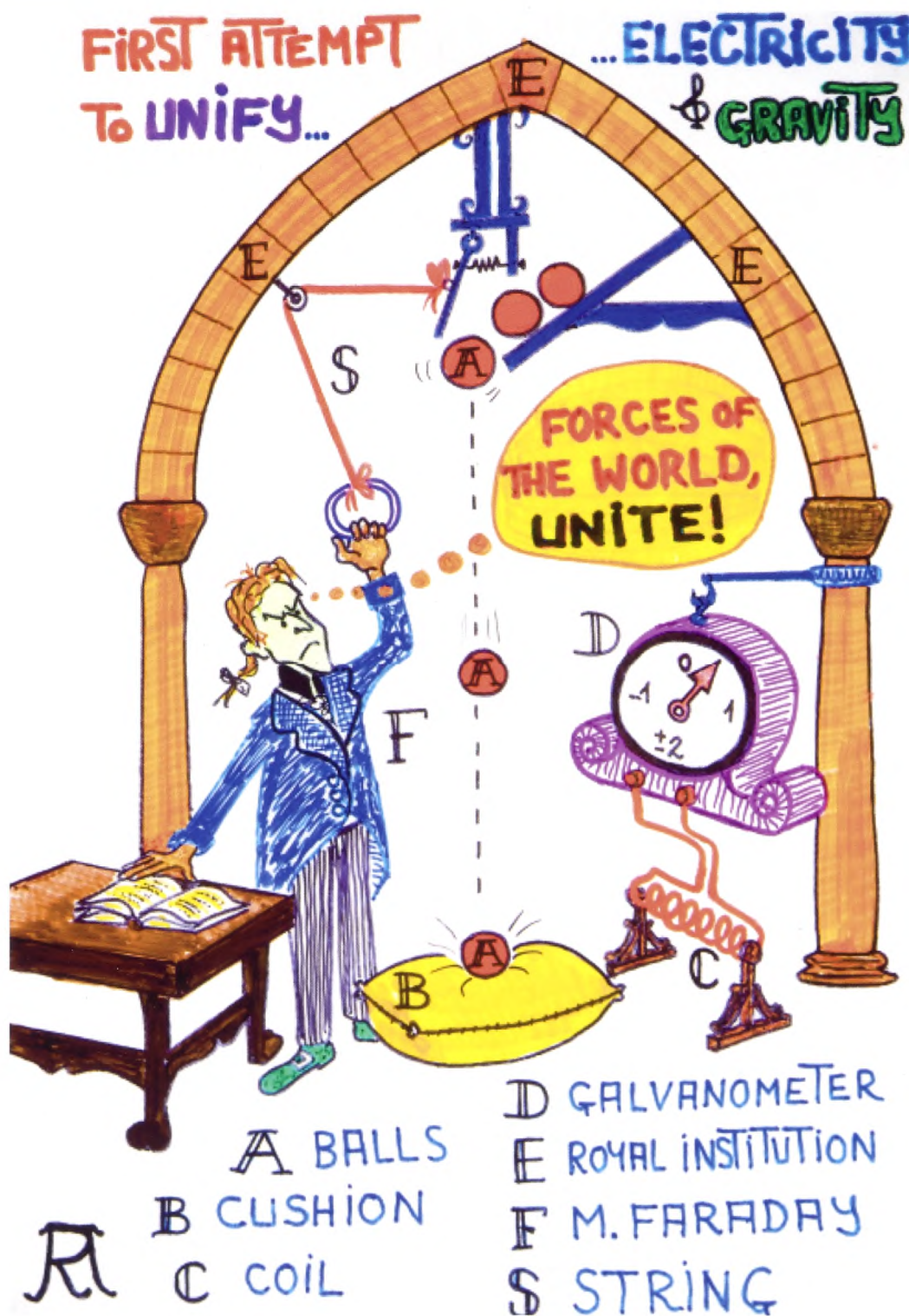


Tidsskrift for Fysik og Astronomi 31. årgang



TEMANUMMER OM ØRSTED OG ENHEDSTEORIER I FYSIKKEN

Løssalgspris: 50 kr.

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o DTU Space, Centrifugevej 356
DK-2800 Kgs. Lyngby

Hjemmeside : www.kvant.dk

E-mail : kvant@kvant.dk

Facebook  : Kvant.fysiktidsskrift

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Dansk Geofysisk Forening

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space

Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Health Technology

Steen Lærke (astro@kvant.dk),

Astronomisk Selskab

John Rosendal Nielsen,

Aurehøj Gymnasium

Dorte Olesen (SNU),

DTU Compute

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugb

Julie Søgaard (Facebookredaktør og AS)

Sarah Pepke Pedersen (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.

Abonnement tegnes på www.kvant.dk.

Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:

christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr., 1/2 side: 2300 kr.

1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart
materiale i farver. Henvendelser om annon-
cer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Tryksag
5041 0826

Produktionsplan

Nr. 3-2020 udkommer ca. 15. september

Nr. 4-2020 udkommer ca. 15. december

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

Indhold:

Fra Descartes til superstrengte: aspekter af foreningsteoriernes historie <i>Helge Kragh</i>	3
Seks <i>John Rosendal Nielsen</i>	9
Generel relativitetsteori: forbindelsen til Ørsted <i>Poul Henrik Damgaard</i>	10
KVANT-nyheder: Laserfysik <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	12
Inflation: Én oprindelse for alt? <i>Martin S. Sloth</i>	13
Kommende foredrag	16
Foreningen af naturens kræfter længe efter Ørsted <i>Kristján Gulbrandsen, Troels C. Petersen, Børge Svane Nielsen</i>	17
Holgers jagt på den fundamentale teori <i>Holger Bech Nielsen og John Rosendal Nielsen</i>	23
Vand som alternativt elektromagnetisk materiale i mikrobølge- og antennteknik <i>Samel Arslanagić, Rasmus E. Jacobsen, Andrei V. Lavrinenko</i>	29
Svingninger, opdrift og mørkt stof – breddeopgave 85, 86 og 87 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	34
KVANT-nyheder: Astrofysik <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser Faradays mislykkede for-
søg på at påvise en sammenhæng mellem elektricitet
og tyngdekraft. Tegningen er lavet af fysikeren Alvaro
de Rújula fra CERN.

I anledning af 200-året for Ørstedes opdagelse af elek-
tromagnetismen sætter vi i dette nummer af Kvant
fokus på foreningsteorier. For Ørsted selv var opda-
gelsen af, at elektricitet og magnetisme var to sider af
samme grundkraft, en bekræftelse af hans romantiske
idé om kræfternes enhed.

Tanken om en grundlæggende enhed i naturen har rødder helt tilbage
til de førsokratiske filosoffer. Den franske filosof og matematiker René
Descartes, der i dag er mest kendt for sin filosofi, udviklede også
en fysisk enhedsteori, der byggede på, at verden var fyldt med fine
partikler, som stødte sammen og dannede hvirvelformede strukturer.

Descartes' teori var i en periode mere accepteret end Isaac Newtons
gravitationsteori, men den manglede et solidt matematisk grundlag.
Med tiden vandt Newtons gravitationsteori derfor generel accept, og
den er i øvrigt et smukt eksempel på en tidlig forenet teori, fordi den for
første gang forenede jordiske og himmelske fænomener. Det er således
den samme tyngdekraft, der både får et æble til at falde til jorden, og
som holder planeterne fast i deres baner omkring Solen.

Den romantiske naturfilosofi overlevede ikke så længe, men den gamle
filosofiske idé om en dyb sammenhæng mellem de forskellige natur-
fænomener har overlevet og er fortsat en ledetråd for fysikken. Det
bliver fint illustreret i de artikler, som en række forskere har bidraget
med til dette nummer.



KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-
kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte
fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for
Fysik, Kemi og Farmaci (SDU), Institut for Materialer og Produktion (AAU),
DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Fra Descartes til superstrengte: aspekter af foreningsteoriernes historie

Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Den gamle drøm om at forklare alle naturfænomener ud fra en enkelt teori eller nogle få antagelser er i dag så levende som nogensinde. Men den kan følges gennem hele videnskabshistorien. I artiklen fokuseres på nogle få højdepunkter gennem en næsten 400-årig periode.

Før Ørsted

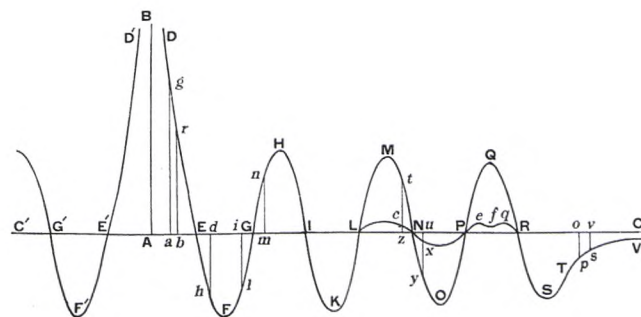
Idéen om en grundlæggende enhed i historien går tilbage til de førsokratiske filosoffer i oldtidens Grækenland, men var da af en filosofisk og ikke videnskabelig karakter. Først under den naturvidenskabelige revolution i 1600-tallet møder vi en fysisk teori, der ud fra datidens videnskabelige standarder hævdede at give en rationel forståelse af naturen i dens helhed. Den franske matematiker og naturfilosof René Descartes var overbevist om, at hans verdenssystem var ubetvivleligt rigtigt, da det byggede på matematikkens sikre fundament suppleret med principper som *a priori* var sande. I *Principia Philosophiae* fra 1644 og det posthumt udgivne værk *Le Monde* fra 1664 fremlagde han sin ambitiøse naturfilosofi i form af en teori, der var gyldig for alt materielt i universet.

