

En pris for en gåde?

Ove Nathan

Et sted i sin fængslende bog om Niels Bohr's tider, skriver Abraham Pais, at vore dages fysik er ahistorisk, en videnskab med en kort hukommelse. Synspunktet har noget på sig: der er fart på, og den, der kaster blikket blot et årti eller to tilbage, kan få en fornemmelse af at se ind i en fjern fortid. Der var engang, da man endnu diskuterede realiteten af begrebet et sort hul, og der var en tid, hvor superledning var noget, der foregik nede nær temperaturskalens nulpunkt. Og det var altså ikke i århundredets begyndelse!

Men det ville da også være rigtig trist, hvis man kunne øjne en afmatning i fysikkens udvikling, som tegn på, at nu var alle væsentlige spørgsmål ved at være besvarede. Sådan er det ikke, men på den anden side kan man dog se en forskel mellem århundredets første og sidste halvdel: dengang skete der en forrygende udvikling i fysikkens grundlæggende begrebsapparat, hvor relativitetsteori og kvantemekanik blev formet. Stilen er blevet en anden nu. Idag står der solide kagebøger på hylden, ikke mindst med pålidelige kvanteopskrifter - men det forhindrer ikke, at der laves masser af sjov ny fysik. Og håbet om det næste, store begrebsmæssige fundamentalgennembrud synes at leve i bedste velgående, med drømmen om den endelige teori for alting, feltteorien, hvor alle andre vekselvirkninger og felter kan forenes med den hidtil så utilnærmelige ener: gravitationen.

Min oplevelse af tempoet i moderne fysik blev intens i året 1994, hvor jeg havde rig lejlighed til, på nært hold, og med udgangspunkt i instituttet på Blegdamsvej, at genopleve en del af spektret af dansk fysik, efter mere end et årti "udenfor nummer". Det skal ikke skjules, at fornemmelsen af déjà vu godt kan mærkes hist og her - men kun pletvis. Fornemmelsen af det nye er stærkere: det gælder kaos og komplekse systemer, det gælder astrofysik og kosmologi, laserfysik, klyngefysik, superledning - listen er ikke komplet.

Tempo-oplevelsen er helt super-intens på grænsefladen mellem partikelfysik og kosmologi. Det er vist kun tre årtier siden, at ordet kvark blev formet af Gell-Mann, og kun et par årtier siden, at kvante-chromodynamikken gjorde sin entré. I 1994 kan universets tidlige udvikling øjensynlig ikke længere beskrives uden den slags ingredienser. I astrofysikkens unge år var det ikke mindst kernefysikken, der leverede råmaterialet. På grundlag af kernefysiske data kan man tegne et sammenhængende billede af grundstofsyntesen i stjernerne, der stemmer forbløffende godt med de grundstofordelinger, som kendes eksperimentelt fra solsystemet og fra stjenspektre. Idag er det altså blevet partikelfysikernes tur til at være hovedleverandør til verdensrummets fysik, og det er partikelfysikkens standardmodel m.v., der

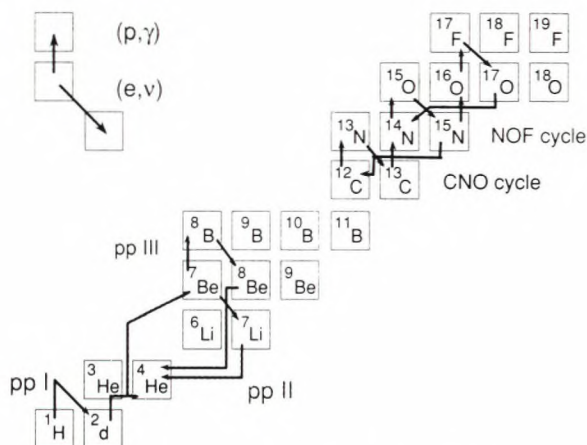
fodres ind i konkrete scenarier for universets udvikling i de tidlige faser. Og samtidig er kosmologien selv ved at blive til en rigtig, empirisk videnskab. F.eks. måler man nu systematisk på bittesmå fluktuationer i den kosmiske mikrobølgebaggrund, som altså ikke er helt så isotrop, som først antaget. Og man nærmer sig en kortlægning af rummets overordnede og mærkværdige galaksestruktur. Og man fortsætter den intense jagt, via iagttagelser og teorier, efter universets "mørke stof", det strålingsløse stof, der synes at udgøre langt størsteparten af stoffet i rummet. Osv. osv.

