

Fysikkens modeller — bro til ‘virkeligheden’ *

Benny Lautrup
Niels Bohr Institutet
Københavns Universitet

Mod afslutningen af dette ‘naturvidenskabens århundrede’ ses en faldende interesse for de åndelige og i nogen grad også de materielle værdier, der er skabt af naturvidenskaben. Fokusering på dens negative sider, reduktion af skoleundervisningens omfang og kvalitet, og vedvarende nedskæringer i dens budgetter, har ført til, at naturvidenskaben mister terræn relativt til andre discipliner. For eksempel er tilgangen af studenter ved det Naturvidenskabelige Fakultet under Københavns Universitet stagnerende, medens den vokser for de fleste andre discipliner.

Det er måske derfor på sin plads at pege på nogle af de åndelige værdier, der udspringer af naturvidenskaben. Mere præcist vil jeg gennem konkrete eksempler koncentrere mig om betydningen af fysikkens matematiske modeller.¹ Disse modeller er, om noget, fysikkens egentlige ‘produkt’. De rummer den præcise indsigt i naturen, som især gør fysikken nyttig for teknologi og industri. Andre naturvidenskabelige discipliner benytter sig selvsagt også af matematiske modeller, men fysikken må givetvis betragtes som de ‘modellerende videnskabers moder’. I fysikken har modellerne nået en dybde og kompleksitet, der ikke overgås af nogen anden disciplin.

I stedet for at tale om, hvorledes man bør formidle, vil jeg forsøge at formidle nogle af de indsigter, der er opnået ved brug af matematiske modeller med oprindelse i fysikken. Jeg har valgt at fokusere på to ekstreme eksempler, som jeg i øvrigt personligt har bevæget mig mellem i min karriere som forsker. Den ene model beskriver atomernes dybeste struktur i største detalje, medens den anden giver en fejende forklaring på den mulige mekanisme bag de små og store udslettelser af arter i livets historie her på jorden. I det første tilfælde er modellen ekstremt velunderbygget, i det andet har den mere karakter af gætteri.

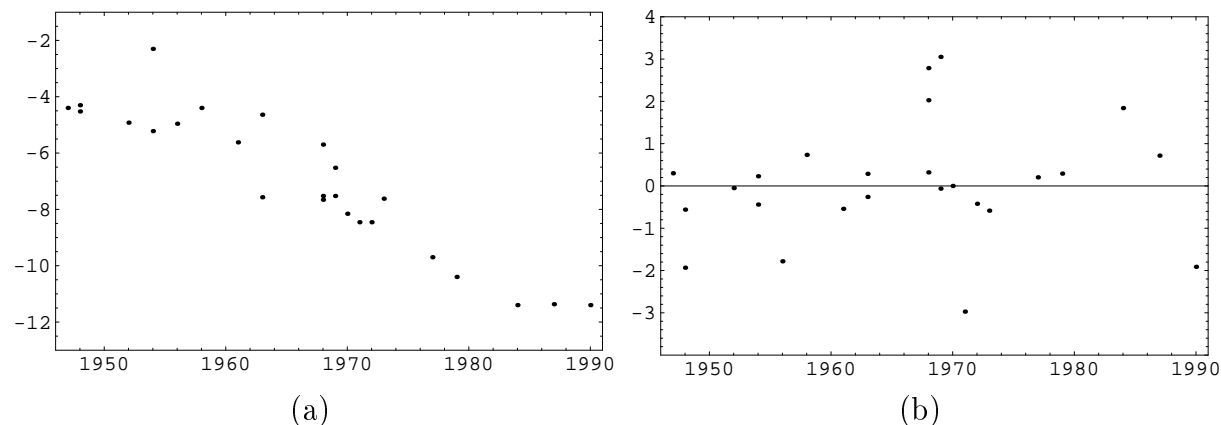
*Tale ved Øresundsuniversitetsymposiet på Louisiana museet den 6. maj 1999

¹For at foregribe filosofiske indvendinger vil jeg gøre opmærksom på, at jeg bruger begrebet ‘model’ som synonymt med ‘teori’, fordi jeg faktisk ikke er i stand til at foretage en klar skelnen mellem de to begreber. Nok opfattes ‘model’ mest som en matematisk beskrivelse af et konkret fysisk system og ‘teori’ som en mere omfattende matematisk beskrivelse af en klasse af fysiske systemer, men da alle fysikkens modeller gælder for mere end et enkelt system, er det svært at finde det punkt, hvor ‘model’ bliver til ‘teori’. Desuden varierer overgangspunktet med tiden. Bohr’s atommodel blev for eksempel til Bohr’s atomteori på nogle få år.

