-radius" er proportional med massen: $R_{\text{Sch}} = 2Gm/c^2$ (dvs. med hældning $+1$). Den angiver radius af begivenhedshorisonten af et sort hul med den pågældende masse. En mængde stof der er kollapsedet til et sort hul kan ikke undslippe denne radius. Bemærk, at radius af det synlige univers omtrentligt svarer til Schwarzschild-radius for den totale masse i det synlige univers (ca. 10^{11} galakser med hver 10^{11} stjerner med massen 10^{30} kg, i alt 10^{52} kg; og hvis man medregner mørk masse (en faktor ca. 6 mere end det synlige stof), så vil Schwarzschild-radius for Universets stofmasse passe fint med en Hubble-radius på 10^{26} m). Man kan således fortolke vort Univers som det indre af et sort hul! Det ses også, at de to skrå linjer står vinkelret på hinanden og skærer hinanden i punktet defineret af Planck-massen og Planck-længden. I dette punkt er Compton-bølgelængden lig med Schwarzschild-radius for et sort hul, dvs. at kvante-effekter og gravitationseffekter er så dominerende, samtidigt, at der vil kunne ske pardannelse af sorte huller. Figur: Michael Cramer Andersen.

Objekt	Karakteristisk størrelse (radius)			Talværdi	Referencer
Planck-længde	l_{Pl}	$= \sqrt{G\hbar/c^3}$	$= \left(\frac{m_e}{m_p}\right) \alpha \cdot \alpha_G^{1/2} \cdot a_0$	$\sim 10^{-35} \text{ m}$	B&T, s. 292
Atomkerne (nukleon)	R_{kerne}	$\sim \frac{\hbar}{m_{\pi} c}$	$= \left(\frac{m_e}{m_{\pi}}\right) \alpha \cdot a_0$	$\sim 10^{-15} \text{ m}$	B&T, s. 319
Atom	R_{atom}	$\sim \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{\alpha m_e c}$	$= a_0$	$\sim 10^{-10} \text{ m}$	B&T, s. 297
Liv	R_{liv}	$\sim K_1 \left(\frac{m_e}{m_p}\right)^{1/4} (\alpha/\alpha_G)^{1/4} (2a_0)$	$\sim 10^2 \left(\frac{m_e}{m_p} \frac{\alpha}{\alpha_G}\right)^{1/4} \cdot a_0$	$\sim 1 \text{ m}$	P&L, s. 333
Beboelig planet	R_{planet}	$\sim \left(\frac{kT}{E_0}\right)^{1/2} (\alpha/\alpha_G)^{1/2} \cdot a_0$	$\sim 0,044 \cdot (\alpha/\alpha_G)^{1/2} \cdot a_0$	$\sim 10^6 \text{ m}$	C&R, s. 608
Typisk stjerne	R_{stjerne}	$\sim \left(\frac{M_{\text{chandra}}}{\rho_{\text{atom}}}\right)^{1/3} = \left(\frac{\hbar c}{G m_p^2}\right)^{1/2} \cdot 2a_0$	$\sim \alpha_G^{-1/2} \cdot a_0$	$\sim 10^9 \text{ m}$	C&R, s. 607
Planetbane (livszone)	“1 AE”	$\sim K_2 \left(\frac{m_p}{m_e}\right) \alpha^{-4} \alpha_G^{-1/4} \cdot a_0$	$\sim \left(\frac{m_p}{m_e}\right) \alpha^{-4} \alpha_G^{-1/4} \cdot a_0$	$\sim 10^{11} \text{ m}$	P&L, s. 331
Galakse	R_{galakse}	$\sim \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{1/2} \alpha^4 \alpha_G^{-1} \cdot a_0$	$\sim \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{1/2} \alpha^4 \alpha_G^{-1} \cdot a_0$	$\sim 10^{21} \text{ m}$	C&R, s. 609
Synlige univers	R_{univers}	$\sim c/H_0 \sim c \cdot t_{\text{stjerne}} = \alpha_G^{-1} \frac{\hbar}{m_e c}$	$\sim \alpha \cdot \alpha_G^{-1} \cdot a_0$	$\sim 10^{26} \text{ m}$	C&R, s. 608

