Fysikkens fremtid?

G. T. Einevoll, Norges landbrukshøgskole, P. B. Lilje, Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo, og C. A. Lütken, Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

Fremtidens historikere vil trolig fremheve oppdagelsen av de grunnleggende naturlover som vår tids største kulturelle begivenhet. Men dette betyr ikke at fysikkens gullalder er over. Nye uoppdagede lover venter i alle hjørner av naturen, og fysikkens begreper og metoder sprer seg i dag utover hele vitenskapen.

Analyse

For hundre år siden visste vi ikke hva himmelen var. For hundre år siden visste vi ikke hva atomer var – vi visste ikke en gang om de eksisterte. Og for hundre år siden visste vi slett ikke hva liv var.

Det tok hundre år å plukke verden fra hverandre for å finne ut hva den 'er laget av'. Det overraskende er ikke hvor vanskelig det var, men hvor lett det var. Det tok bare hundre år!

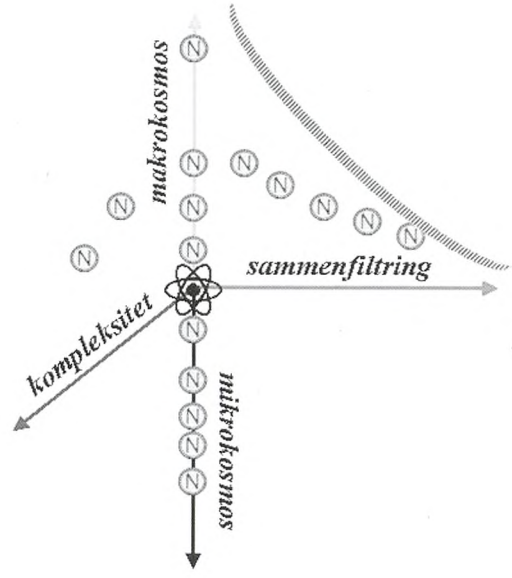
Naturvitenskapens 'analytiske' fase er selvfølge lig ikke over: Vi kommer til å fortsette innover og utover i 'løken' av strukturer, og også i overskuelig fremtid vil det være uimotståelig spennende å utforske nye lag. Men før eller siden vil vi ikke ha råd til å fortsette reisen innover i mikro- og utover i makrokosmos, og den 'analytiske' fasen vil ebbe ut. Det kan til og med tenkes at dette vil skje før Norsk Fysisk Selskap fyller 100 år, i 2053. Er det da slutt på fysikken?

Antagelig har vi allerede oppdaget de fleste mikroskopiske 'naturlover' som gjør at verden har de egenskaper vi kan utforske eksperimentelt. Hva skal vi da med fysikere?

Heldigvis kan ting være 'mer' enn bare summen av sine enkelte bestanddeler. Selv de kjedeligste byggestener kan fremvise forbløffende kollektiv makroskopisk oppførsel. Det venter nye 'naturlover' i alle hjørner av naturen. Denne 'kompleksitetsdimensjonen' av fysikken er vi bare så vidt kommet i gang med å utforske.

I kvantemekanikken kan det også være omvendt: Helheten kan være 'mindre' enn summen av sine bestanddeler. En kvantemekanisk grunntilstand kan glemme sin opprinnelse og fremstå som noe meget enklere og fullstendig annerledes enn sine byggestener, som sies å være 'sammenfiltret'. Denne genuint kvantemekaniske dimensjonen av fysikken er vi bare såvidt kommet i gang med å utforske.

La oss kalle disse nye kollektive fenomenene 'syntetiske', enten de er klassiske eller kvantemekaniske. Vi har nå begynt å sette byggeklossene sammen igjen på nye måter, og vi vil kunne skape myriader av nye systemer som naturen selv aldri har frembragt. Vi kan syntetisere nye 'designer–univers' med egenskaper som vi selv kan velge. I motsetning til fysikkens 'analytiske' fase som nødvendigvis vil ta slutt når alle relevante bestanddeler er plukket frem, er den syntetiske fasen verken begrenset av ressursmangler eller av nye skalpeller. I prinsippet er kombinatorikken endelig, men for alle praktiske formål har den ikke noen begrensning i det hele tatt når vi har 10^{23} (Avogadros tall) byggeklosser. Så hvis vi skal driste oss til en forutsigelse om fysikkens fremtid, og det skal vi jo for at dette skal bli underholdende, så er den at mens fysikkens første årtusen eller tre var analytiske – så blir de neste syntetiske og kun begrenset av manglende fantasi!



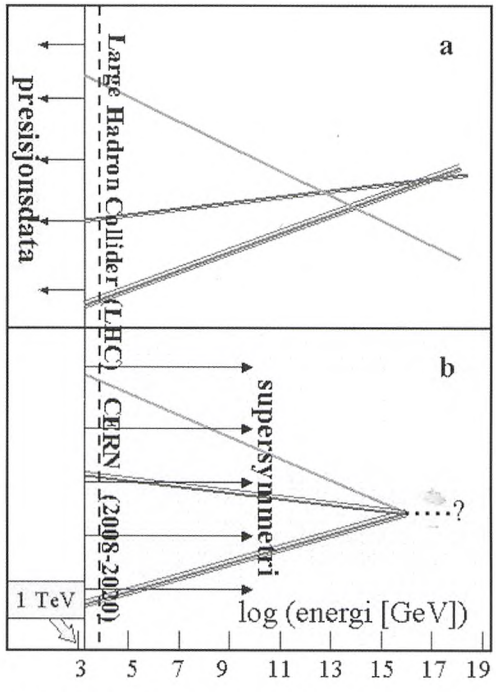
Figur 1. Heuristisk diagram av fysikkens 'handlingsrom', utspent av 'skala'- og 'struktur'- dimensjonene.

Et forsøk på en grafisk representasjon av disse 'analytiske' og 'syntetiske' dimensjonene av naturvitenskapen er vist i figur 1. Den akselererende teknologiske utvikling driver forsknings–'fronten' foran seg og etterlater nobelpriser i sitt kjølvann. Opp mot årtusenskiftet har vi sett at stadig flere nobelpriser er blitt gitt for oppdagelser utenfor den rent reduksjonistiske dimensjonen, som f.eks. kvantekondensater (superledere, kvante–Hall–effekter, Bose–Einstein–kondensater), informasjons–teknologi, astrofysikk og komplekse systemer.

De begrepsrammene vi her opererer med er så romslige at det meste får plass. De burde derfor ikke

være særlig kontroversielle. La oss være litt mer provoserende ved å forsøke å konkretisere bildet. Men dette blir nesten per definisjon en slags statusrapport, i beste fall en lineær ekstrapolasjon av dagens idé–verden, en oppramsing av forutsigbare applikasjoner – et bokholderi av 'teknologipotensialet'. Dette er det minst opphissende ved fysikk, men det er alt vi kan gjøre.