Elektronens magnetiske moment

Allerede i slutningen af det forrige århundrede var fysikerne nogenlunde overbeviste om, at magnetisme formentlig altid skyldtes elektrisk ladning i bevægelse. Dette blev klarest udtrykt matematisk i 1864 gennem Maxell's ligninger for elektrodynamikken. I 1925 blev det opdaget, at elektronen besidder et spin, en rotation omkring sin egen akse. Da elektronen har elektrisk ladning vil denne bevægelse af ladning gøre elektronen selv til en lille magnet, hvis styrke kaldes det magnetiske moment og er af afgørende betydning for stoffernes magnetiske egenskaber.

I slutningen af 20'erne og begyndelsen af 30'erne opstilledes den kvantemekaniske udgave af elektrodynamikken, kaldet kvanteelektrodynamikken, i hvilken elektronens magnetiske moment kunne beregnes. Den første tilnærmelse stemte da også godt med de eksperimenter, der var blevet gjort², men ingen kunne dengang beregne de korrektioner, som teorien også gav anledning til. I 1947 blev det eksperimentelt påvist, at der var afvigelser fra den forudsagte værdi på promille-niveau, og de skyldtes ifølge teoretikerne indre stråling i elektronen, hvorved den udsender og genindfanger en foton (en lyspartikel). Den smukke overensstemmelse mellem teori og eksperiment som blev fundet i 1948 gav en Nobelpris til eksperimentalfysikeren Polykarp Kusch i 1955 og til teoretikeren Julian Schwinger i 1965.



Figur 1: *Elektronens magnetiske moment som funktion af årstallet (baseret på data fra ref. [9]). (a) Den relative eksperimentelle usikkerhed. På den lodrette akse svarer -2 til en procent, -3 til en promille, -6 til en milliontedel, o. s. v. (b) Afstanden mellem teori og eksperiment i enheder af den samlede usikkerhed. God overensstemmelse betyder, at $2/3$ af disse værdier skal ligge mellem -1 og $+1$.*

Men hermed var det absolut ikke slut. Eksperiment og teori fortsatte med at konfrontere hinanden gennem de efterfølgende 40 år! De faktiske tal er ikke så interessante i denne sammenhæng, men fejlen reduceredes som vist fig. 1a med en faktor 10 millioner

²De tidlige eksperimenteres historie kan findes i en bog af Peter Galison [6]. Specielt interessant er historien omkring Einstein - de Haas eksperimentet fra 1915, hvor resultatet — formodentlig på grund af Einsteins teoretiske forudindtagethed — kun blev halvdelen af den senere fundne værdi.

i perioden fra 1958 til 1984, hvilket i gennemsnit svarer til lidt mere end en årlig halvering! Sammenligningen mellem teori og eksperiment afbildet i fig. 1b viser, at afstanden mellem teori og eksperiment kun sporadisk har oversteget den samlede eksperimentelle og teoretiske fejl.

Denne lange serie af eksperimenter og teoretiske beregninger må være fysikkens mest præcise sammenligning mellem teori og eksperiment. Den finder sted over flere generationer af fysikere, og eksperimenterne foregår på en række forskellige laboratorier. Ydermere anvendes tre forskellige eksperimentelle metoder mere eller mindre i forlængelse af hinanden. Ned igennem serien af eksperimenter strippes elektronen gradvis for omgivelsernes forstyrrende indflydelse. I begyndelsen befinder elektronen sig fanget i et atom blandt andre elektroner, senere er den fri i en sky af andre elektroner holdt fast i en magnetisk flaske, og til sidst er den helt alene i en elektromagnetisk fælde. Hans Dehmelt blev i 1989 belønnet med Nobelprisen blandt andet for det kunststykke at isolere en enkelt elektron og få den til at fortælle om sit magnetiske moment.