Hvordan er det med tilbagespillet fra astronomi, astrofysik og kosmologi? Giver de himmelske videnskaber betydningsfulde bidrag tilbage til fysikken, taget i bredere forstand? Ved sjældne lejligheder, ja, og der har været øjeblikke, hvor astronomiske data og modeller blev nøglen til gennembrud i fysikkens historie. Mest dramatisk vel da Newton fremsatte sin gravitationslov (den med afstandskvadratet) ud fra astronomiske data om planeternes bevægelse, og de deraf afledte Keplerske love. Som bekendt blev Newtons gravitationslov et fundament for udviklingen af den klassiske mekanik igennem to følgende århundreder. Og i begyndelsen af dette århundrede kom astronomiens data igen til at spille en rolle for fysikkens syn på gravitationen - og for vores syn på det fysiske rums geometri. For det var Einsteins triumf, at han med sin generelle relativitetsteori kunne gøre kvantitativt rede for Merkurs periheldrejning og for observationer af lysets afbøjning i solens stærke tyngdefelt. Det gjorde indtryk og banede vejen for en almindelig accept af den generelle relativitetsteori.

Er der udsigt til at de himmelske videnskaber, herunder astrofysikken og kosmologien, også i vor tid vil kunne levere betydningsfulde bidrag tilbage, f.eks. til partikelfysikken? Da nobelprismodtageren og partikelfysikeren Steven Weinberg for et halvt år siden besøgte København, blev han stillet det spørgsmål, men besvarede det med et definitivt nej - måske dog med plads til en enkelt undtagelse: solneutrinoerne. Jagten på dem udgør en særlig niche i vore dages fysik, med en historie som har sin egen morale.

Gennem de sidste godt 25 år har man forsøgt at måle fluxen, og nu senest også energispektret, af de neutrinoer, der udsendes ved kerneprocesser i solens centrale del. Nogle af solneutrinoerne når jordens overflade, inden de fortsætter videre gennem jordkloden og ud i verdensrummet, som rummets evige vagabonder. Tværsnittene for indfangning eller spredning af neutrinoer er godt nok små, men processerne er ikke umålelige. Det er eksperimenter, der må friste den fantasifulde, med mod på det vanskelige.

Solneutrinoerne er interessante, både set fra et astrofysisk og et partikelfysisk synspunkt. For astrofysikerne spiller solen en særlig rolle, som en slags prototype for gennemsnits-stjerner. Solens fysiske forhold skulle gerne være "i orden", så solmodellen kan tjene som pålideligt udgangspunkt for vores billede af gennemsnits-stjerner i vor egen galakse og i rummets øvrige galakser. Og solneutrinoerne er det eneste reaktionsprodukt fra de mange kerneprocesser i solens indre, der direkte kan observeres her på jorden. Øvrig viden om solens fysik stammer overvejende fra iagttagelse af overfladefænomener, ganske særligt fra studier af solens elektromagnetiske spektrum. Antallet af solneutrinoer skulle meget gerne stemme med astrofysiske forventninger, som baseres på en solidt gennemarbejdet solmodel. Og solen er enestående i den forstand, at andre stjerner er for langt væk til, at man kan måle deres, tilsvarende neutrinoflux. Fra fjerne stjerner kan vi ved sjældne lejligheder måle neutrinoer, nemlig fra supernova-eksplorationer - men det er en anden historie.



Reaktionsskema over reaktionerne mellem de lette isotoper. De diagonale pile viser reaktioner der producerer neutrinoer.

Fra et partikelfysisk synspunkt kan solneutrinoerne være interessante, fordi de udgør vores eneste tilgængelige, vedvarende og naturgivne kilde af neutrinoer. Her er der altså potentielt en mulighed for at afprøve nogle egenskaber ved elektron-neutrinoen, omend i forsøg, der kræver samspil med astrofysikerne - samspil, som har karakter af tålmodighedsprøver, for ikke at sige sejpineri, på grund af de små tværsnit. Måske, men også kun måske, kan solneutrinoerne fortælle noget om "flavour" mixing af neutrinoer, og dermed om neutrinomassen. I partikelfysikernes standardmodel antages elektron-neutrinoen at være rent "venstrehåndet" og masseløs, men denne antagelse er ikke tvingende nødvendig. Skulle der være tale om flavour mixing, behøver elektron-neutrinoen ikke at være strengt masseløs. Og derfor har i al fald enkelte partikelfysikere interesseret sig for solneutrinoerne.

Men neutrinoer er krasbørstige. Seks årtier efter Paulis

dristige hypotese om den masse- og ladningsløse fermion, der kan forklare det kontinuerte beta-spektrum, vedbliver neutrinoen at gøre knuder, uanset i hvilken eksperimentel sammenhæng den registreres. Det gælder ikke mindst solneutrino eksperimenterne.