Naturen vil utvilsomt fortsette å overrumple oss med fenomener som vil kreve helt nye idéer. Det er i disse overraskelsene fysikkens virkelige verdi og fremtid ligger. Det er ingen som kan spå hvilket spor fysikken vil følge, men dersom vi ikke hopper av grunnforskningstoget vil reisen utvilsomt bli spennende, meget mer spennende enn våre fantasiløse ekstrapolasjoner.



Figur 2. Finnes det en urkraft? a) Ikke hvis vi bare har de standardpartiklene som er funnet hittil. b) Sannsynligvis hvis de alle har superpartnere. I strengteori unifiseres også gravitasjon med de andre kreftene.

Mikrokosmos

Mikrofysikken er ikke ferdig i overskuelig fremtid, selv om 'eksperimentene' blir så dyre at kun naturen har råd til å utføre dem. Vi vet at verden styres av tre fundamentale krefter ned til de minste bestanddeler og de største avstander vi kan utforske eksperimentelt, men vi vet også at disse teoriene har sin begrensning. Kvanteprosesser ved meget korte avstander, eller i meget sterke gravitasjonsfelt, lar seg ikke håndtere med vanlig teori. Det som for oss fortoner seg som ekstreme situasjoner krever en ny 'kvantegeometri'. Spesielt interessante eksempler er Big Bang (Skapelsen), og litt mer jordnært, det enorme sorte hullet i sentrum av Melkeveien som sluker stjerner og kanskje til slutt vil sluke hele galaksen (Purgatorium). Kan hende er universet pepret med sorte hull som i følge klassisk teori ikke kan eksistere da de er ufysiske 'flenger' ('singulariteter') i tidrommet?

I følge relativitetsteorien er normale tidrom glatte, krumme og elastiske: geometrien er 'Riemannsk'. I to dimensjoner kan vi tenke oss gummiflak med tunge stjerner oppå som lager dype groper og tvinger satellitter innover. Sorte hull er så tunge og 'spisse' at de lager 'rifter' i rommet – og hele bildet 'revner'. Dette er utålelig, så de sorte hullene må være kikkhull inn til en ny fysikk – en kvantegeometri som 'lapper sammen' slike skader på Riemannrommet, og derfor sprenger grensene for Einsteins forestillinger. Målet med strengteori er å kurere disse problemene med den hundre år gamle gravitasjonsteorien. Det har langt på vei lykkes. I tillegg viser det seg at strengteori også – ikke helt tilfeldig må vi tro – kan kaste nytt lys over de andre kreftene, såkalt Yang-Mills-teori som også er ren geometri – det som i matematikk kalles vektorbunter og knipper.

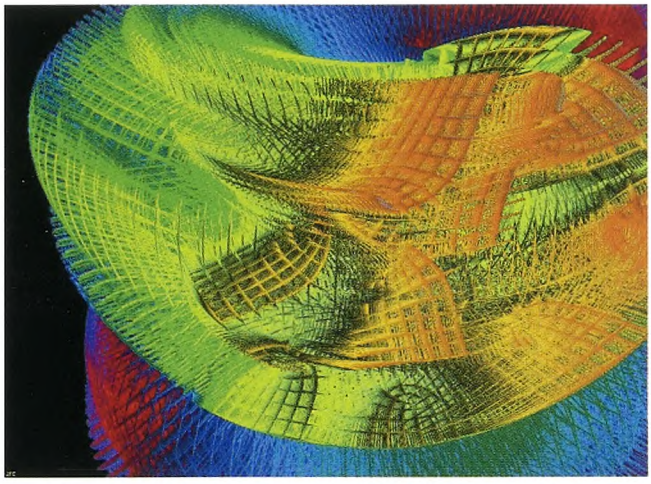
Pr. i dag har vi dessverre ingen direkte bekreftelse av kvantegeometrien, men vi har et forbløffende faktum fra partikkelfysikken som peker i riktig retning. Styrken på de elektrosvake og sterke kreftene som virker mellom kvarker og elektroner, er bestemt av koblingskonstantene, som i en kvanteteori slett ikke er konstanter: de er konstante i tid (så vidt vi vet), men de avhenger av energien til partiklene som 'kolliderer' (vekselvirker) – de 'løper'. Fra pre–LEP–eksperimentene så det ut til at koblingene i Standardmodellen faktisk løper sammen (blir like sterke) ved en meget høy energi, unifiseringsenergien (ca. 10^{16} GeV), som ikke er så langt unna det teoretiske Nirvana, Planck energien (ca. 10^{19} GeV) hvor gravitasjonen er like sterk som kjernekreftene. Post–LEP vet vi at dette ikke er tilfellet (se figur 2a). Men hvis verden er supersymmetrisk, med tilhørende justeringer av Standardmodellen ved høye energier, klaffer det likevel (se figur 2b)!

Supersymmetri kan være innen eksperimentell rekkevidde på LHC, monstermaskinen som nå bygges på CERN. Dette er en symmetri som unifiserer materie og krefter, en syntese av kantianske kategorier som vil rangere som en av de største oppdagelser noensinne i fysikk. Og så er poenget at 'klumper' (f.eks. 'strenger') slett ikke liker å la seg kvantisere, med mindre verden er supersymmetrisk ved tilstrekkelig høye energier.

I mikrofysikken er det bygget inn en 'syntetisering' som har vært retningsgivende i mange år. Supersymmetri er den mest spektakulære versjonen av dette programmet som startet med Maxwells unifisering av elektrisitet og magnetisme, men det er ikke den eneste. 'Grand Unified Theories (GUTs)' finnes i mange varianter, men alle har til felles at det finnes en stor energiskala som signaliserer mye ny fysikk utover Standardmodellen, i tillegg til Higgs–sektoren som LHC vil oppdage og utforske de neste femten årene.

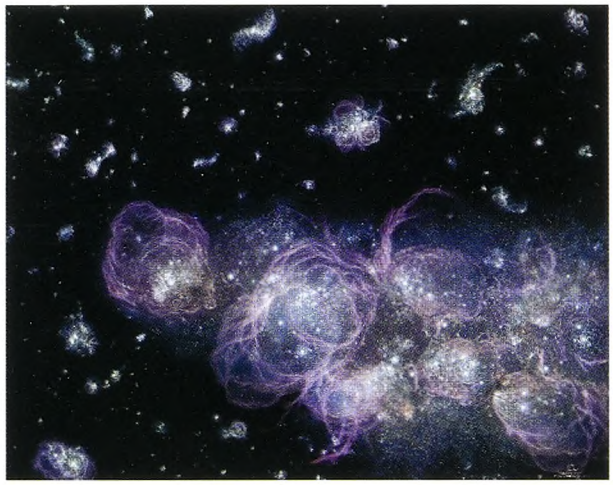
Vi har nylig fått indikasjoner på at slike over-

raskelser ligger på lur. Nøytrinoeksperimenter over hele verden viser at nøytrinoene har meget små men endelige masser, og at to av dem er meget sterkt sammenfiltret. Dette er fotavtrykket av ny og uventet fysikk utover Standardmodellen. Det blir en spennende oppgave å følge disse sporene opp til unifiseringsskalaen hvor naturen nok en gang vil presentere seg i en ny drakt. Etter tretten milliarder år har universet frosset fast i en uryddig og disharmonisk form som vil fordampe ved unifiseringsskalaen. Naturlovene vil der igjen fremstå med sin utilslørte symmetri slik som de ble født inn i verden ved Skapelsen.