Denne langvarige proces har naturligvis medført en klippefast overbevisning om, at kvanteelektrodynamikken er den 'sande' underliggende teori for atomfysikken og de indre strålingsprocesser, der foregår i atomerne. De seneste beregninger involverer op til fire indre fotoner, der udsendes og genindfanges af elektronen. Beregningerne er overordentlig vanskelige og i det væsentlige gennemført af blot en enkelt person [7]. Dette er naturligvis en svaghed. Historien, også elektronens historie, har vist, at der altid er mulighed for fejl, både teoretisk og eksperimentelt [9]. Men historien viser også, at den kompetitive videnskabelige metode efterhånden vil lokalisere eventuelle fejl og få dem rettet.

Virkelighed?

Det er min opfattelse, at dette langvarige forløb med mange deltagere fra forskellige laboratorier og universiteter er svært at forene med et socialkonstruktivistisk³ syn på naturvidenskaben. Elektronen er ikke konstrueret af forskerne, men må virkelig eksistere og besidde et magnetisk moment. Hvis vi en dag møder teknologisk formående væsener fra en fjern stjerne, er jeg overbevist om, at de også vil kende til elektronen og dens magnetiske moment. De vil naturligvis kalde den noget andet, men med en passende oversættelse vil størrelsen kunne sammenlignes mellem de to kulturer, der har frembragt den. Og det ville blive en slem overraskelse, hvis de ikke var enige.

Kvanteelektrodynamikken danner en fast bro til atomernes ellers usynlige indre virkelighed. I lighed med alle andre matematiske modeller sammenfatter den træk ved en virkelighed, hvis dybeste lag dog måske for altid vil være skjult for os. Skulle man en dag finde ud af, at atomernes 'sande natur' er anderledes end den kvanteelektrodynamiske beskrivelse vil det sikkert være mest bekvemmeligt fortsat at benytte kvanteelektrodynamikken på den enorme kreds af atomare fænomener, den beskriver med så stor nøjagtighed.

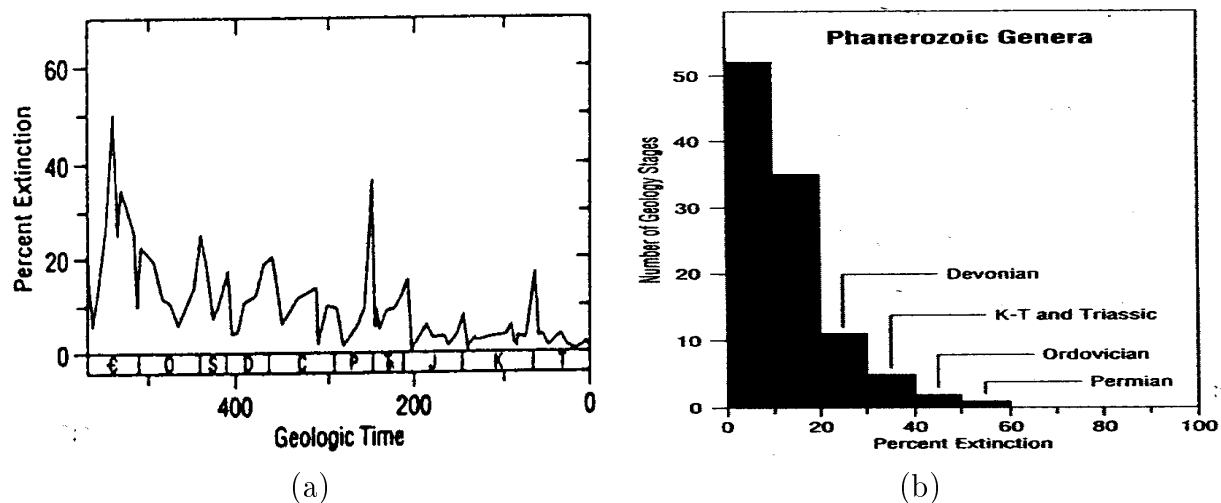
³Videnskabsteoretisk holdning som forfægter at naturvidenskab er socialt betinget og derfor ikke fundamentalt forskelligt fra andre socialt betingede systemer, for eksempel religion. Den hævder, at naturvidenskaben konstruerer de objekter, den beskæftiger sig med, snarere end, at den opdager dem. Denne filosofi kritiseres for eksempel i Helge Kragh's seneste bog [8].