Det var amerikaneren Raymond Davis, der skabte den første, "klassiske" solneutrino-detektor, hvis kerne var (og stadig er) en 15 m lang ståltank, fyldt med ca. 400.000 liter klorholdig rensesvæske, anbragt 1600 m under jordens overflade i en forladt guldmineskakt i South Dakota. Den opstilling blev til midt i 60'erne, men forhistorien går længere tilbage. I slutningen af 40'erne foreslog først Bruno Pontecorvo og siden Luis Alvarez at detektere neutrinoer i en indfangningsreaktion, en slags omvendt beta-process, på det stabile ^{37}Cl . Ved indfangningen omdannes klor 37 til det radioaktive ^{37}Ar , som så henfalder ved elektronindfangning. Forslaget indeholder det radiokemiske raffinement, at argon er en ædelgas, der let kan skilles kvantitativt fra kloratomerne. Idéen slog an, og Davis, der var tidlig ude, kunne i midten af 50'erne aflevere en første, primitiv rapport om detektion af solneutrinoer fra en 4000 liter tank med klorvæske, gravet 6 m ned i det sandlag, som Brookhaven laboratoriet på Long Island er opført på. Man skal i dybden for at reducere baggrunden fra kosmisk stråling. Forsøget blev beskrevet i en artikel i Physical Review, men iflg. Davis selv skete det ikke uden dybt skeptiske kommentarer fra referees. Man troede ikke rigtig på, at dette havde noget for sig. Den mand måtte vist være lidt skør, stod der mellem linierne.

Men Davis fortsatte ufortrødent, i samarbejde med teoretikeren John Bahcall, og på grundlag af nye data og nye idéer om neutrinoproduktionen i solens indre. En bemærkning fra København kom også til at spille en rolle. I 1963 holdt Bahcall nemlig et kollokvium på Niels Bohr Institutet, hvor Ben Mottelson bidrog til den videre udvikling med en kommentar om, at neutrinoindfangning til anslåede tilstande i ^{37}Ar (særlig via en såkaldt super-tilladt overgang) måske kunne bidrage betydeligt til tværsnittet for indfangning. En følgende analyse året efter, af Bahcall, viste, at indfangning af de relevante solneutrinoer (s.k. ^8B neutrinoer) til anslåede tilstande i ^{37}Ar forøger tværsnittet med ikke mindre end en faktor 17.

Opstillingen i guldminen i South Dakota endte med at få rimelige fysiske proportioner og ganske gode baggrundsbetingelser. Der registreres nemlig ca. 15 neutrinoindfangninger pr. måned, mod en baggrund fra begebenheder induceret af kosmisk stråling på ca. 4 begebenheder om året. Ikke så dårligt, når man har tiden for sig. Over en periode på tre årtier bliver det dog til nogle registrerede solneutrinoer. Så længe har man målt i guldminen, og forsøget fortsætter.

Nye eksperimenter er fulgt i kølvandet på Davis' eksperiment. En japansk måleopstilling - også i en mineskakt - indeholder en tank med rent vand. Her var formålet oprindeligt at undersøge protonens stabilitet, men opstillingen er siden modificeret til at registrere neutrinoer fra rummet, bl.a. solneutrinoer. Tanken indeholder 6000 tons vand, og neutrinoer detekteres ved spredning

på elektroner og påfølgende registrering via Cerenkov stråling. Eksperimentet giver således også mulighed for at måle neutrinoernes retningsfordeling. Yderligere to eksperimenter er kommet igang, i underjordiske laboratorier, henholdsvis i Kaukasus og i Italien. Begge steder bruger man gallium til at detektere absorption af solneutrinoer, med påfølgende registrering af radioaktivt germanium. Gallium har den fordel fremfor klor, at også ganske lavenergetiske neutrinoer kan detekteres. Hermed bliver det muligt at måle på den fundamentale fusionsreaktion i solens indre, hvor to protoner fusionerer og danner en deutron, en positron og en neutrino, den sidste med ret lav energi. Disse *pp* neutrinoer kan ikke registreres i klorforsøget.