Figur 3. Et skjult univers? Calabi-Yau-rom spiller en sentral rolle i moderne matematikk og 10-dimensjonale superstrengteorier
(bilde fra www.lactamme.polytechnique.fr).

At nye teorier krever ny matematikk og ny geometri er ikke noe nytt. Klassisk mekanikk opererer med flate, passive og upåvirkelige Euklidske rom. Relativistisk mekanikk opererer med krumme, plastiske Riemannske rom. Kvantemekanikken opererer med Hilbertrom, mens relativistisk kvanteteori for 'klumper' (f.eks. 'strenger') opererer med den nye og ufullendte kvantegeometrien.



Figur 4. Stjernefødsel (maleri av A. Schaller fra www.esa.int).

Historisk har store omveltninger i fysikk vært ledsaget av matematiske gjennombrudd. Akkurat på dette punktet svikter i hvert fall ikke strengteorien: Den er en syntese av mikro– og makrofysikk (partikkel– og gravitasjonsteori) med rykende fersk matematikk. På enkelte områder har fysikere til og med foregrepet (forgrepet seg på?) matematikken.

En uventet bonus er at kvantegeometrien har kastet nytt lys over Gaugeteoriene som beskriver svake og sterke kjernekrefter, og kanskje også mange av de mer interessante faststoffsystemene som vi i dag har begynt å pirke på. Men det regnes som ett av de syv store uløste matematiske problemer å forstå disse teoriene, så her ligger det enorme utfordringer for kommende generasjoner.

Figur 5. Planetinkubator (bilde fra www.esa.int).

Vi både kan og bør fortsette utforskningen av den 'reduksjonistiske' eller 'analytiske' dimensjonen i fysikken, selv om den etter hvert blir mindre terrestial enn vi kunne ha ønsket. Det vil også de andre 'syntetiske' dimensjonene, som antagelig vil være mest relevante for direkte teknologiske anvendelser, nyte godt av.

Makrokosmos

Vi skal forsøke å ekstrapolere fremover i tid noen trender i dagens astronomi og astrofysikk. Vi vil konsentrere oss om kosmologi, et felt som skulle ha spesiell interesse for alle fysikere, men vi skal til slutt også se kort på et par andre temaer.

Kosmologien har gjennomgått en rivende utvikling fra midten av 1960–årene til i dag. Som vitenskap startet kosmologien med et meget tynt observasjonelt grunnlag, først og fremst Hubbles observasjoner av galaksenes rødforskyvning og dessuten noen meget generelle observasjoner som at det blir mørkt om nat-

ten. Dette hindret ikke en stor mengde teoretiske arbeider som var basert på meget grove antagelser, antagelser som merkelig nok ofte har vist seg å være riktige! Hele det teoretiske grunnlaget for homogene og isotrope (og andre) universmodeller ble lagt allerede i 1920–årene. Fra 1960–årene kom et bedre observasjonelt grunnlag med oppdagelsen av kvasarene (og at det er mange flere av dem ved høy rødforskyvning enn i dag) og overraskende resultater ved tellingen av antall radiogalakser som funksjon av fluks. Begge pekte klart mot et univers som ikke er uforanderlig, men tvert i mot temmelig forskjellig ved en rødforskyvning omkring 1 til 2 fra hvordan universet er i dag. Dette var oppdagelser som pekte fremover mot den enorme utviklingen den astrofysiske kosmologien skulle gjøre og som klart motbeviste Steady–State–modellen for dem som hadde et åpent sinn. Enda viktigere var oppdagelsen av den kosmiske mikrobølgebakgrunnsstrålingen CMB = Cosmic Microwave Background) i 1965. Sammen med de tidligere resultatene som viste et univers i utvikling, ble CMB grunnlaget som overbeviste det overveldende flertall av forskere om at Big–Bang–modellen i hovedtrekk var korrekt.

Fra 1970–årene økte antallet kosmologer hurtig, og disse ble splittet i to grupper: 'reduksjonister' eller 'fysiker–kosmologer', med bakgrunn som høyenergifysikere (enkelte som relativister) som har arbeidet ved fysikkinstitutter og som har konsentrert seg om det tidlige univers; og 'syntetikere' eller 'astrofysiker–kosmologer', med bakgrunn som astrofysikere/astronomer som har arbeidet med utvikling av universets strukturer, og som stort sett har arbeidet ved astronomi/astrofysikkinstitutter. Selv om de snakker hvert sitt språk, er samarbeidet mellom disse gruppene blitt meget viktig, spesielt de siste 10 årene. Det er klart at initialbetingelsene for modellene for strukturutvikling i det tidlige univers må basere seg på egenskaper ved fundamental fysikk ved høye energier (altså mikrokosmos). Observasjonene av CMB–fluktuasjoner etter 1990, sammen med andre astronomiske observasjoner (bl.a. supernovaer av type Ia ved høy rødforskyvning) har også vist at vi nå er i den epoken der disse effektene er blitt observerbare.

Fysiker–kosmologene har først og fremst interessert seg for det tidlige univers. De ville anvende kjent, og etter hvert mer spekulativ høyenergifysikk, for å si hvordan egenskapene var i universet lenge før epoken for dannelse av atomkjerner, det vil si da universets alder var mye mindre enn ett sekund. Av spesiell interesse er å se om forskjellige fysiske modeller gir opphav til forskjeller i forholdene i universet som gir observerbare konsekvenser også i dag. Viktige spørsmål som er tatt opp av fysiker–kosmologene har vært: Hva skyldes forskjellen mellom antall partikler og antipartikler (grunnen til at universet ikke bare består av stråling)? Har det vært faseoverganger i det tidlige univers, og vil disse ha kunnet forårsake topologiske defekter i tidrommet? En mindre gruppe fysikere som har arbeidet med kvantegravitasjon og kvantekosmologi, har forsøkt å nærme seg Plancktiden. En av de mest interessante idéene er kommet fra fysiker–kosmologene, idéen om en inflasjonsfase i det meget tidlige univers.