Selvorganiseret kritikalitet

Komplekse systemer findes overalt i naturen, hvor myriader af ‘agenter’ vekselvirker med hinanden og med deres omgivelser. Agenterne kan være celler i et levende væsen, ideer i en tænkende hjerne, dyr i et økosystem, personer i et samfund, etc. Fælles for disse systemer er, at de forandrer sig med tiden, udvikler sig, men i modsætning til den sædvanlige fysik besidder vi ikke en generel matematisk teori, et sæt ‘Darwin’s ligninger’, der kvantitativt beskriver sådanne systemers udvikling [3].

Den hurtige moderne computer har gjort det muligt at simulere matematiske modeller for agenternes vekselvirkning i komplekse systemer og udforske de lovmæssigheder, de trods alt udviser. Et af de mest inspirerende begreber, der er kommet ud af denne type forskning, går under betegnelsen ‘selvorganiseret kritikalitet’. Det blev indført af den danske fysiker Per Bak (og medarbejdere) i slutningen af 80’erne og forårsagede en lavine af forskningsaktivitet.⁴

Selvorganiseret kritikalitet refererer til at et system ‘af sig selv’ kan udvikle sig hen mod en tilstand, hvor det er ‘på spring’ til at ændre sig ved blot den mindste påvirkning. Det simpleste eksempel [1] består i at drysse sand på en sandbunke, så bunken til sidst bliver så stejl, at et enkelt sandkorn kan udløse en lavine af sand. Der er ingen grænse for, hvor stor en lavine kan blive, bortset fra bunkens størrelse. Men sandsynligheden for, at en lavine opnår en given størrelse, aftager med størrelsen for dog aldrig helt at forsvinde.



Figur 2: Udslettelse af arter gennem de sidste 600 millioner år af jordens historie. (a) Udslettelseshastigheden afbildet som funktion af geologisk tid. (b) Fordeling af størrelsen af de enkelte begivenheder (fra ref. [5]).

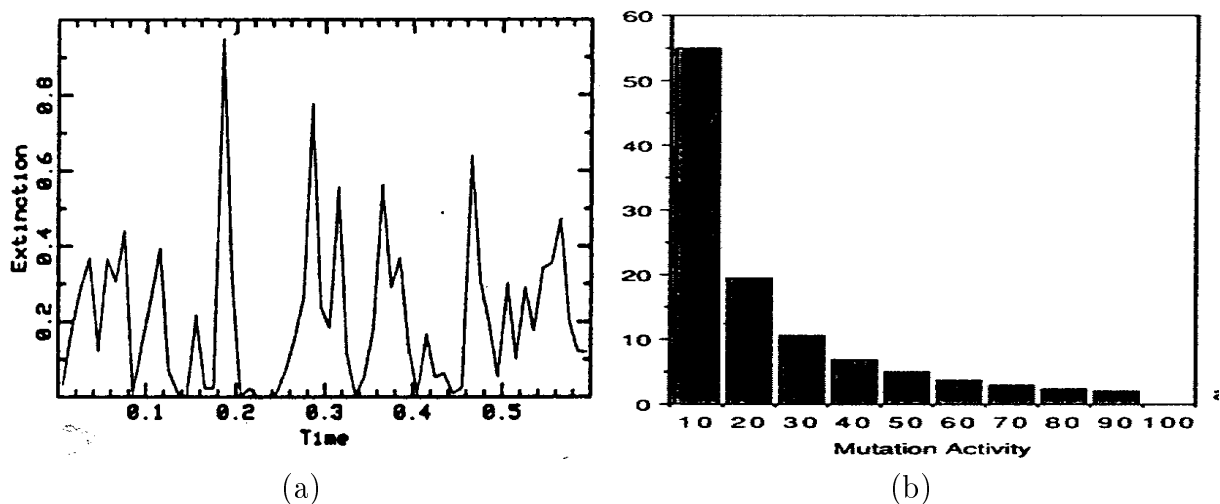
Laviner af begivenheder udløst af små påvirkninger er velkendte fænomener, fra jordskælv over trafikpropper til epileptiske anfald. Her vil jeg fokusere på den udslettelse af arter, som med mellemrum er sket i jordens historie. I fig. 2a ses udslettelseshastigheden