Når man er nået til at have en omhyggeligt gennemregnet astrofysisk neutrino-produktionsmodel, der har veletablerede fysiske data i ryggen, når man i tillæg har ligeså omhyggelige beregninger af neutrino-tværsnit i detektorerne, og så dertil en række måleresultater med rimelig statistik og lav baggrund - så burde man vel kunne få et tydeligt svar, ikke sandt? Sådan er det bare ikke. Ingen af eksperimenterne har til dato registreret flere neutrinoer end forudsagt, og nogle af dem (bl.a. klorforsøget) har registreret langt færre. Men de eksisterende datasæt kan ikke - endnu da - uden videre føjes sammen til en helhed. Neutrinoerne fra solen stammer fra en række forskellige kernereaktioner, og det resulterende energispektrum er komplekst. Og detektorerne har ikke samme energitærskler, hvor de begynder at registrere neutrinoer. Analysen er derfor ikke så ligetil. Hvad angår standard-solmodellen, er friheden begrænset - modellen skal jo kunne reproducere den kendte luminositet m.fl. fysiske forhold for solen, og det levner ikke plads for de store krumspring, f.eks. hvad angår temperaturen i solens midte.

Opmærksomheden omkring solneutrinoerne er nu ganske intens, men meningerne er delte, og diskussionen ofte ganske skarp.

Der er dem, der affærdiger sagen med en henvisning til utilstrækkelig statistik i målingerne: vent et par årtier til man har mer statistik, så vil det måske vise sig, at alt falder på plads, uden ny antagelser.

Andre føler sig overbevist om, at de allerede eksisterende data rejser spørgsmål, som ikke kan affærdiges. I så fald må man spørge, om løsningen på gåden ligger i den astrofysisk/kernefysiske del, eller i neutrinfysikken.

Der har gennem årene været fostret et utal af mere eller mindre fantasifulde idéer i den astrofysiske afdeling, til forklaring af den lave neutrinoflux. Men solmodeller, der afviger fra standardmodellen, støder på mange vanskeligheder. Man har brug for en model, der reducerer produktionen i solen af den radioaktive atomkerne ^8B , for det er neutrinoer fra henfaldet af denne kerne, der særlig synes at "mangle" i Davis' eksperiment. Men ^8B lader sig ikke sådan trylle væk.

På neutrinosiden er der en vis interesse for muligheden af oscillationer af neutrinoer mellem forskellige flavour-

tilstande. Mixing af den art findes ikke i partikelfysikkens elektro-svage standardmodel, men fænomenet har været foreslået i en model, hvor oscillationer induceres på neutrinoernes vej ud gennem solen, ved vekselvirkning med solens store stofmængde. Mixing-modellen indeholder justerbare parametre, og spørgsmålet er, om man med rimelige parameterværdier kan opnå en passende blandingstilstand af neutrinoerne, når de rammer detektoren. Blandingen skal indeholde et mere eller mindre ligeligt mix af elektron-, my- og tau-neutrinoer, hvoraf kun de førstnævnte registreres. Dermed vil det lave tælleantal af elektron-neutrinoer kunne forklares - men er mixing-modellen så iøvrigt acceptabel?

Måske tager jeg fejl, men jeg har ikke kunnet spore den store interesse hos partikelfysikerne for solneutrino-gåden. Er en smule flavour mixing for trivielt, når opmærksomheden mest er fæstnet på de store, forenede universalteorier for alting? Teoretisk partikelfysik har unægtelig bevæget sig op i de høje luftlag, hvor forbindelsen til eksperimentet og interessen for det kan være lidt svær at finde. Med mindre eksperimentalfysikerne da kan servere en Higgs-boson eller et tilsvarende, sensationelt fund.

Som det ser ud idag, er det vel ikke sandsynligt, at solneutrinoerne indeholder nøglen til den slags store, "fundamentale" problemer i moderne fysik. Men hvordan definerer man, hvad der er fundamental, smuk eller bare sjov fysik? Solneutrinoerne indeholder raffineret eksperimentalt teknik, konkrete teoretiske forudsigelser, og to åbne spørgsmål af en vis, fysisk interesse: kan vi tro på vores model af solen, og ved vi nok om neutrinoen? Det er vel et par årtiers fortsatte forsøg værd at få et bedre svar på de to spørgsmål.

Mon Raymond Davis for mange år siden forudså, at hans idé og hans forsøgsopstilling i guldminen skulle udvikle sig til en hel emnekræds, til et tilbagevendende stridspunkt på store, internationale fysikerkongresser? Man får næppe nobelprisen for den slags pionerindsatser, men egentlig synes jeg, at Davis fortjener noget i den retning. Han har virkelig skabt noget, en celeber gåde i moderne fysik, hvis løsning vi ikke har set enden på endnu.

Læs mere om solneutrinoer i *Neutrino Astrophysics*, af John N. Bahcall, Cambridge University Press, 1993.



Ove Nathan