Det har foregått en minst like stor, om ikke større, utvikling i den astrofysiske kosmologien. Her er målet å forstå utviklingen av strukturer i universet. Hvordan har de strukturene vi ser i dag, galakser, galaksehoper og superhoper, og deres fordeling, oppstått og utviklet seg? Mens den 'høyenergifysiske' kosmologien først og fremst utnyttet den aller nyeste og spekulative fysikken temmelig rendyrket, er astrofysikerens metode ofte komplekse anvendelser av kjent kunnskap fra forskjellige deler av fysikken (relativitetsteori, hydrodynamikk, kjernefysikk, strålingsdynamikk etc). De teoretiske arbeidene i den astrofysiske kosmologien er tett knyttet til observasjonell kosmologi, til studiet av galakser og galaksehoper, kvasarer etc., og til hvordan de er fordelt i tid og rom. Observasjonsmaterialet økte kraftig i tiden fra begynnelsen av 1970–årene, blant annet på grunn av nye observasjonsteknikker.

Fra å være en vitenskap meget fattig på data, er kosmologi nå blitt en vitenskap meget rik på data. Ved de nye CMB–eksperimentene (som nærmer seg eksperimentene ved CERN i antall forskere, og i teknisk og organisasjonsmessig kompleksitet) er den store utfordringen hvordan man skal analysere de enorme datamengdene. Samarbeid mellom astrofysikere, partikkelfysikere, statistikere, matematikere og informatikere viser seg svært fruktbart! Vi ser at de to 'hovedtypene' av kosmologer i dag arbeider tett sammen, spesielt på CMB–eksperimentene.

Fritt etter Martin Rees er i dag vår forståelse av universet basert på følgende postulater, der graden av sikkerhet er i synkende rekkefølge – til og med postulat 3 skal det svært mye til for å rokke på mens de siste er langt mer usikre:

1. Universet utvider seg
2. fra et varmt og tett Big Bang
3. hvor hydrogen og helium ble til.
4. Meget tidlig var det en inflasjonsfase
5. som forårsaket et tilnærmet flatt univers i dag.
6. Opphavet til strukturer er gaussiske irregulariteter
7. som ble til på grunn av kvantefluktuasjoner under inflasjonsfasen.
8. Strukturenes dynamikk er dominert av kald mørk ikke–baryonisk materie,
9. men det meste av energitettheten i universet skyldes 'mørk energi' med sterkt negativt trykk.

Hvis alt går slik det ser ut nå, vil vi om ca. 10 år være i den situasjon at vi har bekreftet disse postulatene, og vi har med stor nøyaktighet bestemt de parametrene som er viktige for disse, slike som universets utvidelseshastighet (Hubble–parameteren), tettheten av

baryonisk (ordinær) materie, tettheten av mørk ikke–baryonisk materie, tettheten av 'mørk energi', parametrene som fastsetter hvordan kvantefluktuasjonene under inflasjonsfasen var etc. Hva så? Vil da det meste være løst og det som gjenstår være å rydde opp i noen detaljer.

For det første kan det hende at dette scenariet er galt. Kanskje vil vi meget snart vise at ett eller flere av postulatene over er feil. I så fall står vi overfor en situasjon der vi ikke kan spå annet om fremtiden enn at den vil bli spennende! Men selv om det traurige skulle skje at postulatene bekreftes og parameterene bestemmes med stor presisjon og nøyaktighet, vil vi allikevel ha spennende tider foran oss. Det vi vil ha fastsatt er bare grunnlaget som vi kan arbeide videre med. Enkelte hevder at skillet mellom fysiker–kosmologene (reduksjonistene) og astrofysiker–kosmologene (syntetikerene) igjen vil bli større. Det er tvilsomt, for gruppene er svært avhengige av hverandres resultater, men begge gruppene vil i alle fall stå overfor meget store utfordringer.

Astrofysiker–kosmologene har mye arbeid foran seg for å kunne forstå skikkelig hvordan strukturene i universet har utviklet seg fra det enkle universet vi hadde ved rekombinasjonene, 300 000 år etter Big Bang, til galaksene, stjernene og planetene vi ser i dag. Hvordan og når ble de første stjernene til? Hvordan og når ble materien reionisert av disse første stjernene? Hvordan og når ble de første sorte hullene dannet? Var disse også viktige for å reionisere materien? Og hvor mye betydde alt dette i dannelsen av galaksene? I løpet av de neste 50 år vil vi, ved syntetisk bruk av kjent fysikk, og meget intensiv bruk av regneanlegg til bl.a. numeriske simuleringer, komme meget langt i å besvare disse spørsmålene.

Fysiker-kosmologene vil kanskje i enda større grad kaste seg over det 'ultratidlige' univers og fundamentalfysikk, eksotiske ting som universet før inflasjonsfasen, braner, parallelle universer (multi vers) etc. Noen spørsmål man vil forsøke å besvare er:

- Hva er egentlig den mørke materien? En vei kan være å beregne direkte fra fundamental teori massene og virkningstverrsnittene for de forskjellige supersymmetriske partikler.
- Hva er den fullstendige forklaring på asymmetrien mellom partikler og antipartikler?
- Hva er den detaljerte fysikken bak inflasjonsfasen?
- Hva er den fundamentale forklaringen på den 'mørke energien'?

De observasjonsmessige konsekvensene, og mulighetene for å verifisere teoriene til fundamentalfysiker–kosmologene, vil måtte finnes hos astrofysiker–kosmologene. Samarbeidet er helt vesentlig, og sammen vil de nok i løpet av de neste 50 år i hvert fall ha forstått den mørke materiens, og kanskje også den mørke energiens, natur.

Et annet spennende forskningsfelt i astronomien er dannelsen av stjerner, og spesielt stjerner med planetsystemer. Denne forskningen fikk et stort puff fremover i 1995 med den første sikre deteksjon av en planet i bane omkring en vanlig stjerne. Fra 1995 til i dag er det oppdaget over 100 planeter i bane omkring andre stjerner, og et stort antall nye observasjonsmetoder er utviklet. Størst interesse knytter det seg til den europeiske romorganisasjonen ESAs prosjekt Darwin. En gang etter 2015 vil en flotilje av seks frittflyvende satellitter bruke interferometri til å studere 1000 av de nærmeste stjernene. Denne teknikken gjør det mulig å 'fjerne' lyset fra stjernene, som er omtrent en milliard ganger kraftigere enn lyset fra planetene, slik at man direkte vil kunne observere planeter som Venus, Jorden og Mars ut til en avstand på over 30 lysår. Ikke bare vil man kunne se dem, men man vil også kunne ta spektra av atmosfærene deres, spektra som ville være så gode at man kan detektere vann og oksygen. Med Darwin ville en tenkt observatør 30 lysår unna kunne si at den tredje planeten omkring Solen har tydelige tegn på liv! Hvis Darwin oppdager forholdsvis sikre tegn på liv på planeter omkring andre stjerner, vil det bli en av de største oppdagelsene i de neste 50 år. Skal vi bli litt mer spekulative, må vi også ta i betraktning at mulighetene for å motta signaler fra eventuelt intelligent liv utenfor solsystemet vil øke kraftig de neste 50 årene. Kanskje vi får kontakt?