Med hensyn til naturlovene mente Descartes, at Gud som et rationelt væsen nødvendigvis måtte have skabt de mekaniske love, som manifesterede sig i den iagttagne natur. Med hensyn til stoffet konkluderede han, at selv om det bestod af bittesmå partikler, så var de ikke udelelige eller af en mindste størrelse. Descartes forkastede hypotesen om atomer, som frit bevæger sig i et tomt rum, for ifølge ham var et tomrums eller vakuum en umulighed. Hans univers var et plenum, der overalt var fyldt med fine partikler, som stødte sammen og indgik i hvirvelformede strukturer. På den måde var han i stand til kvalitativt at redegøre for planeternes baner omkring Solen og også til antydningvist at forklare jordiske fænomener som magnetisme, tidevand og den forunderlige regnbue. Men Descartes' visionære skitse af en teori om alting savnede i det væsentlige forbindelse til eksperimenter, der hos ham kun optrådte som et hjælpemiddel til forklaringer og ikke som et middel til at teste teorien.

Alligevel var Descartes' universelle fysik en stor succes i perioden fra omkring 1680 til 1730, hvor den i forskellige versioner nød bred anerkendelse. Først med accepten af Isaac Newtons gravitationsteori og mekaniske fysik blev der skabt et nyt og frugtbart paradigme. Loven om massetiltrækning forenede for første gang jordiske og himmelske fænomener, og den var den første af de fundamentale naturlove, der stadig har denne status. Fascinationen af Newtons fysik i oplysningstiden var ofte blandet med cartesianske og leibnizianske elementer, sådan som tilfældet var hos den kroatisk-italienske matematiker og naturfilosof Roger Boscovich (Rudjer Bošković). I sit hovedværk *Theoria*

Philosophiae Naturalis fremlagde han en omfattende teori, hvor alting blev forklaret ud fra en enkelt kraftlov virkende mellem de punktatomer, som stof ultimativt bestod af.

Boscovichs "atomer" havde ingen udstrækning eller masse overhovedet, ja ingen som helst fysiske egenskaber, for disse opstod alene gennem den kraft, der virkede mellem dem. Med andre ord, hans forklaring af stof var renlivet dynamisk. Den fundamentale kraft, hvoraf alt kunne udledes, varierede periodisk med afstanden på en sådan måde, at den vekslede mellem frastødning og tiltrækning. Ved yderst små afstande var kraften frastødende, hvilket umuliggjorde, at to punktatomer kunne have samme rumlige position (figur 1). *Theoria* var et seriøst bud på den ultimative foreningsteori, hvor alt i princippet kunne udledes fra en eneste kraftlov. Den strengt reduktionistiske og deterministiske teori vakte interesse og inspirerede senere fysikere, men den viste sig snart at være et skelet uden kød og blod. Ikke desto mindre har Boscovichs teori en prominent plads i foreningsteoriernes historie.



Figur 1. Boscovichs kraftlov fra *Theoria*, hvor positionen A betegner punktatomet. Kraften over abscissen er frastødende, og tiltrækkende under abscissen.

Ånden i naturen

Den naturromantiske opfattelse af verden, der i starten af 1800-tallet satte sit præg på dele af fysikken og kemien, stod på de fleste områder i stærk modsætning til det verdensbillede, som havde sin baggrund i Newtons mekanik, og som også Boscovich var eksponent for. Alligevel var drømmen om en total og endelig enhedsforklaring et fælles tema, om end det fremstod i vidt forskellige former. På en måde var drømmen endnu større og mere dristig blandt de forskere, der

tilsluttede sig romantiske og kantianske tankegange, for her omfattede den også den menneskelige ånd eller fornuft.

Ifølge filosofen Friedrich Schelling var ånd og natur blot to forskellige sider af samme sag, så man kan ikke forstå den ene uden at medtænke den anden. Vil man forstå naturens sande væsen, kan det ikke lade sig gøre ad sansningens vej alene, for dette væsen er uadskilleligt fra ånden og derfor kun fatteligt gennem en empatisk og intuitiv indsigt. H. C. Ørsted pointerede i sit hovedværk med den velvalgte titel *Ånden i Naturen*, at mens naturen er den synlige ånd, så er ånden den usynlige natur. "Hele Naturen er en Fornuftindretning", skrev han, og "Naturgrandskerens Forretning er at søge Fornuften i Naturen". De natur- eller fornuftlove, som Ørsted søgte efter, var ikke blot empirisk gyldige, men sande af nødvendighed. Således fremhævede han, at inertiens lov var en "selvklar Fornuftenødvendighed". En sådan form for rationalisme kan også findes hos fx Descartes og Bosovich, men hos Ørsted og andre naturromantikere var den ikke koblet til en reduktionistisk naturforståelse. Tværtimod, Ørsted var talsmand for en holistisk opfattelse, hvor indsigt i helheden kommer før den sekundære indsigt i delene.

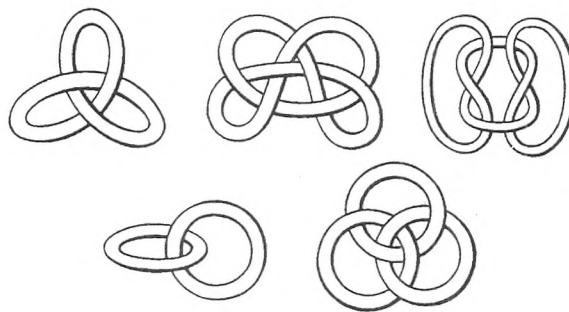
Den prioritet, Ørsted og andre gav til helheden, indebar en grundlæggende enhed i verden og dermed også tanken om, at de forskellige lovmæssigheder i naturen har et fælles ophav i form af en grund- eller urkraft. Enheden gjaldt ikke blot naturlovene, men også den materie, som Ørsted opfattede som dynamisk snarere end stofflig. Således påpegede han, at kemiske analyser af meteoritter viste, at disse budbringere fra himmelrummet bestod af de samme grundstoffer, som vi kender fra Jorden, og dermed bekræftede naturens materielle enhed. Naturlovene var de samme overalt i universet, og det samme gjaldt for materiens kemiske beskaffenhed. Mere væsentligt var det, at Ørsteds forventning om naturkræfternes enhed i juli 1820 førte ham til den skelsættende opdagelse af elektromagnetismen. Foreningen af eller i det mindste forbindelsen mellem elektricitet og magnetisme er et tidligt højdepunkt i den fysiske enhedstæknings historie.

Ørsteds opdagelse blev videreført af den på flere måder åndsbeslægtede Michael Faraday, der ikke blot udbyggede den elektromagnetiske teori men også søgte at gå et skridt videre, nemlig at forbinde elektromagnetismen med den tilsyneladende helt uafhængige tyngdekraft. Det lykkedes dog ikke Faraday at påvise en elektrogravitationel effekt (se tegningen på Kvants forside). Han beskrev sine mislykkede eksperimenter i en artikel fra 1851, hvor han ikke desto mindre konkluderede, at de "[ikke] ryster min overbevisning om en relation mellem tyngdekraften og elektriciteten".

En teori om æteriske atomer

Den mest udarbejdede og imponerende af 1800-tallets enhedsteorier er også en af de mindst kendte. Den victorianske hvirvel- eller vortexteori var et grandtøst forsøg på at forklare alle fysiske fænomener ud fra antagelsen om en allestedsværende æter beskrevet af hydrodynamikkens ligninger. Under udfoldelse af stor

matematisk virtuositet lykkedes det i 1867 William Thomson (den senere Lord Kelvin) at vise, at små lukkede hvirvelbevægelser i æteren var permanente og havde mange af de egenskaber, der blev tillagt materielle atomer (figur 2). Man kunne derfor nøjes med et enkelt medium, æteren, og deduktivt udlede vortextatomernes egenskaber fra kontinuumsfysikkens ligninger. James Clerk Maxwell var blandt dem, der var fascineret af teoriens renhed, dens deduktive karakter og dens mangel på hjælpehypoteser. Som han skrev i 1875, "Når vortextomet sættes i bevægelse, er alle dets egenskaber fastlagte og kun bestemt af de bevægelseslove, der gælder for den primitive væske [æteren]". Maxwell var dog opmærksom på, at teoriens forførende ontologiske simpelhed og matematiske rigdom på ingen måde garanterede dens sandhed.



Figur 2. Lukkede vortextstrukturer som illustration af æteratomer. Afhandling af W. Thomson fra 1869.

Vortexteorien blev udviklet i detaljer af engelske matematikere og fysikere, der anvendte den på en lang række områder inden for varmelære, optik, kemi og elektrodynamik. Selv tyngdekraften søgte man at forklare ud fra vortextmodellen, men uden at der kom noget ud af forsøget. På trods af teoriens mange formelle kvaliteter lykkedes det ikke at omforme den fra et matematisk-fysisk forskningsprogram til en teori med ægte empirisk forklarings- og forudsigelseskraft. I princippet kunne den ganske vist forklare næsten alting, men netop af den grund kunne den ikke forklare, hvorfor naturen har bestemte egenskaber i stedet for andre. Omkring 1890 ophørte fysikere med at interessere sig for vortexteorien, der på den tid var udartet til en matematisk snarere end fysisk teori.

Vortexteorien var dog ikke uden konsekvenser, for dens matematiske apparat førte til fremskridt inden for det topologiske område kendt som knudeteori. Også dele af den senere fysik var inspireret af vortexteorien, som elektronens opdager J. J. Thomson var stærkt optaget af. Thomson mente, at den gav en slags forklaring på grundstoffernes periodiske system, og hans forestillinger om elektronen stod i direkte gæld til vortextomet.