Tabel 2. Karakteristiske størrelser (udtrykt ved fundamentale naturkonstanter) af nogle væsentlige stabile objekter i Universet inklusiv det synlige univers. De fleste objekter er indtegnet på figur 2. Alle størrelserne skal opfattes som bud på en karakteristisk størrelse af objektet, fundet ved fornuftige overslag over den fysik, der bestemmer balancen mellem de tiltrækkende og frastødende kræfter for objektet. Bemærk, at alle størrelser er udtrykt som dimensionsløse tal ganget med Bohr-radius. Flere af de angivne størrelser skal forstås med $\sim$ tegn, som betyder “af samme størrelsesorden som” (dvs. faktorer på 4 og π , og sågar 4π , vil blive sat til ~ 1). Nogle af konstanterne der indgår er de tre partikelmasser: elektronen (m_e), protonen (m_p) og pi-mesonen (m_{π}) samt den elektromagnetiske (α) og den gravitationelle (α_G) finstrukturkonstant. Derudover indgår forholdet mellem den termiske energi (kT , med $T \approx 300 \text{ K}$ og Boltzmanns konstant, $k = k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) og Bohr-energien ($E_0 \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$). Chandrasekhar-massen, der beskriver maksimummassen af en hvid dværgstjerne, er $M_{\text{chandra}} = (\hbar c / G m_p^2)^{3/2} m_p$ og $\rho_{\text{atom}} \approx m_p / (2a_0)^3$. En konstant ($K_1 \approx 0,5$ -100) beskriver detaljerne ved de kemiske bindinger i liv (se Press og Lightman [5]) og en anden konstant ($K_2 \approx 4,4$), beskriver geometriske, kemiske og strålingsmæssige forhold for en planet der er i en passende afstand fra en gennemsnitlig stjerne til at temperaturen understøtter liv. Hubble-konstanten er $H_0 \approx 22 \text{ km/(s·Mlysår)} \approx 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$. Referencerne er forkortet: C&R = Carr og Rees (1979) [6]; P&L = Press og Lightman (1983) [5]; B&T = Barrow og Tipler (1986) [7].

Af Standardmodellens godt 25 parametre er der nogle få af dem der – tilsyneladende – er vigtigere for verden, som vi ser omkring os (dvs. ved lave energier), end andre. Faktisk er de fleste strukturer vi ser (for en første overfladisk betragtning⁵) kontrolleret af følgende få parametre: Massen af elektronen (m_e), massen af protonen (m_p) samt styrken af den elektromagnetiske og gravitationelle vekselvirkning α og α_G (se tabel 2). Dette kan ses ved at lave simple overslag over den fysik (som vi i dag mener at forstå i grove træk) der bestemmer masserne og størrelserne af disse objekter.

Elektronens masse og styrken af den elektromagnetiske kraft indgår essentielt i opførslen af atomart stof og dets vekselvirkning med elektromagnetisk stråling, dvs. disse størrelser styrer, overordentligt meget, ’slagets gang’ i kemi og biologi. De indgår fx i

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{\alpha m_e c} \sim 10^{-10} \text{ m}, \quad \text{og}$$

$$E_0 = \frac{m_e e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2} = \frac{1}{2} m_e (\alpha \cdot c)^2 \sim 10 \text{ eV} \sim 10^{-18} \text{ J},$$

der sætter skalaen for hhv. atomers udstrækning (Bohr-radius) og skalaen for de atomare bindingsenergier⁶. Konstanten $1/4\pi\epsilon_0 = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ er Coulomb-konstanten.