Det siste tiåret har vi innsett at vår plass i solsystemet er mer utsatt enn vi før var klar over. Store meteoritter, asteroider og kometkjerner har større sannsynlighet enn vi før trodde for å treffe Jorden og forårsake store katastrofer, kanskje så store at de kan utslette menneskeheten. Så det er jo ikke sikkert vi kommer til å over leve de neste 50 år! Men vissheten om denne fare har også satt i gang en rekke prosjekter for å kartlegge truslene mer detaljert, og man regner med at over halvparten av alle farlige asteroider alt er kjent. De neste 50 år vil resten bli kartlagt, og man får dermed for første gang muligheten til å gjøre noe med de farene som truer utenfra slik at vi ikke ender opp som dinosaurene.

Kompleksitet

Mange av fysikkens suksesser i det 20. århundret var en konsekvens av en reduksjonistisk arbeidsdoktrine: avgrense, forenkle og måle! Atomets hemmeligheter ble, for eksempel, avdekket på denne måten. Men vi stoppet ikke der. Også sammensatte systemer som metaller, halvledere, gasser og plasma er nå godt forstått, og teoriene er solid forankret i den underliggende atomteorien.

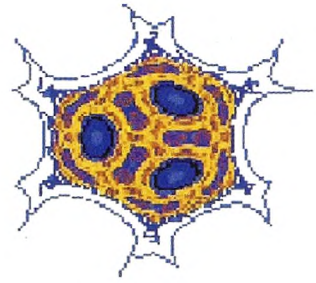
Men naturen rundt oss består av mer kompliserte ting enn som så. De fleste vil kanskje intuitivt si seg enige i at snøfnugg med sine individuelle, unike grenstrukturer, løvetann eller marihøner er mer komplekse enn en gassboks. Men hvorfor? Fra statistisk fysikk har vi lært at en gass med et makroskopisk

antall gassmolekyler (av størrelsesorden 10^{23}) har et uhorvelig stort antall ulike mikrotilstander. I termisk likevekt svarer imidlertid de aller, aller fleste av disse mikrotilstandene til en og samme makrotilstand, den som er beskrevet av den ideelle gasslov. Så lenge vi ikke er interessert i hvor ett bestemt gassmolekyl er, gir den makroskopiske gassloven alt vi har lyst til å vite.

Figur 6. Livet er kodet i DNA.

Komplekse systemer kan defineres som systemer med et stort antall ulike makrotilstander. De forgrenede iskrystallene med heksagonal symmetri som vi kaller snøfnugg, er alle litt forskjellige i formen, dvs. de har alle sin unike makrotilstand og kan kalles komplekse etter denne definisjonen. Kepler spekulerte allerede på 1600-tallet på hvordan et sjelløst objekt som et snøfnugg kunne ha en slik vakker symmetrisk form. I dag vet vi at snøfnugg fødes som ørsmå iskrystaller i en underkjølt blanding av vanndamp og luft, og at den iboende heksagonale krystallsymmetrien til is resulterer i den påfølgende morfologiske ustabiliteten som gir seks nesten identiske armer. Den videre veksten bestemmes av den omgivende luftfuktighet og temperatur, og disse parametrene varierer lite på den typiske lengdeskalaen til et snøfnugg (1 cm). De seks armene vil derfor utvikle seg omtrent likt. Men den detaljerte formen på disse armene vil avhenge av reiseruta gjennom en turbulent atmosfære før de treffer jorden. Siden to turbulente reiseruter aldri vil være helt like, vil alle snøfnugg være litt forskjellige.

Et kjennetegn ved komplekse systemer er at de ved påtrykk drives bort fra den ofte kjedelige likevektstilstanden, dvs. at likevektstilstanden blir ustabil. For snøfnuggene er påtrykket underkjølingen av vanndampen. I et annet tilsynelatende beslektet problem som sprekkvekst, enten det er i metaller eller i jordskjelvsoner, er påtrykket ytre mekaniske krefter. Problemet er tilsynelatende beslektet fordi det også her opptrer fingerlignende utvekster med sidegrener når sprekkene åpner seg. Men nærmere undersøkelse har vist at likheten kanskje bare er overflatisk, ustabiliteten som driver sprekkveksten synes å være helt annerledes enn i snøfnuggvekst. I det hele tatt er det høyst usikkert om en vil kunne finne et lite antall generelle prinsipper som vil kunne beskrive komplekse systemer. Den makroskopiske oppførselen ser ut til å avhenge for mye av de spesifikke detaljene i hvert enkelt system til at vi kan gruppere dem i et lite antall universalitetsklasser.



Figur 7. En kunstig (matematisk) celle. Kan vi lage liv? (bilde fra www.calresco.org)

Et annet trekk ved fysikken som har hjulpet oss mye, er såkalt skalaseparasjon. I faststoff-fysikken trenger en stort sett ikke bekymre seg om atomkjernene; de opererer på en annen skala (energiskala) og kan ses på som uforanderlige klinkekuler. Tilsvarende trenger en ikke bekymre seg for elektron–fordelingen i gassmolekylene når en beskriver oppdriften til luftskip. I komplekse systemer er det i mindre grad en slik åpenbar skalaseparasjon. Dette eksemplifiseres kanskje best ut fra den store og kanskje mest spennende klassen av komplekse systemer: den biologiske. Løvetann, marihøner og andre planter og dyr er åpenbart komplekse ved at de har et stort antall ulike maktrotilstander. Signaturen for alle biologiske systemer er DNA-molekylet, bæreren av arvestoffet. Molekylære, og derved mikroskopiske, endringer i DNA-molekylet kan føre til store makroskopiske endringer som annen øyenfarge eller alvorlig sykdom, dvs. de mikroskopiske og makroskopiske nivåene er sterkt koblet.

Biologien tiltrekker seg i disse dager et stort antall forskere fra de kvantitative fagene, blant annet fysikk. Av de store spørsmål man arbeider med er

- hvordan liv oppstod,
- hvordan et DNA-molekylkan kode for hvordan et dyr eller en plante ser ut og funksjonerer, og –
- hvordan man tenker.