⁴En populær fremstilling af selvorganiseret kritikalitet med mange eksempler er givet af Per Bak i bogen *How Nature Works*, Oxford University Press (1997).

som funktion af den geologiske tid og i fig. 2b ses antallet af udslettelser som funktion af deres størrelse.

Det kan være vanskeligt i et givet tilfælde at eftervise, at systemet faktisk selvorganiserer til en kritisk tilstand, men det er for eksempel karakteristisk for kritikalitet, at fordelingen af lavinestørrelser matematisk følger en potenslov. Fordelingen i fig. 2 er netop af denne karakter og det kunne antyde, at evolutionen fører til en selvorganiseret kritisk tilstand.

Hvis det er tilfældet, er de store udslettelsesbegivenheder ikke væsentlig forskellige fra de små (bortset fra størrelsen) og behøver ikke at være fremkaldt af kolossale kometnedslag eller vulkanudbrud. I et selvorganiseret kritisk system fremkommer sådanne begivenheder 'af sig selv' i den forstand, at de kan udløses af ganske små hændelser.



Figur 3: Udslettelse af arter i Bak-Sneppen modellen. (a) Afbildet som funktion af antallet af tidsskridt. (b) Fordeling af størrelsen af de enkelte begivenheder (fra ref. [5]). Modellen giver resultater, der er sammenlignelige med fig. 2.

Modellen

For at efterprøve disse ideer konstruerede Per Bak og Kim Sneppen [2] i 1993 en simpel matematisk model for evolutionen, som selvorganiserer til en kritisk tilstand. I sin enkleste form består modellen af et antal 'arter' arrangeret jævnt på en ret linie, hvor afstanden mellem to arter udtrykker deres indbyrdes afhængighed, for eksempel i fødekæden. Til at begynde med tilskriver man hver art et tilfældigt tal mellem 0% og 100% som et udtryk for artens 'fitness'. I hvert efterfølgende tidsskridt udvælges den art, der har mindst fitness. Den, samt dens to nærmeste naboer, udslettes ved at erstatte dem med nye arter med tilfældig fitness. Algoritmen medfører altså, at ikke blot en enkelt art straffes for at have lav fitness, men naboerne (i fødekæden) straffes også, fordi de formodes at være afhængige af den.

Denne simple algoritme medfører, at systemet selvorganiserer til en kritisk tilstand, i hvilken næsten alle arter har fitness over 67%. I denne tilstand vil det være meget sandsynligt, at en af de tre nye arter vil have mindst fitness i næste tidsskridt og derfor sammen med sine naboer gennemgå endnu en udslettelse. På denne måde opstår der laviner af sammenhængende udslettelser, som løber gennem systemet, indtil de stopper af tilfældige grunde.

Virkelighed?

Modellen har altså visse træk tilfælles med den 'rigtige' evolution. Udslettelse af arter sker en gang imellem og kan antage en hvilken som helst størrelse, dog med det forbehold at de større begivenheder sker sjældnere end de små. Det nye er, at der ikke behøver at være en specifik årsagsforklaring til selv de største udslettelser. De sker bare i et kritisk system, som er 'på spring' til forandringer.

Gould og Eldridge påpegede i 1977, at evolutionen for en enkelt art ikke sker jævnt, men snarere i spring mellem lange perioder uden særlige forandringer. De kaldte det *punktueret ligevægt*, og Bak og Sneppen viste også [2], at dette fænomen forekommer i deres model.

Evolutionsbiologerne ser naturligvis med nogen skepsis på en sådan forklaring, eller rettere på den mulighed, at der ikke behøver at være en ydre forklaring på fænomener af så afgørende betydning for livet på jorden. Modellen skøjter hen over al den detaljerede viden, de så omhyggeligt har skaffet til veje, og hævder som sagt, at de store udslettelser af arter kan være et systemisk sammenbrud forårsaget af en tilfældig begivenhed i et selvorganiseret kritisk netværk af indbyrdes afhængige arter.