Det kan synes overraskende at man i tabel 2 kan give et fysisk overslag (udtrykt ved fundamentale naturkonstanter) over karakteristiske størrelser af liv, en beboelig planet, og sågar 1 AE = 1 astronomisk enhed (= afstanden mellem Solen og Jorden = $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$). Lad os derfor knytte nogle få bemærkninger til de fysiske vurderinger over størrelserne af disse objekter

⁵Går man dybere ind i stoffets struktur kan den være meget følsom overfor ændringer i styrken af den stærke og svage kernekraft (som ikke direkte indgår i resultaterne for de fysiske overslag over de karakteristiske størrelser af objekter i tabel 2). Endvidere: Selvom det er fristende at påstå at visse af Standardmodellens parametre, som fx masserne af de tunge kvarker og leptoner, ikke spiller nogen rolle for den fysik vi ser – i hverdagen – omkring os (jfr. fx F. Wilczek, s. 52, i Carr (ed) (2007) [9]), så skal man passe på med at føres til en sådan påstand alt for hurtigt. Det kræver nøje og komplicerede undersøgelser. Således kan forskellige tidlig-univers-processer være afgørende for betingelser for livet i en senere fase af Universets udvikling. Hvor kvark- og lepton-masser i den tredje generation, såsom bottom- og top-kvarker, er meget tunge (og derfor tilsyneladende uvæsentlige) i forhold til energier i hverdagens fysik, viser det sig, at det strukturtræk i modellen at have mindst tre generationer kan være afgørende for at have de CP-brud der er nødvendige for at Universet ikke består af ren stråling (fra annihilation af baryoner-antibaryoner) men har nogle få baryoner tilbage (se fx Cahn (1996), [3], s. 956).

⁶Denne bindingsenergi er den elektrostatiske feltenergi imellem to enhedsladninger i en afstand af Bohr-radius: e^2/a_0 . Hvis vi størrelsesordensmæssigt sætter denne energi lig elektronens kinetiske energi $\sim \frac{1}{2} m_e v^2$, ses, at elektronens hastighed er $\sim \alpha \cdot c$ – altså 1/137 af lysets hastighed.

(i lidt ændret rækkefølge): En “beboelig planet” (beboet af liv der indånder luft i planetens atmosfære) er karakteriseret ved at have en passende overfladetemperatur T (så $k_B \cdot T$ svarer til typiske energier der udveksles i reaktioner mellem komplekse molekyler) og planeten skal have en passende størrelse så den har en atmosfære der ikke kun består af brint og helium. Dvs. størrelsen af planeten skal vælges så den termiske hastighed af brint og helium skal være af samme størrelsesorden som undslippeshastigheden fra planeten. Se fx Carr og Rees (1979) [6] s. 608, Press og Lightman (1983) [5], s. 330 eller Barrow og Tipler (1986) [7], s. 309.

Et overslag over afstanden, “1 AE”, fås som afstanden mellem en typisk stjerne (fx geometrisk middelværdi af mindst mulig og størst mulig stjerne) og en beboelig planet, hvor afstanden vælges således at planetens atmosfære får en passende bio-venlig temperatur T (Press og Lightman (1983) [5], s. 331 og Barrow og Tipler (1986) [7], s. 337). Størrelsen af liv – et opretstående dyr, der går rundt på planetoverfladen – estimeres lidt groft ud fra en betragtning om, at dyret ikke må være større end at den kinetiske energi der opnås ved et frit fald af dyret (med et fald af størrelsesorden som dyrets størrelse) i planetens tyngdefelt skal være en del mindre end en karakteristisk brudstyrke af dyrets bestanddele (Press og Lightman (1983) [5], s. 333 og Barrow og Tipler (1986) [7], s. 312).

Størrelsen af de forskellige objekter på figur 2 og i tabel 2 spænder over ca. 40 størrelsesordener fordi gravitationen er så svag en kraft: $\alpha_G^{-1} \sim 10^{40}$. Formuleret lidt anderledes kan vi sige, at den gravitationelle finstrukturkonstant α_G 's overmåde beskedne størrelse er en *nødvendig* betingelse for, at der er plads i Universet til strukturer (og kompleksitet), men er ikke en *tilstrækkelig* betingelse for at der er sådanne strukturer.

Hvad vil det sige at “ændre på naturlovene”?