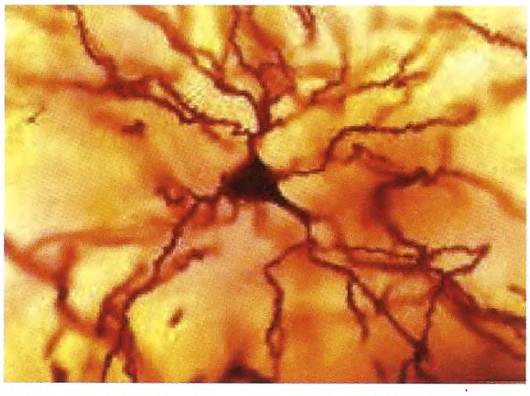
Det siste spørsmålet om funksjonen til hjernen, kanskje det mest kompliserte system vi kjenner i universet, er forunderlig nok det temaet hvor fysikkens metoder så langt har hatt størst suksess.

En matematisk modell for signalbehandlings egenskapene til en enkelt nervecelle er i dag godt etablert.

Modellen er basert på en elektrisk ekvivalenskrets av cellemembranens elektriske egenskaper, og ser nesten kjedelig ut. 'Livet' kommer kun inn i modellen ved at ionepumper, som krever kjemisk energi i form av ATP, setter opp ionekonsentrasjoner over cellemembranen som igjen driver nervecellekretsen. Den store utfordringen i dag er å forstå hvordan mentale funksjoner kan oppstå i et nettverk av nerveceller. Langt borte i horisonten kan vi også skimte spørsmålet om hvordan den subjektive oppfattelsen av bevissthet oppstår, men dit er det langt.

Hjernen er designet mer omtrentlig enn datamaskiner. I en datamaskin er det elektroniske kretsdiagrammet spesifisert i detalj av konstruktøren. I biologien er det annerledes. Et menneske har omtrent 10^{11} nerveceller, og nervecellene har omtrent 10^{14} koblinger seg i mellom.

En tabellarisk beskrivelse av kretsdiagrammet i nervesystemet ville kreve mer enn 10^{15} bits. Men menneskets arvestoff inneholder mindre en 10^{10} bits. Så DNA-molekylene kan ikke inneholde en detaljert beskrivelse av hver enkelt kobling. I stedet må de gi en mer omtrentlig arbeidsplan for hvordan hjernen skal lages. Dette gjenspeiles i at to hjerner aldri er helt like. På den annen side avhenger ikke funksjonaliteten til hjernen av at alle nerveceller fungerer perfekt. De fleste av oss er i stand til å klø oss i hodet, men nervecellekretsene i hjernene våre som sørger for dette er ikke identiske.



Figur 8. Fotografi av en nervecelle. Sjelen bor i nervesystemet, og fysikk kan bidra til å forstå boligen. Men hva er forholdet mellom ånd og materie?

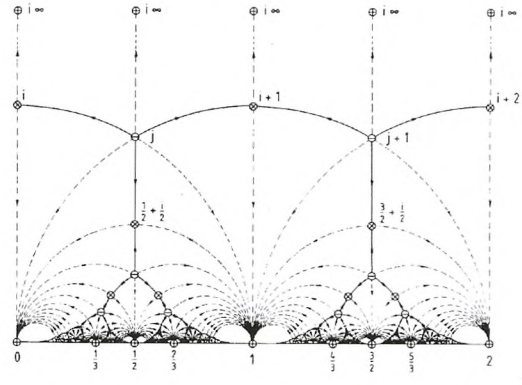
Komplekse systemer vil ha mange interessante spørsmål å by på for fysikere som er interessert. Men de som håper på å slippe å sette seg inn i systemdetaljene og kun jobbe med overordnede prinsipper, vil kanskje bli skuffet. Det spørs om vår tidligere suksess med å beskrive usedvanlig mye natur ut fra et lite antall grunnleggende prinsipper vil kunne overføres. For komplekse systemer må en trolig i større grad sette seg inn i detaljene for hvert enkelt problem. Dette blir mer arbeid selvfølgelig; men må man, så må man.

Men et enda mer grunnleggende spørsmål som også kan appellere til 'prinsipprytterne' er hvorfor komplekse system oppstår i det hele tatt. Etter Big Bang oppstod etter hvert galakser, solsystemer, vår egen jord og til slutt liv. Hvorfor er ikke jorden bare en kjedelig samling av atomer, men i stedet et mangfoldig sted fylt med spennende komplekse systemer langt utenfor den kjedelige likevekten?

Sammenfiltring

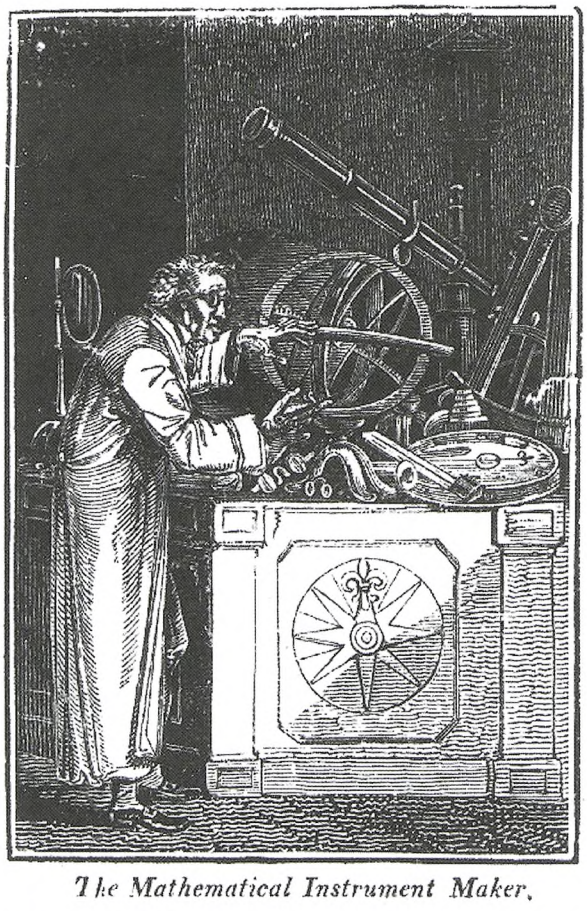
Kvantemekanikken er kronjuvelen i fysikernes skaperverk, og trolig det mest subtile vitenskapen har produsert. Likevel har teorien hatt stor teknologisk betydning, eksemplifisert ved den pågående data- og kommunikasjonsrevolusjonen. Dagens elektroniske 'mirakler' er trolig kun forløpere for en erkjennelsesmessig og teknologisk revolusjon som bare såvidt har begynt. Vi har ennå ikke klart å utnytte potensialet i oppdagelsen av at verden er *sammenfiltret*. Det er en mannsalder siden Schrödinger innså at 'sammenfiltringen' ('verschränkung', 'entanglement') av tilstander er essensen av kvantemekanikk. Artikkelen fra 1935 (og ideen) er udødeliggjort av et lite avsnitt som omhandler helsen til en katt. Men det er først de siste årene fysikere har begynt å betrakte dette som en potensiell ressurs, spesielt for informasjonsbehandling.