I dette tilfælde kan man nok ikke kalde den matematiske model en 'bro til virkeligheden', ikke engang fundamentet til en bro. Ikke desto mindre er det påfaldende, at der er træk ved evolutionen, for eksempel punktueret ligevægt, som er gyldig på tværs af alle arter, og som kendes fra mange andre systemer, for eksempel trafikpropper [10]. En forståelse af et så generelt fænomen kræver formentlig en generel model.

Modeller uden for naturvidenskab

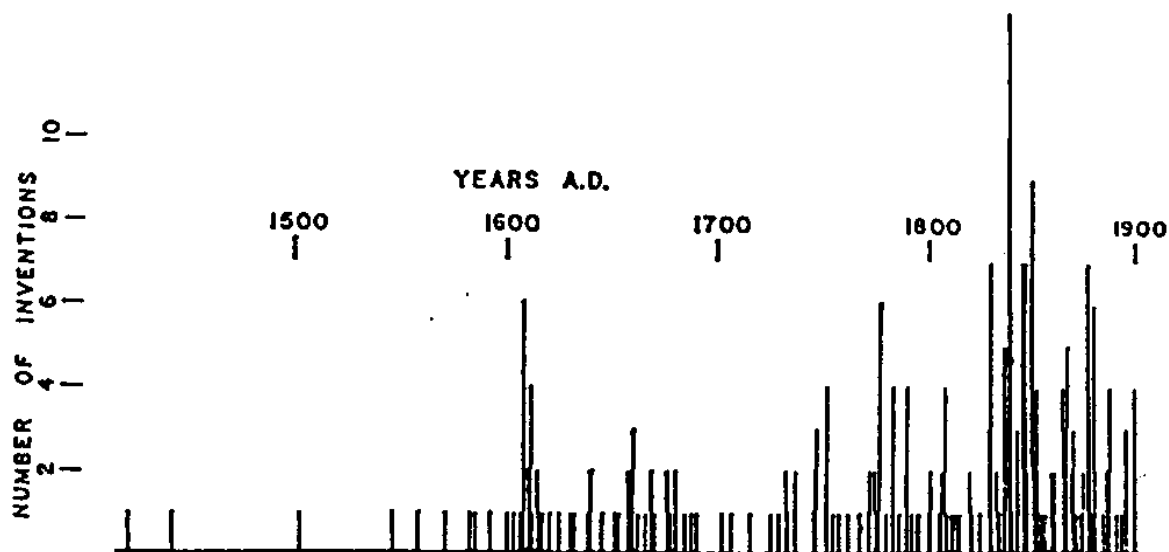
Matematiske modeller er som sagt ikke udelukkende nyttige i den naturvidenskabelige forskning. Overalt, hvor kvantitative størrelser bruges til at beskrive data, vil sammenhæng mellem sådanne størrelser naturligt kunne formuleres som en matematisk model. Neurale netværk⁵ har for eksempel været brugt til at sammenfatte lingvistiske regler for udtale på engelsk [11] og orddeling på dansk [4].

Fysikernes brug af matematiske modeller langt ud over den egentlige fysik er ofte blevet mødt med kraftig modstand fra de videnskaber, den således blander sig i. Skældsord som 'fysikerarrogance' og 'fysikimperialisme' er ikke ukendte, fordi modellerne ofte er yderst simple sammenlignet med disse videnskabers detaljerede fænomenbeskrivelse. Hvilket fysikerne i øvrigt tit er lykkeligt uvidende om.

⁵Se for eksempel Brunak og Lautrup: *Neurale netværk — computere med intuition*, Munksgård (1988).

Selvorganiseret kritisk forskning

Så lad mig afslutte dette foredrag ved selv at optræde som fysikimperialist og anvende ideerne om selvorganiseret kritikalitet på forskningen selv. Forskning foretages jo også af agenter, der vekselvirker med hinanden i et netværk af faglige og intellektuelle naboskaber. Der er i dette netværk en stærk konkurrence om at få ideer ført videre, analogt med konkurrencen om genernes videreførsel i den biologiske evolution.