Ifølge Uzan (2003) [12] er der ikke videre eksperimentelt grundlag for at antage, at parametrene (naturkonstanterne) faktisk varierer – i tid og/eller rum – i vort univers. Der er altså tale om kontrafaktuelle undersøgelser i det følgende. I kontrafaktuel historieskrivning (“Hvad nu hvis...”) har bl.a. historikere og science fiction-forfattere leget med idéer om, at historiens gang kunne have været gået anderledes [10]. Ofte kan de diskussioner, der herved opstår, netop tjene til at belyse sagsforhold i den faktisk skete historie. Det er naturligvis svært at overskue hvad der kunne ske med den menneskelige historie, med dens indviklede kompleks af menneskelige drifter og visioner, hvis man blot ændrer på udfaldet af en enkelt begivenhed. Hvis det skal være undersøgelser af høj kvalitet, kræver det et enormt overblik over historiens mange mekanismer og mange medspillere. Hvad angår fysik og liv er det, rimeligvis, også meget svært at overskue (og det kræver et stort overblik over fysikken) hvad konsekvenserne bliver hvis man varierer naturlovene (på kontrollabel vis). Det er, alt andet lige, dog nok nemmere – og

nemmere at gøre til veldefinerede projekter med veldefinerede spørgsmål – i fysikken end i kontrafaktuel historieskrivning.

Holger Bech Nielsen, som er en dansk højenergifysiker, har i sit projekt “tilfældig dynamik” [11] prøvet at variere visse formmæssige strukturtræk i naturlovene og undersøgt om diverse (emergente) fænomener (og effektive love) er stabile (robuste) eller skrøbelige under sådanne ændringer⁷. Holger er i dette projekt altså vant til at prøve at overskue hvilke konsekvenser det har at ændre på fundamentale træk ved naturlovene.

Er den fysiske egenskab at have ‘lys’ i Universet fx strukturelt stabil under ændringer i fundamentale naturlove? Holger prøver at påstå at dette er tilfældet. Uanset hvad man, i fremtiden, vil opnå enighed om er hoved-resultaterne af Holgers (og andres) “tilfældig dynamik”-projekter, er der tale om meget interessante spørgsmål (udforsket i en række sammenhænge) og projektet er meget beslægtet med (men, i en vis forstand, dybere end) det projekt som vi skitserer her.

Lad os nu som annonceret vende os mod fænomenet liv som vi kender det – eller snarere en indkredsning af ting, der er nødvendige for liv, såsom at Universets naturlove skal muliggøre eksistensen af atomkerner, atomer, herunder fx brint og kulstof, vandmolekylet og større (organiske) molekyler osv. Den publicerede litteratur, der sætter sig som mål at undersøge stabiliteten af liv, under variation af naturlovene, er i dag ret omfattende. Disse studier går ofte under mystiske ord som ‘antropisk princip’, ‘multiverser’, osv. – se fx [6], [7], [8], [9], [13] og [14]. Her varierer man typisk kun få af parametrene (naturkonstanterne) i parametersystemet i naturlovene, mens man fastholder formen af naturlovene. Fælles for studier af denne art er, at man prøver at indkredse såkaldte “antropiske bånd”, hvor parameteren skal have en værdi indenfor intervallet sat af det “antropiske bånd”, for at muliggøre eksistensen af de strukturer (vi kender i Universet) som er vigtige for liv (som vi kender det). Samtidig prøver man – i projektet – at indkredse hvorledes Universet *kunne have været indrettet og konstrueret anderledes*, med andre værdier af parametrene.

Drastiske konsekvenser ved små ændringer af parametrene (naturkonstanterne)

Når man ser de forskellige overslag over størrelser af de udvalgte stabile objekter (udtrykt ved fundamentale naturkonstanter) i tabel 2 skulle man måske umiddelbart tro, at størrelsen af disse objekter *blot ville blive skaleret op eller ned*, hvis de indgående naturkonstanter blev ændret. Fx ses at alle objekter har karakteristiske størrelser angivet som dimensionsløse tal ganget med Bohr-radius. Den elektromagnetiske koblingsstyrke, α , indgår i Bohr-radius og man skulle tro, at objekterne blot skalerede med α . Men det forholder sig slet ikke så enkelt. Med selv små ændringer i værdien af α (og andre konstanter) kan det være, at der slet ikke er nogle atomer!