Det elektromagnetiske verdensbillede

Den af Faraday indledte feltbeskrivelse af elektricitet og magnetisme kulminerede i Maxwells enhedsteori fra 1865. I modsætning til dens moderne formulering byggede Maxwells oprindelige teori på den mekaniske æter, og desuden var den en ren feltteori, hvor der ikke

var plads til elektrisk ladede partikler. Maxwell viste, at æterkonstanterne ϵ_0 og μ_0 for det tomme rum var knyttet til lyshastigheden c via formlen

$$\epsilon_0\mu_0 = c^{-2} \quad (1)$$

Han sluttede heraf, at lys er elektromagnetiske bølger, og at optikken derfor kan forstås som en del af elektrodynamikken. Dermed havde han forenet to områder af fysikken, der indtil da havde været anset som helt forskellige.

Hos Maxwell var det dog stadig den newtonske mekanik, der havde fundamental status, og som elektrodynamikken burde kunne reduceres til. Det var først med omformuleringen af Maxwells teori i 1890'erne, at forholdet mellem stofflige partikler og den elektromagnetiske æter kom i fokus. Ifølge fysikere som Wilhelm Wien og Max Abraham var alt stof manifestationer af æteren, hvorfor mekanikken snarere burde kunne reduceres til elektrodynamik. Der var intet andet i verden end elektromagnetiske felter og de elektroner, der var en slags koncentrerede æterpartikler! Det såkaldte elektromagnetiske verdensbillede tiltrak sig stor interesse i perioden 1895–1915, hvor det af mange blev betragtet som den endelige foreningsteori.

Den mest ambitiøse formulering af det elektromagnetiske verdensbillede skyldtes den tyske fysiker Gustav Mie, der i 1907 skrev: "Det er nu klart, at hele den sanselige verdens mangfoldighed ... kan reduceres til processer, der foregår i en enkelt verdenssubstans, nemlig æteren". Mies fysik byggede på en ikke-lineær generalisering af Maxwells ligninger og gjorde desuden brug af Einsteins nye relativitetsprincip. Styrken og svagheden i Mies elektromagnetiske æterteori var omtrent de samme som i den tidligere vortexteori. Det var en matematisk smuk teori, men den var pinligt steril, når det gjaldt konkrete anvendelser. Einstein betegnede den ironisk som et maleri i en flot ramme, hvor selve maleriet blot manglede. Med anerkendelsen af relativitetsteorien og kvanteteorien døde interessen for det elektromagnetiske verdensbillede.

Relativitetsteori i 4 og 5 dimensioner

Straks efter kvantemekanikkens fremkomst stod det klart, at den nye fundamentale teori var inkonsistent med relativitetsteorien. Den utålelige situation blev i 1928 delvist løst med Paul Diracs elektronteori, der snart førte til det overraskende begreb om antipartikler. Diracs teori var endnu et højdepunkt i foreningsfysikkens historie, og i modsætning til andre højdepunkter var den empirisk frugtbar. Den var dog begrænset til den specielle relativitetsteori og havde derfor intet at sige om den tyngdekraft, der på en eller anden måde måtte høre til en god foreningsteori.

Allerede i 1870'erne legede enkelte fysikere og astronomer med idéen om, at der er en skjult fjerde rumdimension ud over de tre kendte. Det var dog først i 1920'erne, at idéen blev udformet til en videnskabelig hypotese om en fem- og ikke firedimensional rumtid. I 1914 forsøgte den finske fysiker Gunnar Nordström at skabe en syntese af generel relativitetsteori og elektromagnetisme på dette grundlag, og med matematikeren

Theodor Kaluzas teori fra 1921 blev den femdimensionale enhedsteori alment kendt. Kaluza medtog ikke den nye kvanteteori, og i hans syntese optrådte den femte dimension mere som en matematisk hjælpestørrelse end en fysisk parameter. Derimod startede Oskar Klein med Schrödingers bølgemekanik, som han i 1926 præsenterede i en femdimensional formulering, der ambitiøst omfattede både elektromagnetisme og tyngdekraft. Som et mål for den lille femte dimension angav han en længde, der indeholdt de fundamentale naturkonstanter for kvantemekanik, elektromagnetisme og gravitation:

$$l_K = \frac{4h}{e} \sqrt{\pi G} \cong 10^{-32} \text{ m} \quad (2)$$

Denne tidlige formel er prototypisk for de teorier, der søger at forene kvanteverdenen med elektromagnetismen og Einsteins gravitationsteori.

Hvad der snart blev kendt som Kaluza-Klein-teorien, vakte stor opmærksom blandt fysikerne, men efter at have arbejdet med teorien i et tiår, mistede de interessen for den. Som andre foreningsteorier var den femdimensionale teori matematisk tiltrækkende, men uden at levere overbevisende fysiske resultater. Det var dog ikke slutningen på Kaluza-Klein-teorien, der omkring 1970 blev genoplivet i noget anderledes versioner, der typisk indeholdt mere end blot en enkelt ekstra rumdimension. Siden da har mangedimensionale Kaluza-Klein-teorier spillet en stor rolle i udviklingen af stadig mere avancerede foreningsteorier.

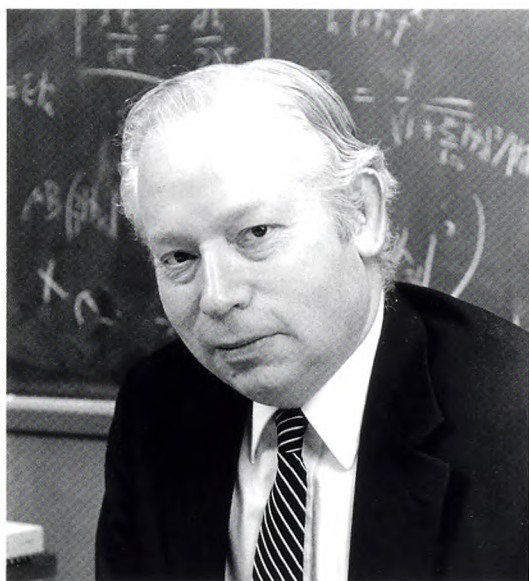
I mellemkrigstiden udviklede astronomen Arthur Eddington en storslået foreningsteori af en helt anden og langt mere ambitiøs art. Hans teori var mere end blot en syntese af kvantemekanik og generel relativitetsteori, for han hævdede at have formuleret en endelig teori omfattende også al fremtidig viden om naturen. Blandt teoriens bemærkelsesværdige resultater var præcise udledninger af værdien af de fundamentale naturkonstanter, herunder elementarladningen, Plancks konstant og den kosmologiske konstant. Med denne teori ville alle fysikkens love og dens konsekvenser entydigt fremstå som produkter af den menneskelige fornuft. Eddingtons grandiose system, der kulminerede i det posthumt udgivne værk *Fundamental Theory* fra 1946, var som Descartes' system uafhængigt af empirisk viden om naturen og ville i princippet overflødigøre eksperimenter og observationer. Eddingtons ultimative foreningsteori vandt dog ingen tilslutning, og i dag er den nærmest glemt.

Partikelfysik og kvanteteori

Antagelsen om naturens enhed omfatter ikke blot, at de grundlæggende teorier må kunne indordnes under samme teoretiske ramme. Det indebærer også en ontologisk antagelse, nemlig at de partikler, verden består af, må være forbundet og kunne reduceres til et lille antal – måske blot en enkelt urpartikel. Ud fra de dengang kendte atomvægte foreslog den engelske læge og kemiker William Prout i 1815, at alt stof består af brintatomer. Hypotesen var forkert, men ikke helt og aldeles forkert. Da Dirac mere end 100 år senere kom på idéen om antipartikler, var protonen og elektronen

de eneste kendte massive partikler. Han mente derfor, at antielektronen måtte være identisk med protonen, for derved ville han have realiseret, hvad han kaldte "filosoffernes drøm om at forstå alt stof ud fra en eneste fundamental partikel". Han måtte dog snart indrømme, at protonen ikke er en forklædt elektron.

Med den voldsomme vækst i nye elementarpartikler, nogle fundet i naturen, men de fleste i laboratoriet, måtte man for en stund opgive filosofernes drøm. I stedet klassificerede man de mange partikler, hvilket omkring 1950 førte til de fire stadig anerkendte kræfter eller vekselvirkninger: gravitationen, elektromagnetismen, den svage vekselvirkning og den stærke vekselvirkning. De tre sidste kunne beskrives af kvantemekanikken, den første ikke. Den første succesfulde foreningsteori var den elektrosvage teori, der blev udformet i 1960'erne af blandt andet Shelton Glashow, Steven Weinberg (figur 3) og Abdus Salam. Det tog dog tid, før teorien blev helt verificeret, hvilket først skete med opdagelsen i CERN i 1983 af de forudsagte W- og Z-udvekslingspartikler.



Figur 3. Steven Weinberg, nobelpristager i 1979 og en ledende skikkelse i udviklingen af enhedsteorier.