Kvante–informasjon, –kommunikasjon og –kalkulasjon (KVIKK), ofte kalt 'kvante–computing', er basert på det faktum at all informasjon er fysisk, og at mulighetene for informasjonsbehandling derfor er fullstendig bestemt av de fysiske lover som materien er underlagt. Bytter vi ut klassisk mekanikk med kvantemekanikk bytter vi også ut Shannons klassiske teoremer om databehandling med nye, til dels ukjente muligheter. Fordi den kvantemekaniske verden er sammenfiltret kan korrelasjonene mellom bestanddelene være mye sterkere enn i klassiske systemer. Et kvantefysisk system kan derfor 'parallellprosessere' (beregne samtidig) alle mulige utfall av en algoritme (alle mulige verdier av en funksjon). For eksempel kan primtallsfaktorisering med en kvanteprosessor utføres eksponensielt raskere enn på en klassisk regnemaskin, i prinsippet. Men ingen slik maskin eksisterer ennå.



Figur 9. Et fraktalt hierarki av 'designer-univers' kan konstrueres i moderne halvledere der elektronene tvinges ned i et plan hvor de blir sterkt 'sammenfiltret'.

For fysikere er det ikke bare realiseringen av gamle tankeeksperimenter som gjør KVIKK-aktivitetene spennende; vi tvinges også dypere inn i kvantemekanikken. Kryssbefruktningen mellom informasjonsteknologi, informasjonsteori og kvantefysikk produserer nye begreper som fysikere bruker for å analysere de sterkt sammenfiltrede grunntilstandene som dukker opp overalt i kvantefysikken. Vi kan i dag nærmest skreddersy nye materialer, som ved passende valg av geometri og sammensetning for alle praktiske formål kan ha mindre enn tre dimensjoner (to, en og null).



Figur 10. Et vitenskapelig instrument er åndens seier over materien: en sublim syntese av matematikk, fysikk og teknologi som flytter erkjennelsens grenser (gravering funnet på antikvariat i Genève – ukjent opprinnelse).

I lave dimensjoner blir frihetsgradene mer sammenfiltret, og uendelige hierarkier av nye 'vakuumtilstander' er mulige, med tilhørende 'elementærpartikler', f.eks. såkalte 'anyoner'. Disse systemene er derfor flotte laboratorier for å rendyrke 'quantum weirdness'. Slike 'meta-univers' ('univers av universer') kan ha sine egne 'meta-symmetrier' hvor de forskjellige 'universene' speiles i hverandre under 'dualitetstransformasjoner' (se figur 9). Disse symmetriene ble opprinnelig oppdaget i matematikken for elliptiske kurver ('smultringer') i kjølvannet av Abels dype innsikter i algebraisk geometri. Idéene er hentet fra strengteori – et godt eksempel på naturens parsimoniske natur; en god mekanisme kan resirkuleres på mange forskjellige områder, selv om systemene er adskilt med over 20 dekader i energi.

Et mer konvensjonelt eksempel er 'spontane symmetribrudd' som gir fotonet masse i superledere (som derfor blir ugjennomtrengelige for magnetfelt), og som gir masser til W- og Z-bosonene i Standardmodellen slik at vi bare har én type lys.

Slike kryssbefruktninger mellom høy- og lav energifysikk har spilt, og spiller fortsatt, en viktig rolle i fysikk, og vitner om fagets innebygde enhet og harmoni.

Syntese

Symbiosen mellom matematikk, fysikk og teknologi er ikke ny, og går i hvert fall tilbake til Arkimedes. Det nye er at informasjonsteknologien åpner for å utvide denne syntesen til hele naturvitenskapen. Grenser kan viskes ut, og informasjon kan flyte fritt mellom fagfelt som tidligere var isolert.

Å forstå naturen er en stor jobb. Det ble tidlig klart at det er hensiktsmessig å dele jobben opp i mindre deler som siden ble delt igjen og igjen. Denne arbeidsdelingen har båret saftige frukter. I vår del av verden nyter vi i dag en helse og velstand som planeten aldri tidligere har sett. Dette er en direkte følge av den analytiske, reduktive tilnærming til naturfilosofien.

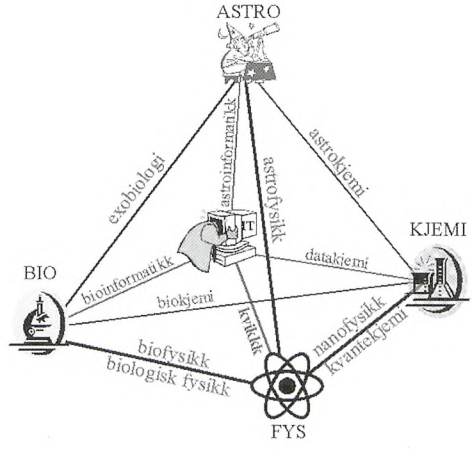


Fig. 11 Informasjonsteknologien kryssbefrukter de klassiske sub-disipliner, sprenger gamle grenser og syntetiserer naturvitenskapen (kvikkk = kvante-informasjon, kommunikasjon, kalkulasjon og kompleksitet).

I dag står vi antagelig foran et vendepunkt i naturvitenskapens utvikling, en overgang fra den predigitale analytiske til den post-digitale syntetiske fasen. Den plutselige utbredelsen av maskiner som kan utføre enhver (klassisk) beregning, har store konsekvenser for vitenskapen. Det mest interessante er ikke de nye svarene vi vil få på gamle spørsmål, men de kvalitativt nye spørsmål som vi nå kan stille.

Fysikken, selve fundamentet for denne teknologiske

utvikling, er den eldste og mest modne av naturfagene. Fysikken har en konsistens og koherens i sitt begrepsapparat og sine metoder som alle misunner oss, og mange forsøker å etterligne. Men det er ikke uten videre gitt at våre analytiske metoder lar seg eksportere til andre deler av naturvitenskapen. Tvert imot, når fysikken nå vender seg mot mer og mer komplekse systemer, ser vi også det motsatte: Vi må benytte modeller og metoder som ikke er så ryddige som vi er vant til. Disse nye 'syntetiske' metodene, muliggjort av informasjonsteknologien, bryter ned de gamle grensene mellom naturfagene. Evnen til å syntetisere informasjon på nye måter gir oss nye teknologier og ny innsikt i naturen.