⁷Når vi ændrer på naturlovene, gør vi det med matematikkens (og logikkens) sprog uforandrede. Men man skal være opmærksom på, og huske at prøve at reflektere over, at disse sprog – fx matematikkens sprog – jo har en forankring i vort faktiske fysiske univers!

Lad os illustrere dette med et enkelt eksempel ved at gå lidt dybere ind i stoffets struktur og se på atomkernen. Atomkernen (en forudsætning for atomet) synes at være meget følsom og strukturelt ustabil overfor selv små ændringer i styrken af de subatomare vekselvirkninger (såsom den elektromagnetiske finstrukturkonstant α og styrken af den stærke kernekraft α_S) men også små ændringer i fx massen af u - og d -kvarkerne kan få atomkernen til at 'smuldre'.

Som bekendt har protonen (uud) og neutronen (udd) næsten samme masser: $m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2$ og $m_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2$, med et meget lille masseoverskud til neutronen på godt en promille, ca. $1,3 \text{ MeV}/c^2$. Det er vigtigt at neutronen vejer denne promille mere! Det er meget kompliceret kernefysik at regne på disse forhold i detalje, men, lidt groft, kan man sige at hvis massen af neutronen var ca. en elektron- (= positron) masse mindre end massen af en proton ville protonen være ustabil (og kunne henfalde til en neutron og en positron) og der ville ikke være nogle atomer og derfor ingen kemi. Det er derfor vigtigt at $m_n > m_p$, men heller ikke for meget større, for så bliver neutronen for ustabil og den isotop af brint der har en ekstra neutron, deuterium, ville blive ustabil⁸.

At udregne protonens og neutronens masser med nogen nøjagtighed er meget kompliceret og langt det meste af massen (måske ca. 99 %) kommer faktisk fra kinetisk energi (dynamikken) af u - og d -kvarkerne og de kræfter (gluoner) der holder dem sammen⁹. Det er ikke underligt at styrken af disse kræfter - fx stærke og elektromagnetiske kræfter - spiller en stor rolle her. Man skulle egentlig tro (se Cahn (1996) [3], s. 953), at protonen var tungere end neutronen da der er ekstra elektromagnetisk energi i protonen pga. dens ladning. Men det viser sig altså (som ovenfor nævnt) at være omvendt, fordi d -kvarken er tilstrækkeligt meget tungere end u -kvarken så kvark-masseforskellen ($m_d - m_u$) netop er stor nok til at overvinde den ekstra Coulomb-energi i protonen. Hogan (2000) [15] anfører at stabiliteten af protonen kræver at $(m_d - m_u)/m_p \geq \alpha^{3/2}$ for at overkomme den ekstra elektromagnetiske energi af en proton relativt til en neutron. Man skal ikke justere meget på parametrene for at denne ulighed ikke længere er opfyldt.

Atomkernen er, endvidere, overmåde følsom overfor styrken af den stærke kernekraft (α_S). Et meget berømt eksempel er at He-2 kernen (der består af to protoner og derfor også kaldes "di-protonen") ikke er en stabil atomkerne. Men den mangler kun ca. $\sim 1/10 \text{ MeV}$ i at blive en bunden (stabil) tilstand (se fx Barrow og Tipler (1986) [7], s. 322; Davies (1982) [8], s. 68). Undersøgelser viser at hvis man øger styrken af den stærke kernekraft med under ~ 4 procent ville He-2 (di-protonen) blive bundet. I vor stjerne, Solen, sker

brintomdannelsen yderst langsomt, hovedsagligt fordi omdannelsen i den samlede reaktionskæde er bremset yderst kraftigt ned af en del-proces $p + p \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu$ som foregår via de svage vekselvirkninger (en proton skal omdannes til en neutron, for at to protoner kan blive til deuterium, og det sker yderst langsomt). Hvis He-2 (di-protonen) var en stabil atomkerne, ville brint omdannelsen kunne foregå alene via de stærke vekselvirkninger, og brint omdannelsen ville foregå ca. en faktor 10^{18} hurtigere! (Davies (1982) [8], s. 71). Dette ville føre til et univers uden hydrogen. Dvs. uden vand, uden organisk kemi og uden liv (som vi kender det).