Som det næste skridt måtte de stærke vekselvirkninger integreres med den elektrosvage teori. Man havde i starten af 1970'erne en lovende teori for de stærke kernekræfter i form af kvantekromodynamikken (QCD), og i 1975 foreslog Glashow og Howard Georgi en foreningsmodel af denne teori og den elektrosvage teori. Ifølge de to fysikere var "alle kræfter mellem elementarpartikler (stærk, svag, elektromagnetisk) forskellige manifestationer af samme fundamentale vekselvirkning, som udtrykkes ved en enkelt koblingsstyrke, nemlig finstrukturkonstanten". Glashow-Georgi-modellen var det første bud på en såkaldt GUT, et akronym for "grand unified theory". Koblingskonstanterne udtrykker de fundamentale kræfters relative styrke og er for den elektromagnetiske kraft givet ved finstrukturkonstanten

$$\alpha = \frac{e^2}{hc} \cong 0,007 \quad (3)$$

Den tilsvarende konstant for den svage kraft er væsentligt mindre, og for den stærke kraft væsentligt

større. Ifølge GUT burde de tre koblingskonstanter smelte sammen ved meget høje energier, omkring 10^{16} GeV, svarende til at kræfterne går op i en fælles enhed (figur 4).

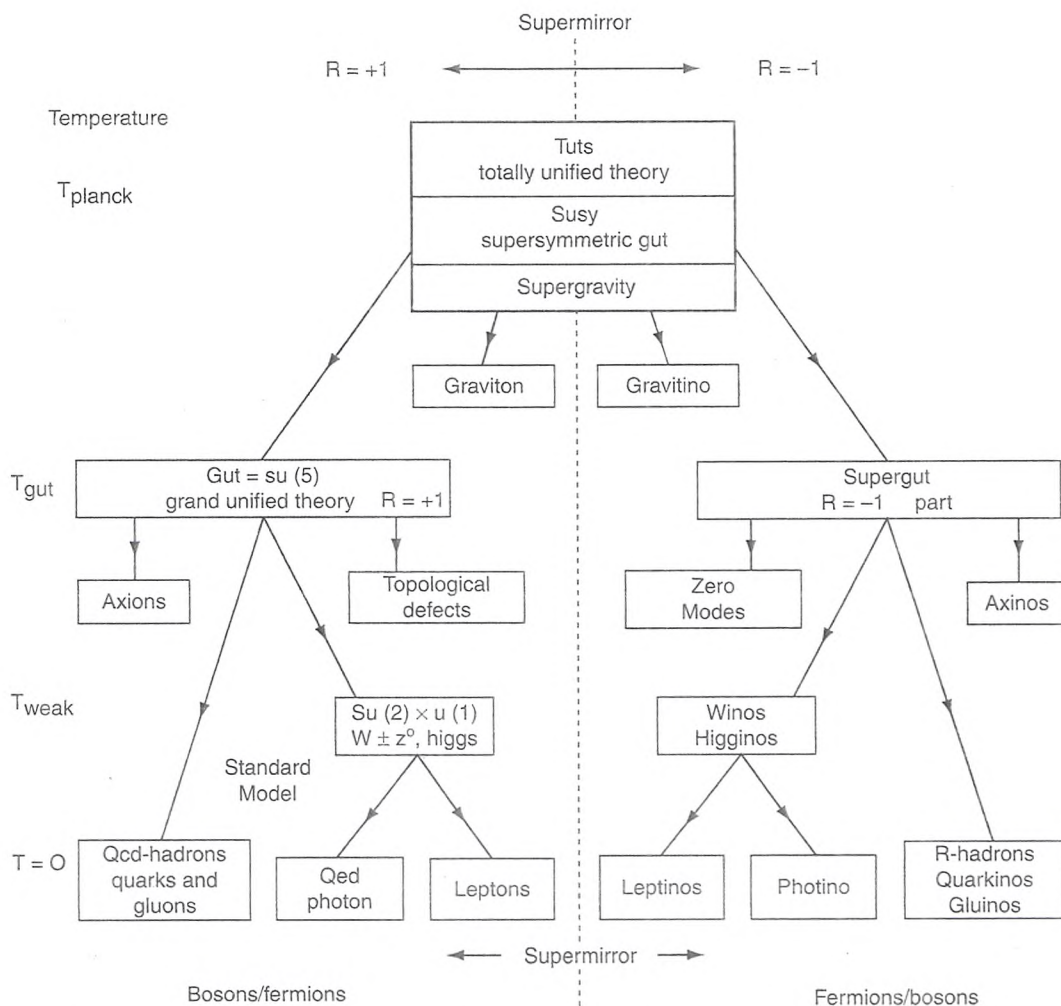
I modsætning til mange andre foreningsteorier viste GUT sig at være empirisk frugtbar, idet denne type af teori forudsagde overraskende og potentielt testbare fænomener. Den mest spektakulære forudsigelse var, at baryontallet ikke var absolut bevaret, og at protonen derfor ikke var en helt stabil partikel. Spontane henfald som $p^+ \rightarrow \pi^0 + e^+$ burde forekomme, om end med en ekstremt lang middellevetid, der omkring 1980 blev beregnet til størrelsesordenen 10^{31} år (senere GUT-versioner resulterer i en endnu længere levetid). Bemærkelsesværdigt nok kan forudsigelsen testes eksperimentelt, men til dags dato er der dog ikke påvist et eneste protonhenfald. Hvis protonen er radioaktiv, er dens levetid større end 10^{33} år.

Ikke blot relaterede GUT til laboratoriefysik, teorier af denne art har også vist sig at være af stor betydning for kosmologien, hvor de er blevet benyttet til at forklare den påfaldende forskel mellem stof og antistof ud fra en oprindelig asymmetri mellem baryoner og antibaryoner. Desuden resulterede GUT i et scenario for det meget tidlige univers, hvor de tre kræfter oprindeligt var forenede, hvorefter de adskiltes som følge af den lavere temperatur forårsaget af rummets udvidelse. Først blev den stærke kraft adskilt fra den elektrosvage, hvorefter sidstnævnte blev opdelt i en elektromagnetisk og en svag kraft.

Kvantegravitation

I 1930 lykkedes det den belgiske fysiker Léon Rosenfeld at kvantisere det svage gravitationsfelt, hvilket i dag ses som begyndelsen på det forskningsprogram, hvis mål er at forene Einsteins generelle relativitetsteori med kvantemekanikken. Det var dog først en menneskealder senere, nemlig med udviklingen af de første strengteorier i 1970'erne, at der skimtedes en mulig fælles teori for tyngdekraften og de tre kræfter, der indgår i standardmodellen eller i GUT. Strengteorien var i sin oprindelige version et forsøg på at forklare kernekræfterne ud fra endimensionale "strenger", der holdt kvarerne sammen i protonen og andre stærkt vekselvirkende partikler. Den videre og rent teoretiske udvikling af strengteorien førte til interessante resultater, der gjorde den til en kandidat for en enhedsteori for alle fire naturkræfter. Omkring 1980 var strengene blevet til umådeligt små superstrenger (ca. 10^{-35} m) i en tidimensional rumtid. Da alle fysiske partikler, kendte såvel som ukendte, optræder som energitilstande af strengen, er den det ultimative objekt i verden.

I teorien optrådte en massiv spin-2-partikel som svarede til den hypotetiske "graviton", der ifølge andre teorier var den partikel, som overfører tyngdekraften. Strengteorien var nu blevet til en teori, der i en formel forstand forenede tyngdekraften med de øvrige tre kræfter. I og med at den nye teori var supersymmetrisk, krævede den desuden, at bosoner og fermioner optræder parvist, sådan at fx elektronen må have en bosonisk partner, en "selektron" med samme masse, men med spin-0 i stedet for spin- $1/2$. Supersymmetri eller SUSY



Figur 4. Den amerikanske fysiker Heinz Pagels' sammenfatning af fysiske enhedsteorier anno 1984, herunder supersymmetri, men ikke strengteori.

er dog ikke eksklusivt en egenskab for strengteorien, da denne egenskab deles af flere andre teorier, herunder en udvidelse af standardmodellen.

Mange fysikere opfattede (og opfatter stadigvæk) strengteorien som en lovende og meget attraktiv teori, hovedsageligt på grund af dens matematiske struktur og mangel på frie parametre. De erkender dog samtidigt, at teorien har alvorlige problemer med at knytte an til den verden af lav energi, vi lever i og som beskrives af den eksperimentelt bekræftede standardmodel. Man kan godt forestille sig eksperimenter, der falsificerer teorien, men det er mere end svært at realisere dem. Strengteorien har da også givet anledning til en metodologisk kontrovers, idet nogle kritikere hævder, at den i realiteten er en matematisk snarere end en fysisk teori. I en giftig kommentar fra 1988 sammenlignede Glashow strengteorien med middelalderens skolastik, idet han retorisk antydede, at teorien havde flere lighedspunkter med teologi end med fysik.