Figur 4: Antallet af opfindelser i tidsrummet 1400–1900. Forløbet ligner punktuert ligevægt. Fra Ogburn and Thomas, *Political Sci. Quarterly* (1922). Med tak til Kim Sneppen.

Det er ikke utænkeligt, at denne dynamik gør forskningen til et selvorganiseret kritisk system, i hvilket en enkelt ny ide kan medføre en lavine af ny forskning. I fig. 4 ses frekvensen af nye opfindelser i tidsrummet fra 1400 til 1900, og det betragter jeg som en smule evidens for, at forskningen kunne være selvorganiseret kritisk, idet det minder om punktuert ligevægt. Jeg beklager, at jeg ikke har bedre kvantitativ dokumentation, men lad det stå hen som en opfordring til videnskabshistorikerne.

Hvis forskning skulle være selvorganiseret kritisk, er det lige så betænkeligt at gribe ind i den uden forståelse for dette punkt, som det er at gribe ind i den biologiske evolution uden indsigt i dens dynamik. Pålægger man et selvorganiseret kritisk system en overordnet styring, vil det med stor sandsynlighed bringe det ud af den kritiske tilstand og ind i en tilstand, hvor laviner kun forekommer op til en maksimal størrelse og ellers dør ud. Noget tilsvarende kendes fra bjergegne, hvor man jo søger at begrænse lavinefaren ved at bygge hegn på tværs af skråningerne.

En sådan tilstand ønsker ingen at fremkalde i forskningen. Skal forskning styres, er det vitalt at undgå at 'bygge hegn', som begrænser størrelsen af de mulige laviner af nye ideer. Et andet problem er, at selvorganiserede systemer opstiller deres egne værdimål, for eksempel i den biologiske evolution, hvor et individs værdi udtrykkes gennem evnen til

at producere afkom. Tilsvarende gælder det i forskningen, hvor værdi udtrykkes gennem den anerkendelse andre forskere giver til ens egne ideer ved at anvende dem. Presses et fremmed værdimål ned over forskningen, for eksempel ved at tillægge en forsker med mange bevillinger stor værdi, så ødelægges den indre selvorganiserende dynamik. I sidste ende kan det kun føre til forringelse af forskningen.

Litteratur

- [1] P. Bak, C. Tang and K. Wiesenfeld: *Self-Organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise*, Physical Review Letters **59**, 381–384 (1987).
- [2] P. Bak and K. Sneppen: *Punctuated Equilibrium and Criticality in Simple Model of Evolution*, Physical Review Letters **71**, 4083–4086 (1993).
- [3] P. Bak, H. Flyvbjerg and K. Sneppen: *Can we Model Darwin?*, New Scientist **1916**, 36–39 (12 March 1994).
- [4] S. Brunak og B. Lautrup: *Linjedeling med et neuralt netværk*, Skrifter om Anvendt og Matematisk Lingvistik **14**, 55–74 (1989).
- [5] H. Flyvbjerg, P. Bak, M. H. Jensen, and K. Sneppen: *A Self-Organized Critical Model for Evolution*, p. 269–288 i E. Mosekilde, O.G. Mouritsen (Eds.): *Modelling the Dynamics of Biological Systems*, Springer (1995).
- [6] P. Galison: *How Experiments End*, Chicago University Press (1987).
- [7] T. Kinoshita: *New value for the α^3 Electron Anomalous Magnetic Moment*, Physical Review Letters **75**, 4728–4731 (1995).
- [8] H. Kragh: *Videnskabens væsen*, Fremad (1999).
- [9] B. Lautrup and H. Zinkernagel: *$g - 2$ and the Trust in Experimental Results*, Studies in History and Philosophy of Modern Physics **30**, 85–110 (1999).
- [10] K. Nagel and M. Pczuski: *Emergent Traffic Jams*, Phys. Rev. **E51**, 2909 (1995).
- [11] T. J. Sejnowski and C. R. Rosenberg: *NETtalk: a Parallel Network that Learns to Read Aloud*, Complex Systems **1**, 145–168 (1987).