Eksemplet antyder at det ikke er muligt at ændre meget ved den stærke kernekraft og stadig have et univers med en sådan indretning at der fx kan opbygges en stjerne, der lyser i milliarder år (som den flotte stjerne der er vist på Kvants forside). Og med mulighed for at skabe en iagttager som Mr. Tompkins til at cykle rundt. I sine drømme om natten. I vort fængslende og dejligt levende univers.

Tak til Holger Bech Nielsen, Thomas Døssing og Igor Novikov for en snak om nogle af emnerne.

Litteratur

- [1] G. Gamow (1968), Tredive år, der rystede fysikken. Kvanteteoriens historie. Gyldendal.
- [2] G. Gamow (1942), Mr. Tompkins i Drømmeland. Eller historien om lille c, store G og lille h (tilegnet Lewis Carrol og Niels Bohr). Gyldendal.
- [3] R.N. Cahn (1996), The eighteen arbitrary parameters of the standard model in your Everyday life, *Rev. Mod. Phys.* **68**, No. 3, July 1996, p. 951-959, <http://phyweb.lbl.gov/~rncahn/www/rmp-18.pdf>.
- [4] M. Tegmark, A. Aguirre, M.J. Rees og F. Wilczek (2006), Dimensionless constants, cosmology and other dark matters, *Phys. Rev. D* **73**:023505, [arXiv:astro-ph/0511774](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0511774).
- [5] W.H. Press og A.P. Lightman (1983), Dependence of macrophysical phenomena on the values of the fundamental constants, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* **310**, 323 - 336.
- [6] B.J. Carr og M.J. Rees (1979), The anthropic principle and the structure of the physical world. *Nature* **278**, s. 605-612.
- [7] J.D. Barrow og F.J. Tipler (1986), The Anthropic Cosmological Principle. Oxford University Press 1986. Findes elektronisk på books.google.com.
- [8] P.W. Davies (1982), The accidental universe. Cambridge Univ. Press.
- [9] B. Carr (ed) (2007), Universe or multiverse? Cambridge Univ. Press.
- [10] Rasmus Dahlberg (2008), Hvad nu hvis... 40 alternative verdenshistorier. Forlaget Dingbat (www.dingbat.dk).
- [11] Holger Bech Nielsen: Har vi brug for fundamentale naturlove ? GAMMA (Niels Bohr Inst.) 36 og 37 (i to dele) 1979. Se også fx "Dual strings - Sec. 6 Catastrophe Theory Programme" (1976) optrykt i C.D. Froggatt og H.B. Nielsen "Origin of Symmetries". World Scientific (1991).
- [12] Jean-Philippe Uzan (2003), The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 403-455.
- [13] Max Tegmark (1998), Is the theory of everything merely the ultimate ensemble theory, *Annals of Physics* **270**, s. 1-51; [arXiv:gr-qc/9704009v2](http://arxiv.org/abs/gr-qc/9704009v2).
- [14] H. Kragh, Higher speculations (2011). Oxford University Press. Fx kap. 9 Anthropic Science.
- [15] C. Hogan (2000), Why is the universe just so, *Rev. Mod. Phys.* **72**, s. 1149-1161; [arXiv:astro-ph/9909295v2](http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2).

⁸Deuterium er vigtig for brintfusion i stjerner. Fx producerer pp-reaktionen $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$ kun ca. 0,42 MeV i energi, så hvis deuteriums masseækvivalente energi var 0,42 MeV større, ville reaktionen ikke engang frigive energi, og ville have lyst til at løbe i den modsatte retning, se fx Hogan (2000) [15], s. 16.

⁹Bemærk, således, at hvile-energien af atomart stof (hvis hvile-masse jo hovedsagligt udgøres af nukleonerne) faktisk skyldes bevægelsen af de konstituentier/bestanddele (u -, d - kvarker og gluoner) som nukleonerne er opbygget af! Hvile-energien er altså slet ikke i hvile!