Strengteorien er ikke det eneste bud på en forening af kvantemekanik og generel relativitetsteori. Et af alternativerne er "loop quantum gravity" (LQG), der blev udviklet af Lee Smolin og Carlo Rovelli i slutningen af 1980'erne. Denne teori er meget forskellig fra strengteorien, idet den ikke gør brug af supersymmetri og heller ikke af ekstra rumdimensioner. LQG fører til

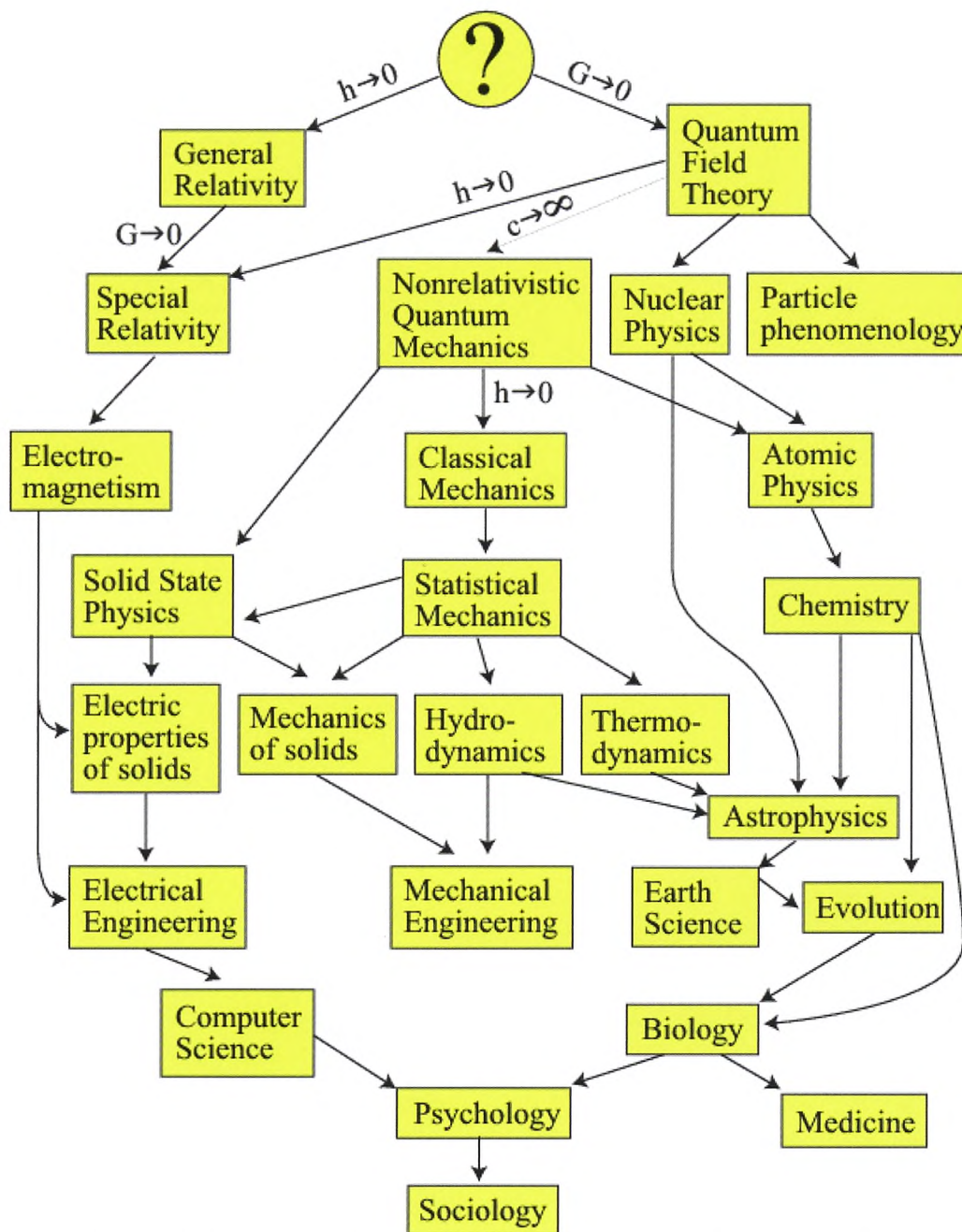
en overraskende opfattelse af rummet som bestående af diskrete og ekstremt små dele, sådan at det har en atomistisk struktur. Den mindste tilsvarende længde er den såkaldte Planck-længde, nemlig

$$l_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \cong 4 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (4)$$

Hvad angår eksperimentel evidens, står LQG i omtrent samme situation som strengteorien. Blandt førstnævnte forudsigelser er, at fotoners hastighed i vakuum afhænger en lille smule af deres energi. Forudsigelsen er testbar, men den er ikke blevet verificeret.

En teori om alting

Mens nogle foreningsteorier blot indordner to naturkræfter eller -fænomener under samme teoretiske ramme, sådan som tilfældet var med elektromagnetismen og den mere omfattende elektrosvage teori, så er andre teorier mere ambitiøse. De er bud på, hvordan alle tilstande og processer i verden kan forstås ud fra en enkelt teori – i det mindste i princippet. I oldtiden mente Demokrit, at atomteorien havde denne ophøjede status, mens Pierre-Simon Laplace i slutningen af 1700-tallet tilskrev en lignende status til den newtonske mekanik. De to teorier fremstod begge, ligesom vortexteorien,



Figur 5. Max Tegmarks hierarkiske vision for al videnskab, hvor den mest fundamentale viden (foroven) deduktivt fører til andre former for viden, herunder psykologi og sociologi.

den elektromagnetiske teori og Eddingtons fundamentale teori senere gjorde det, som en "teori om alting" (TOE, theory of everything). Med denne etikette tænkes i dag ofte på en total foreningsteori, der samtidig er den "endelige teori", som ikke kan begrundes yderligere eller erstattes af en endnu dybere teori.

Selv om strengteorien af og til omtales som en mulig TOE, skal udtrykket ikke tages alvorligt, og det er da også kun meget sjældent, at fysikere bruger det. På den anden side, når eller hvis strengteorien (eller en anden foreningsteori) når sin endelige udformning, formodes den af nogle at være en endegyldig teori. Weinberg skriver om denne type teori, at "den ikke kan modificeres det mindste, uden at det fører til logiske absurditeter. ... Den store teori må være som et fint stykke porcelæn, der ikke kan bøjes uden at gå itu. I

så fald vil vi, selv om vi ikke kan vide, hvorfor den store teori gælder, ud fra den rene matematik og logik vide, hvorfor sandheden ikke er en lidt anden." Der er dog stadig en lang vej fra den slags teori, Weinberg beskriver, og en teori om bogstaveligt talt alting.

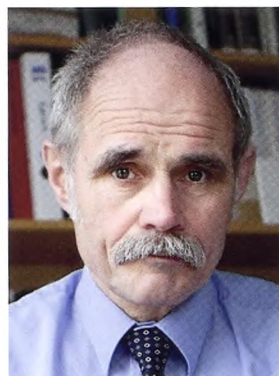
Den svensk-amerikanske fysiker og kosmolog Max Tegmark har siden 1998 udviklet en teori eller metateori, der prætenderer at være en TOE (figur 5). Grundlaget for denne reduktionistiske teori er en fremtidig forening af kvantemekanik og generel relativitetsteori, hvilket ikke er overraskende. Det er derimod hans centrale hypotese om, at den fysiske virkelighed ikke er andet end den matematiske virkelighed. Desuden hævder han, at alt matematisk eksisterende (som fx et rum med 729 dimensioner) modsvares af fysisk eksistens (et 729-dimensionalt rum eksisterer faktisk). Denne meget

radikale påstand indebærer selvsagt en enorm udvidelse af, hvad der findes i verden. For at finde plads til de afsindigt mange nye fysiske objekter må Tegmark da også gå uden for den kendte verden og henvise til multiverset med dets uanede mængder af helt andre universer og fysiske love. Tegmarks matematisk-fysiske fantasi nyder måske ikke videnskabelig respekt, men i det mindste er den instruktiv set ud fra et historisk og videnskabsfilosofisk perspektiv.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2011) *Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology*, Oxford University Press.
- [2] S. Scoular (2007) *First Philosophy: The Theory of Everything*, Boca Raton.
- [3] D. Lindley (1993) *The End of Physics: The Myth of a Unified Theory*, Basic Books.

- [4] G. 't Hooft (1997) *In Search of the Ultimate Building Blocks*, Cambridge University Press.
- [5] D. Rickles (2014) *A Brief History of String Theory*, Springer.
- [6] S. Weinberg (1992) *Den Store Teori: Jagten på Naturens Grundlove*, Gyldendal.



Helge Kragh er professor emeritus ved Niels Bohr Institutet og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie.

Seks

Af John Rosendal Nielsen, Kvant

Tidligere redaktør på Kvant, Mogens Esrom Larsen, blev bedt om at udtale sig om sex under et presse-interview, hvortil han svarede: "Jo – seks er meget bemærkelsesværdigt; det er det eneste tal, der er lig med summen eller produktet af de samme tre tal". I Mogens' ånd og glæde for rekreativ matematik vil jeg stille denne opgave: Lav seks hver gang.

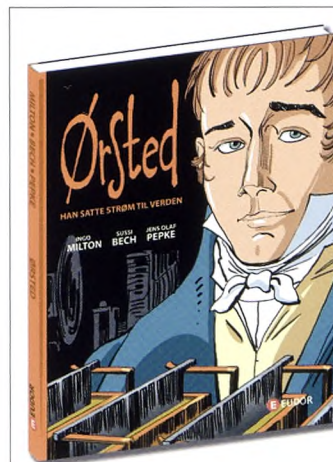
Idéen til opgaven kommer fra en opgave i *Illustreret Videnskab* (for over 30 år siden), som Mogens lavede. Jeg mener dog ikke, at han havde 0 og 10 med i sin version.

0	0	0	=	6
1	1	1	=	6
2	2	2	=	6
3	3	3	=	6
4	4	4	=	6
5	5	5	=	6
6	6	6	=	6
7	7	7	=	6
8	8	8	=	6
9	9	9	=	6
10	10	10	=	6

Reglerne er enkle:

1) Det er tilladt at bruge de fire regningsarter (plus, minus, gange og dividere), sætte parenteser, samt anvende almindelige matematiske funktioner, men I må ikke tilføje nye tal, heller ikke i regneoperationen. Kvadratrodd er således tilladt, men ikke fx potenser og eller den tredje rod.

2) Resultatet skal give seks, så man kan ikke benytte sig af $\neq$. Nogle regnestykker er der flere svarmuligheder til. God fornøjelse med opgaven!
PS. Løsningen findes på side 12.