Så – hva er fysikkens fremtid og skjebne? Vi tror dagens fysikk nærmer seg slutten på 'puppe–stadiet'. Informasjonsteknologien vil katalysere en metamorfose av det vi kaller fysikk og fysiske metoder til et høyere stadium som integrerer dagens mange naturfag i en sømløs og fargerik helhet: en 'kunnskapens sommerfugl'.

Referencer:

[1] http://www.fysikknett.no

[2] V. L. Fitch, D. R. Marlow and M. E. Dementi (eds): "Critical Problems in Physics" (Princeton Series in Physics)*Princeton University Press* (1997).

[3] http://www.ParticleAdventure.org

[4] http://www.UniverseAdventure.org

[5] http://www.cpepweb.org

[6] http://particleadventure.org/particleadventure/other/othersites.html

[7] http://www.nasa.gov

[8] http://www.esa.int

Artiklen er oprindelig trykt i tidsskriftet "Fra Fysikkens Verden" (nr. 2/3 2003) i forbindelse med Norsk Fysisk Selskabs 50 års jubilæum.

Gaute T. Einevoll er professor i fysikk ved Norges landbrukshøgskole. Han har sin faglige bakgrunn fra teoretisk faststoff fysikk, men har de siste årene dreid forskingsaktiviteten mot biologiske nevrale nettverk. Einevoll er for tiden styreleder ved Nordisk institutt for teoretisk fysikk (NORDITA) i København.

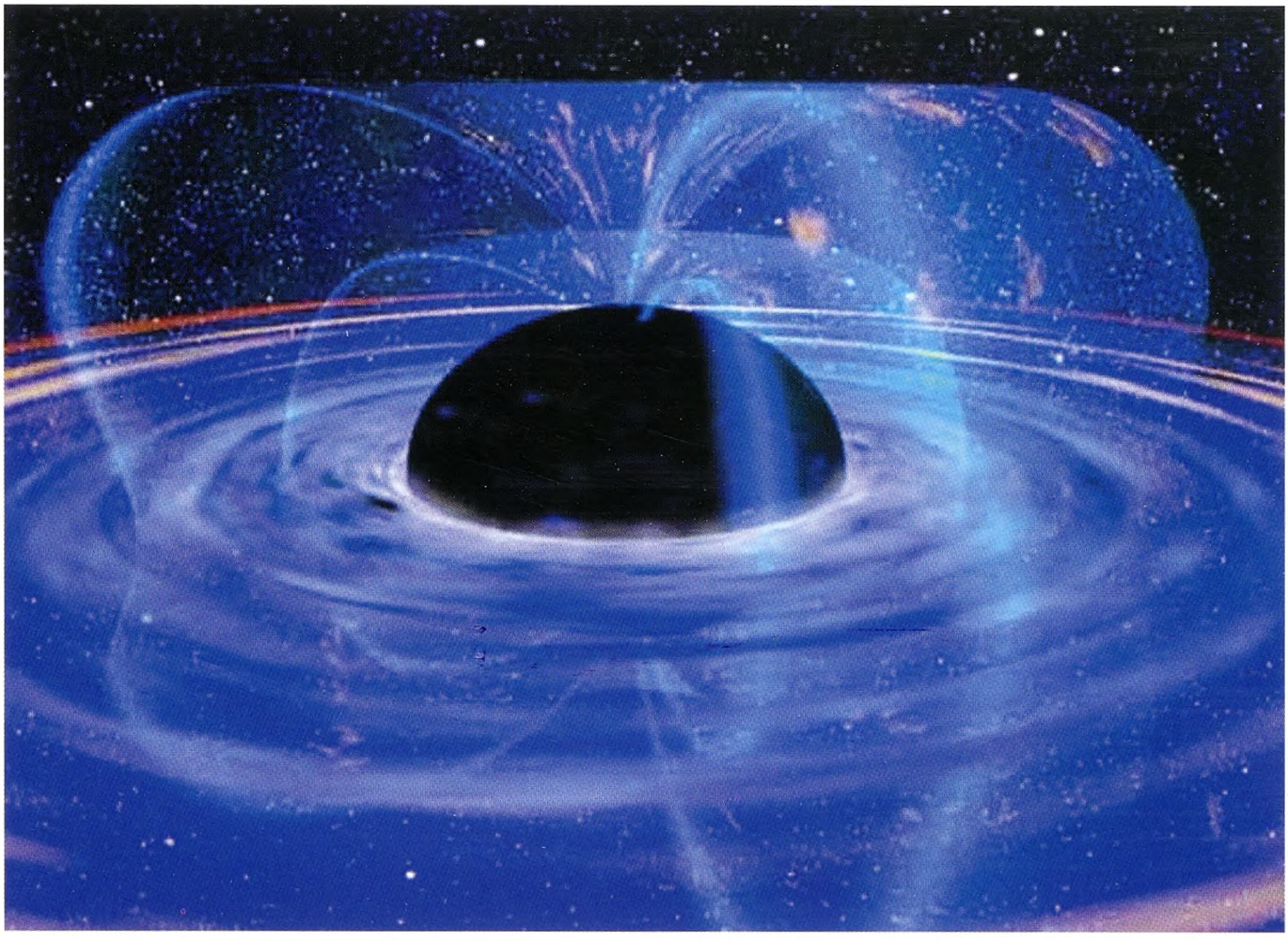
Per B. Lilje er professor ved Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo. Hans hovedinteresser er innen teoretisk og observasjonell kosmologi og ekstragalaktisk astronomi. Lilje er co-investigator for LFI-instrumentet på ESAs romobservatorium Planck, og leder den norske deltagelsen i Planck.

Carsten A. Lütken er professor i teoretisk fysikk ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo. Han arbeider med kvantefelt- og strengteori, kvante-Hall effekten og høy-temperatur superledning. Lütken er styremedlem ved Nordisk institutt for teoretisk fysikk (NORDITA) i København.

Dansk Fysisk Selskabs årsmøde 2004

Dansk Fysisk Selskabs årsmøde afholdes den 27.-28. maj 2004 på Hotel Nyborg Strand. Flere oplysninger, bl.a. tilmelding, indsendelse af abstracts og program kan fås DFS's hjemmeside www.nbi.dk/dfs.

Fysikkens fremtid?



Der er fundet mange sandsynlige sorte huller i universet, også i centrum af vores galakse. De ekstreme situationer kræver en ny "kvantegeometri". [Tegning fra www.nasa.gov.]

Fremtidens historikere vil formodentlig fremhæve opdagelsen af de grundlæggende naturlove som en af vor tids største kulturelle begivenheder. Men det betyder ikke, at fysikkens guldalder er overstået. Nye love venter på at blive opdaget i alle hjørner af naturen og fysikkens begreber og metoder spreder sig i dag udover hele videnskaben. I artiklen side 19 giver tre norske fysikere deres bud på fysikkens (og astronomiens) fremtid.