Er naturen supersymmetrisk?

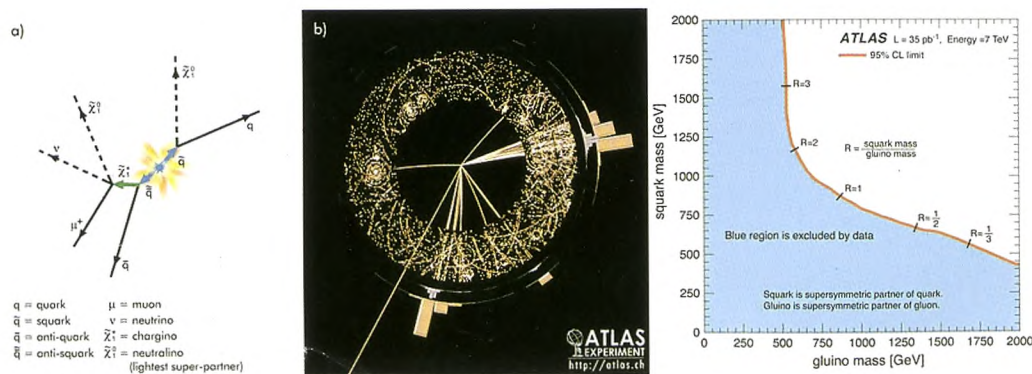
Spørgsmålet om naturen er *supersymmetrisk*, har længe plaget forskerne. Strengteorien kan ikke klare sig uden supersymmetri, der blev introduceret for at beregningerne gav mening, hvilket skabte *superstrengteorien*. Supersymmetrien forudsiger at de kendte fundamentale partikler – både stofpartikler (fermioner) og vekselvirkningspartikler (bosoner, f.eks. fotonen) – har en *skyggepartikel*, kaldet en superpartner. En superpartner til en stofpartikel som en kvark er en "skvark", hvis egenskaber minder om kvarkens, men den er en vekselvirkningspartikel. Tilsvarende skulle gluonen (vekselvirkningspartiklen der er ansvarlig for at holde atomkernen samlet) have en superpartner med stofpartikelegenskaber, og den kaldes for en "gluino". Disse superpartnere er ikke blevet observeret, og supersymmetri kan kun eksistere hvis de forudsagte partiklers masser er meget store. Men hvor store er deres masser?

Laboratorier rundt omkring i verden har forgæves forsøgt at producere su-

perpartnere. Ved CERN er ATLAS-detektoren designet til at finde superpartnere ved at kolliderer protoner sammen og holde nøjagtigt regnskab med impulsbevarelse. Den totale impuls lodret på akse for proton-proton kollisionen er kun eksakt bevaret uden supersymmetri. Henfaldsprodukterne fra f.eks. en neutralino (den letteste superpartner) vil skabe en afvigelse af impulsbevarelsen som indikerer en partikel der vekselvirker svagt med stof.

Resultaterne af ATLAS' målinger af protonkollisioner fra 2010, med en energi på 7 TeV, viser ikke noget tegn på supersymmetriske partikler. Man kan derfor konkludere at de supersymmetriske partnere må være langt tungere end sædvanlige partikler og derfor meget sjældne, idet tunge partikler er vanskeligere at skabe. Hvis supersymmetriske partikler kan påvises, er de en god kandidat til det mørke stof som menes at udgøre 80 % af alt stof i Universet.

Kilde: <http://www.atlas.ch/news/2011/is-nature-supersymmetric.html>



Yderst til venstre: En protonkollision kan resultere i dannelsen af squarker og anti-squarker. De henfalder til lettere supersymmetriske partikler, der kan forlade detektoren uopdaget. Det betyder en manglende balance i impulsregnskabet (figuren i midten). Yderst til højre: ATLAS begrænser mulighederne for superpartnere. En gluino og en skvark kan ikke have samme masse indenfor den blå region i diagrammet. De skal hver have en langt højere masse, f.eks. 1000 GeV/c². Alle figurer: CERN.