80 sider i
hardcover
(Vejl. 184,50 kr)

For første gang er historien om Hans Christian Ørsted nu udkommet som tegneserie. Læs om hans opvækst, hans samtid, hans betydning og hans opdagelse af elektromagnetismen – tegnet og fortalt af Ingo Milton og Sussi Bech efter oplæg af Kvants redaktør Jens Olaf Pepke Pedersen.

Tegneserien om ØRSTED

Inkl. 12 siders efterskrift om Hans Christian Ørsted.

Køb "Ørsted – han satte strøm til verden" hos din boghandler eller direkte fra forlaget (www.eudor.dk)

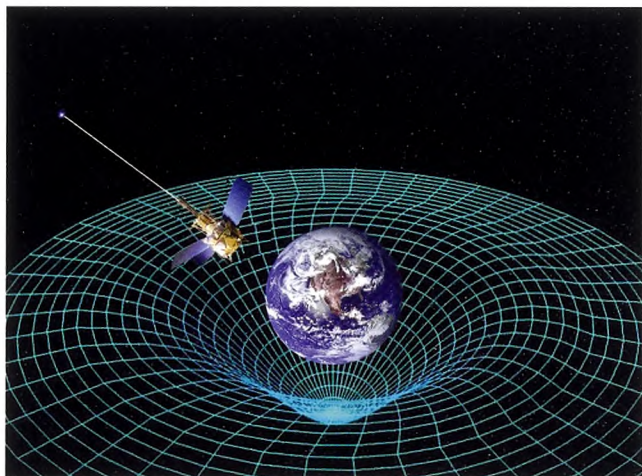
E EUDOR

Generel relativitetsteori: forbindelsen til Ørsted

Poul Henrik Damgaard, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Til sin død drømte Einstein om at forene teorien for tyngdekraft med de andre fundamentale naturkræfter. I dag ved vi, at hans drøm ikke kunne virkeliggøres med de forudsætninger, fysikerne havde på Einsteins tid. Den såkaldte Yang-Mills-teori, en generalisation af elektromagnetismen og grundstenen i både stærke og svage vekselvirkninger mellem elementarpartikler, leder på en overraskende måde frem til den korrekte forståelse.

Sammenligner vi Coulombs lov for elektrostatisk tiltrækning mellem to modsatte elektriske ladninger med Newtons tyngdekraft, virker det nærliggende, at der kunne være en forbindelse mellem de to teorier. Både det statiske elektriske potentiale og Newtons tyngdepotentiale af punktformige kilder falder omvendt proportionalt med afstanden: bortset fra ekstra faktorer, der afhænger af, hvilke enheder vi benytter, er "styrken" af potentialerne enten bestemt af produktet af de to ladninger eller af produktet af de to masser. Det virker totalt naivt, men kunne vi forestille os, at der er en simpel relation mellem tyngdekraft og elektromagnetisme baseret på denne elementære observation? Altså at tyngdekraftens "ladninger" svarer til masserne? Det forbløffende svar er ja – dog ikke på så simpel og direkte måde, som man kunne forledes til at tro af ovenstående. Derom skal denne artikel handle.



Figur 1. Grafik af Gravity Probe B, der kredser rundt om Jorden for at måle rumtiden – en firedimensionel beskrivelse af universet. (Grafik: NASA)

Generalisation af elektromagnetismen

Først må vi omkring en generalisation af elektromagnetismen, som er beskrevet fra flere forskellige vinkler i dette nummer af Kvant. H. C. Ørsteds opdagelse af forbindelsen mellem elektricitet og magnetisme, og den senere præcise etablering af teorien for elektromagnetisme, var kun det første spæde skridt af en rejse mod det teoretiske fundament, der ligger bag de tre stærkeste fundamentale naturkræfter. Disse er, ud over de elektromagnetiske kræfter, de stærke vekselvirkninger (kræfterne, der bl.a. binder kvarkerne i fx protoner og neutroner) og de svage vekselvirkninger (kræfterne, der

bl.a. er ansvarlige for vekselvirkninger mellem de elektrisk neutrale neutrinoer). De to sidste kræfter er baseret på en generalisation af elektromagnetismen, der første gang blev formuleret i 1954 af fysikerne C. N. Yang og R. Mills, og som nu går under navnet Yang-Mills-teori. Det er interessant, at Yang og Mills formulerede deres teori, formelt helt korrekt, i en sammenhæng, der var helt forkert. Først efter et utal af fortvivlede forsøg på at finde anvendelse for den nye teoretiske konstruktion, som Yang-Mills-teorien er, lykkedes det i slutningen af 1960'erne og begyndelsen af 1970'erne at finde helt korrekte identifikationer, der fik det samlede billede til at falde på plads. Denne fantastiske historie forudsagde bl.a. utvetydigt eksistensen af tre nye massive partikler: to ladede W-partikler og en elektrisk neutral Z-partikel, samt, mest vanskelig at finde (og mest overraskende), den såkaldte Higgs-partikel. Men her skal vi fokusere på noget helt andet, selve strukturen af Yang-Mills-teori.

For at forstå forskellen på teorien for elektromagnetisme og Yang-Mills-teori kan vi med fordel benytte geometriske objekter. Lad os for en stund tænke på elektromagnetismen som værende beskrevet i abstrakt form af en elastik. Vi kan arrangere, at elastikken ligger på en bordplade i perfekt cirkulær form. Det er åbenlyst, at en sådan beskrivelse har en stor symmetri. Hvis elastikken er helt ens hele vejen rundt, ser vi samme elastik, uanset hvordan vi drejer den. Elastikken har altså en symmetri, rotationssymmetri i planen af bordpladen. Hvor mange parametre skal vi benytte for at beskrive denne symmetri? Åbenbart kun én, vinklen, der beskriver rotationen. Teorien for elektromagnetisme har en sådan en-parameter-symmetri, som fuldstændig korrekt kan beskrives ved en vinkel, der beskriver rotationen i en plan. Symmetrien har på engelsk navnet gauge, og det giver ikke mening at forsøge at oversætte ordet til dansk, for selv på engelsk er ordet utroligt dårligt valgt! Elektromagnetismens gauge-symmetri er altså rotationer i en todimensional plan. Denne gauge-symmetri er helt fundamental for forståelsen af elektromagnetisme, specielt på kvantemekanisk niveau. Den lader os bl.a. forstå, hvorfor lys – elektromagnetisk stråling – er beskrevet ved hjælp af masseløse partikler, fotonerne.

Rotationer i en plan giver anledning til, hvad der i matematik kaldes en gruppe. Foretager vi først én rotation af elastikken ovenfor, og derefter en anden, er resultatet en tredje rotation, hvis rotationsvinkel blot er summen af de to. Ydermere gør det ingen forskel, i

hvilken rækkefølge vi foretager de to rotationer. Den tredje rotation er naturligvis stadig blot summen af de to. Til ære for den norske matematiker Niels Henrik Abel kaldes en sådan gruppe abelsk.

Langt de fleste grupper er ikke-abelske. For sådanne ikke-abelske grupper kan rækkefølgen af to operationer (analogt til de to rotationer beskrevet ovenfor) ikke ignoreres. Som det simpleste eksempel kan vi tænke på Jordens overflade. Ligesom elastikken ovenfor var symmetrisk under rotationer i bordpladens plan, har Jordens overflade (hvis vi tænker på den som en perfekt kugle) en langt større symmetri. Vi kan hurtigt overbevise os om, at vi kan foretage tre forskellige rotationer, og ydermere, rækkefølgen, ved hvilken vi foretager rotationerne, betyder nu noget!

Yang-Mills-teori

Yang-Mills-teori er en generalisation af elektromagnetismen, hvor den simple en-parameter-gauge-symmetri er erstattet af gauge-symmetri baseret på ikke-abelske grupper. Det simpleste tilfælde, vi kan tænke på, beskriver netop bevægelse på overfladen af en kugle, og det er altså en tre-parameter-symmetri. Interessant nok har naturen valgt at benytte denne simpleste ikke-abelske generalisation af elektromagnetisme til at beskrive de svage vekselvirkninger. De stærke vekselvirkninger er beskrevet af en Yang-Mills-teori baseret på en større gruppe, der har otte parametre.

Til hver af de parametre, vi har beskrevet ovenfor, findes der en partikel. For den ene parameter af elektromagnetismen er der fotonen. For de tre parametre af de svage vekselvirkninger er der W- og Z-partiklerne. For de otte parametre, der beskriver gauge-gruppen for de stærke vekselvirkninger, er der otte såkaldte gluoner.

Vi kan forstå Coulombs elektrostatiske lov direkte som en udveksling af en foton mellem to ladninger. Tilsvarende giver en udveksling af en Z-partikel anledning til det statiske potential mellem to neutrinoer. En udveksling af en gluon mellem to kvarker ville naivt give os det statiske potential mellem to kvarker, men her er problemet mere kompliceret, da vekselvirkningerne netop er stærke. En enkelt gluon-udveksling giver et helt misvisende billede, der skal mange flere til.

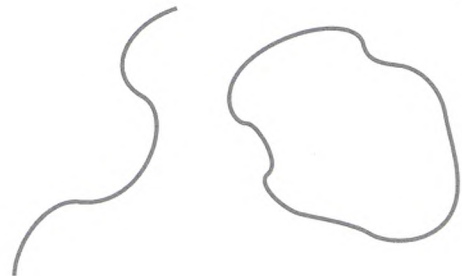
Analogien mellem Coulombs lov og Newtons tyngdelov

I løbet af 1950'erne og 1960'erne blev det langsomt klart, at også Newtons lov og – mere generelt – Einsteins generelle relativitetsteori kan forstås som udveksling af en masseløs partikel, gravitonen, mellem to masser. Her har vi den første præcise analogi mellem den elektrostatiske Coulomb-lov og Newtons tyngdelov, der blev nævnt i indledningen til denne artikel. Det er altså korrekt, at den formelle lighed mellem disse to lovmæssigheder bunder i noget dybt: udvekslingen af en masseløs partikel, enten en foton eller en graviton.

Specielt fysikeren R. P. Feynman udviklede i 1960'erne denne interessante vinkel på Einsteins generelle relativitetsteori. Det var samtidig klart, at dette udgangspunkt pegede kraftigt på paralleller til Yang-Mills-teorien, men det blev ikke muligt at formulere

tyngdekraften direkte og præcist i termer af Yang-Mills-teorien til trods for mange tapre forsøg. Et kritisk punkt er, hvilken gruppe teorien skulle være baseret på. Da billedet af tyngdekraft i termer af graviton-udvekslinger kun fungerer, hvis der blot er én graviton, burde vi altså søge en en-parameter-gruppe. Da gravitoner samtidig let kan vises at vekselvirke med hinanden, skal gruppen også være ikke-abelsk, og så går det ikke.

I dag har vi en helt ny forståelse af, hvorledes det egentligt hænger sammen. Vi har set, at hver ikke-abelsk gruppe vil føre til sin specifikke Yang-Mills-teori. Jo flere parametre gruppen har, des flere partikler vil udveksles. Er der en måde at finde et mere universelt sprog for disse ikke-abelske teorier, der ikke hænger sig i denne detalje? Overraskende nok er svaret ja. Denne opdagelse udsprang af noget helt praktisk, den mest effektive måde at regne fysiske processer ud på basis af Yang-Mills-teorien. Det blev således opdaget, at man kunne dele problemet op i to. Først regnes processerne ud i en besynderlig universel Yang-Mills-lignende teori med blot én parameter, derefter multipliceres resultatet med en konstant, der tager højde for præcis hvilken Yang-Mills-teori, det handler om.



Figur 2. Åbne og lukkede strenge.

Strengteorien

Denne “universelle” Yang-Mills-teori uden gruppefaktorer optræder naturligt i strengteori. Det blev tidligt indset, at teorien for såkaldt åbne strenge således indeholder Yang-Mills-teori i netop denne universelle form. Det var ligeledes klart, at teorien for såkaldt lukkede strenge også indeholder Einsteins teori for tyngdekraft, herunder specielt den krævede graviton. Forunderligt nok er teorien for lukkede strenge forbundet til teorien for åbne strenge. Groft set på følgende måde: teorien for lukkede strenge kan ses som produktet af to teorier for åbne strenge. I en vis forstand er det ikke mere mystisk, end at to stykker snore kan bindes sammen til at forme et lukket bånd.

En umiddelbar konsekvens af denne produktregel mellem lukkede og åbne strenge er, at spredning af partikler med gravitoner alternativt kan beskrives, på en helt præcis måde, som produktet af to spredninger i den universelle Yang-Mills-teori. Denne forbløffende observation holder stadig, når vi tager længden af strengene til nul. Med andre ord, den holder også i helt normal partikelfysik, uden reference til strengteori. Dette er intet mindre end en revolutionerende observation, for det betyder, at spredning i Einsteins generelle

relativitetsteori kan beskrives helt simpelt igennem relationen til spredning i Yang-Mills-teorien. Da Yang-Mills-teori (og elektromagnetisme) er kernen bag de øvrige fundamentale vekselvirkninger, forstår vi nu på en helt præcis måde, hvorledes tyngdekraften er knyttet til kræfterne mellem elementarpartiklerne. Her går der en lige linje fra Ørsted til Einstein.

Det skal her til sidst fremhæves, at denne nyligt opdagede forbindelse mellem tyngdekraft og gauge-teori (som fx elektromagnetismen) på ingen måde er af blot akademisk interesse. For blot få år siden observerede LIGO-eksperimentet i USA spektakulært, og for første gang nogensinde, tyngdebølger udsendt i forbindelse med sammensmeltning af to sorte huller langt ude i universet, en opdagelse, der i øvrigt kort tid efter førte til Nobelprisen. For at kunne analysere sådanne signaler kræves der beregninger i Einsteins generelle relativitetsteori af meget høj præcision. Disse beregninger er ekstremt komplicerede i den konventionelle formulering. Med forbindelsen mellem tyngdekraft og gauge-teori er disse beregninger pludselig blevet mulige i et omfang, man ikke kunne have forestillet sig for

blot få år siden. Således er Ørsteds opdagelse i 1820 overraskende blevet ganske central for frontforskning i tyngdebølger i 2020.

Litteratur

- [1] N. E. J. Bjerrum-Bohr (2014) "Amplituder og nye fundamentale teorier", *Kvant*, bind 25, nr. 2, side 14.
- [2] N. E. J. Bjerrum-Bohr (2015) "Tyngdekraft og kvante-teori", *Kvant*, bind 26, nr. 4, side 23.



Poul Henrik Damgaard er professor i teoretisk fysik ved Niels Bohr Institutet og leder af Niels Bohr Internationale Akademi.

KVANT-nyheder

Af Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Lasersimulationer viser dannelse af stof ud fra lys

LASERFYSIK. Det er kendt, at man kan få energi ud fra stof, hvilket Einsteins berømte ligning udtrykker: $E = mc^2$. Solens fusionsprocesser og atombombens fission skaber begge energi ud fra stof. Det omvendte, at skabe stof ud fra energi, er også muligt. Da universet lige var blevet dannet, skabte strålingskollisioner det første stof i form af partikel-antipartikel-par. Dannelsen af stof ud fra lys er en kompliceret proces, som endnu ikke har været vist i laboratoriet. Nu har simulationer vist, at en meget kraftig laser kan danne stof i form af partikel-antipartikel-par.

Forsøget går ud på at rette en meget kraftig laser mod et mål for at generere et stærkt magnetfelt. Laseren opvarmer elektronerne i målet, og accelererer dem til relativistiske energier. Der dannes et plasma, og den stærke elektronstrøm danner et magnetfelt, der er flere hundrede kT, hvilket er lige så kraftigt som på overfladen af en neutronstjerne. De laseraccelererede elektroner genererer intense høj-energi-røntgenstråler, der kolliderer i plasmaet, og kortvarigt producerer partikel-antipartikel-par. Magnetfeltet eksisterer kun i 100 fs, men set fra laserens reference er feltet kvasi-statisk, dvs. det virker som om, at det varer længere. Laseren, der skal bruges, skal ifølge simulationerne have en effekt på 4 PW (1 PW = 10^{15} W), hvilket er ekstremt kraftigt. Dog overraskede det forskerne, at simulationerne viste, at der ikke var brug for endnu højere lasereffekt for at skabe det kraftige magnetfelt.

På Extreme Light Infrastructure (ELI) i Rumænien findes verdens kraftigste lasere, der kan levere den krævede effekt, og det er planen, at ELIs lasere skal teste simulationerne om få år, når de er klar til det. Når forsøget udføres, vil det være første gang, at lys bliver brugt til at danne stof uden tilførsel

af høj-energi-elektroner, hvilket har været nødvendigt i tidligere forsøg. Forsøget vil derfor være tæt på de betingelser, der var til stede de første minutter efter Big Bang, og vil give forskerne et indblik i det tidlige univers' liv. Forskerne håber især at kunne studere antistof nærmere, da det stadig er et mysterium, hvorfor der er mere stof end antistof i universet, når der i teorien skulle være lige meget af hver.

Kilde: T. Wang m.fl. *Power Scaling for Collimated γ -Ray Beams Generated by Structured Laser-Irradiated Targets and Its Application to Two-Photon Pair Production*, *Physical Review Applied*, 13, 5, (2020).



Løsning til opgaven side 9

$$\begin{aligned}
 9 &= \frac{i(0I/0I) - 0I}{\wedge} \\
 9 &= \frac{6}{\wedge} - (\frac{6}{\wedge} \times \frac{6}{\wedge}) \\
 9 &= \frac{i(8/8) + 8}{\wedge} \\
 9 &= \frac{(L/L) - L}{\wedge} \\
 9 &= 9 - 9 + 9 \\
 9 &= (\frac{9}{9}) + \frac{9}{\wedge} \\
 9 &= \frac{7}{\wedge} + \frac{7}{\wedge} + \frac{7}{\wedge} \\
 9 &= \frac{8}{\wedge} - (\frac{8}{\wedge} \times \frac{8}{\wedge}) \\
 9 &= \frac{7}{\wedge} + \frac{7}{\wedge} + \frac{7}{\wedge} \\
 9 &= \frac{i(I + I + I)}{\wedge} \\
 9 &= \frac{i(0 + 0 + 0)}{\wedge}
 \end{aligned}$$

Inflation: En oprindelse for alt?

Martin S. Sloth, CP3-Origins, Center for Cosmology and Particle Physics, Syddansk Universitet

Spørgsmålet om oprindelsen af vores univers og dermed det ultimative spørgsmål om altings oprindelse er et af de mest fundamentale videnskabelige spørgsmål, man kan stille. Hvis det lykkes at finde en foreningsteori for alting, så må denne også rumme et svar på spørgsmålet om altings oprindelse.

Da Stephen Hawking var en ung ph.d.-student på treogtyve år, fandt han ud af, at det følger som en konsekvens af klassisk generel relativitetsteori, at universet lader til at være startet i en singularitet i rumtiden, lidt ligesom den type singularitet man finder inde i et sort hul, hvor rum og tid ophører med at eksistere i normal klassisk forstand.

Hawkings opdagelse understreger det grundlæggende problem i standard Big Bang-modellen. Inden for klassisk generel relativitetsteori er det vanskeligt at forstå universets begyndelsesbetingelser tæt på Big Bang. For at forstå universets oprindelse, så tænker vi normalt, at vi må have en teori for kvantegravitation, som tager over nær ved Big Bang, når energitætheden af universet er tilstrækkelig stor, og som erstatter klassisk generel relativitetsteori i disse ekstreme situationer, sådan at Hawkings singularitetsargument ikke længere gælder. Vi har endnu ikke en endelig teori for kvantegravitation og derfor heller ikke en entydig forståelse af universets oprindelse endnu.

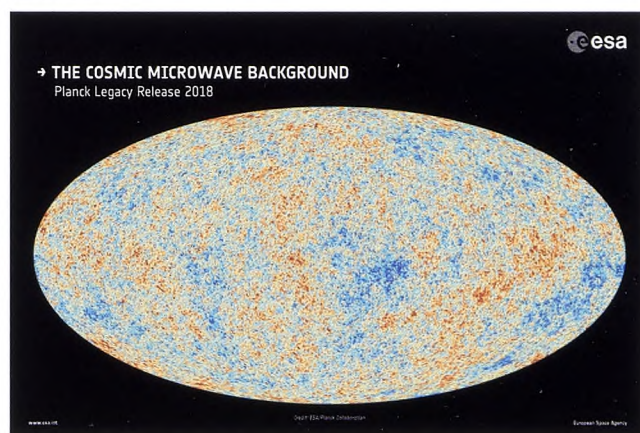
Det ville måske være ok, hvis vores univers ikke afhang særlig meget af begyndelsesbetingelserne nær ved Big Bang, og at meget generelle antagelser om universet lige efter Big Bang ville være nok til at kunne forklare oprindelsen af vores univers. Hvis det var tilfældet, så kunne vi lave forudsigelser for egenskaberne af vores univers uden at kende detaljerne omkring teorien for kvantegravitation. Men dette er ikke tilfældet. Uden en teori for begyndelsen, så er standard Big Bang-teorien ikke komplet og rummer kun en mere begrænset videnskabelig forudsigelseskraft.

Alligevel er vi overbeviste om, at Big Bang-teorien er korrekt, og det er paradoksalt, at det er – som vi vil se nedenfor – det samme fysiske fænomen, som både rummer den mest overbevisende evidens for Big Bang-teorien, og samtidigt leder til standard Big Bang-teoriens andet store problem i tillæg til singularitetsproblemet.

Evidens for Big Bang-teorien

Den første observationelle evidens for Big Bang-teorien kom, da Edwin Hubble i 1929 opdagede, at universet udvider sig. Hvis universet udvider sig i dag, så må det logisk nok have været i en tættere og varmere tilstand i fortiden. Men Hubble målte ekspansionshastigheden til at være flere gange højere, end vi måler den til nu, hvilket betød, at universet ifølge Hubbles observationer ville være yngre end Jordens alder på 4,5 milliarder år. Da man allerede på det tidspunkt havde geologiske

metoder til at fastslå Jordens alder, ledte det Fred Hoyle og andre til at foreslå en alternativ teori til Big Bang-teorien, steady-state-modellen. I denne model udvider universet sig samtidigt med, at der kontinuert skabes nyt stof, sådan at energitætheden holdes konstant, og universet altid har udvidet sig på samme måde med samme temperatur og er altså ikke startet i en Big Bang-tilstand.



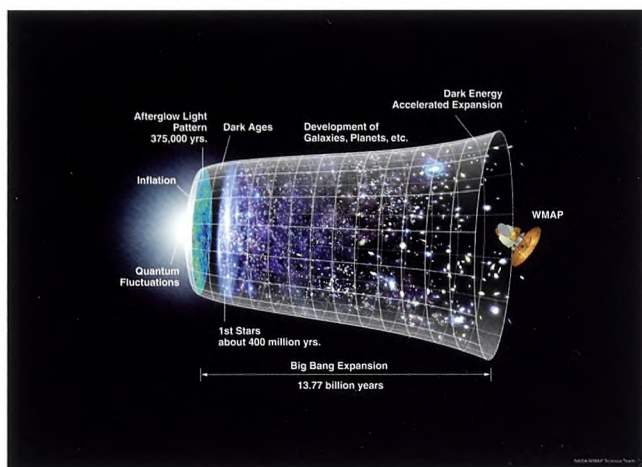
Figur 1. Anisotropier i den kosmiske mikrobølgestrålning observeret med ESAs Planck-mission, og som viser et øjeblikbillede af det ældste lys i universet, da det kun var 380.000 år gammelt. Anisotropierne er små temperatursvingninger, der svarer til regioner med lidt forskellige densiteter, der repræsenterer de fremtidige strukturer, nemlig dagens stjerner og galakser.

Mens observationerne af universets udvidelse langsomt blev bedre med bedre teleskoper og bedre forståelse af de stjerner, som man brugte til at bestemme afstande med, og den observerede ekspansionshastighed langsomt blev konsistent med Jordens alder, så forudsagde George Gamow og Ralph Alpher i 1948 den kosmiske mikrobølgebaggrundsstrålning som en teoretisk konsekvens af Big Bang-teorien.

Hvis man tænker sig, at man spoler tiden baglæns tilbage mod begyndelsen, så vil universet trække sig sammen, indtil det bliver et meget varmt og sammenpresset plasma, hvor temperaturen er højere end bindingsenergien af hydrogenatomet. I dette plasma vil elektroner ikke være bundet til protonerne i elektrisk neutrale hydrogenatomer, og fotoner vil hele tiden vekselvirke med de elektrisk ladede partikler på vej gennem universet, som på dette tidspunkt derfor ikke er transparent for fotoner (lyspartikler). Senere, ca. 380.000 år efter Big Bang for 13,8 milliarder år siden, blev universet transparent for fotoner, fordi den kosmiske ekspansion fik temperaturen til at falde, sådan at

neutrale hydrogenatomer blev dannet, og fotonerne blev ikke længere stoppet af elektrisk ladede partikler på deres vej gennem universet. Man kan sige, at universet for 13,8 milliarder år siden efterlod et snapshot af sig selv i form af fotoner, der har rejst uhindret igennem universet fra da af og frem til i dag, mens de langsomt blev koldere pga. universets ekspansion. Disse fotoner, som altså er et levn fra Big Bang, udgør den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, som vi kan observere i dag.

Selvom George Gamow og Ralph Alpher i 1948 var de første til at forudsige den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling teoretisk, så blev idéen glemt igen, indtil Robert Dicke, James Peebles, P.G. Roll og David Wilkinson og også Yakov Zel'dovich og Fred Hoyle sammen med R. J. Taylor uafhængigt genopdagede teorien i starten af 60'erne. Dette var kort før, at de to ingeniører Arno Penzias og Robert Wilson i 1965 målte støj på deres antenne, som de efter elimination af andre støjkluder – såsom fugleloft på deres antenne – måtte konkludere kun kunne komme fra kosmos. Det blev hurtigt klart for Arno Penzias og Robert Wilson, at de havde observeret den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling ved et tilfælde – ekkoet fra Big Bang, som det også sommetider populært kaldes. De fik Nobelprisen for opdagelsen af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling i 1978. I 2006 gik Nobelprisen i fysik desuden til COBE-eksperimentet, der for første gang målte det præcise spektrum af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, og i 1992 også opdagede små temperaturfluktuationer i spektret. James Peebles fik Nobelprisen i 2019 for sine bidrag.



Figur 2. En repræsentation af universets udvikling gennem 13,8 milliarder år. Helt til venstre skildres det tidligste øjeblik, vi nu kan undersøge, da en periode med inflation frembragte en ekstremt hurtig vækst i universet. (Størrelsen er indikeret med det lodrette gitter). I de næste flere milliarder år bremsede udvidelsen af universet gradvist. For nylig er udvidelsen begyndt at accelerere igen, domineret af mørk energi. Eftergløden fra Big Bang, der blev observeret af WMAP, blev udsendt ca. 380.000 år efter inflationen og har krydset universet stort set uhindret siden da.

Det var dermed opdagelsen af den kosmiske mikrobølgestråling i 1965, som én gang for alle lagde Fred Hoyles konkurrerende teori i graven og etablerede Big Bang-teorien som standardteorien for vores univers. Målinger af universets ekspansionsrate var blevet mere

præcise og var nu konsistente med, at universet er meget ældre end Jorden, og fjernede noget af motivationen for Hoyles konkurrerende teori. Men den kosmiske mikrobølgestråling er en unik forudsigelse i Big Bang-modellen og en "smoking-gun" for Big Bang-teorien. Opdagelsen af mikrobølgestrålingen kunne slet ikke forklares uden, at universet har været i en varm og tæt tilstand, hvor universet var ugennemtrængeligt for fotoner og kunne beskrives som et sortlegeme og dermed forklare, hvorfor vi ser kosmisk stråling i dag med et meget præcist sortlegemespektrum.

Opdagelsen af den kosmiske mikrobølgestråling rummer altså det endelige bevis for Big Bang-teorien, men som antydte ovenfor, så rummer mere præcise målinger af den kosmiske mikrobølgestråling også en af standard Big Bang-teoriens største udfordringer. Et sortlegemespektrum er karakteriseret ved en temperatur. Når vi måler denne temperatur af den kosmiske stråling, som kommer fra forskellige retninger på himlen, så måler vi den samme temperatur til meget høj præcision (2,725 Kelvin) i alle retninger. Først ude på fjerde decimal ser vi variationer afhængigt af retningen, vi kigger.

Problemer for standard Big Bang-modellen

Der er et fundamentalt problem med denne observation i standard Big Bang-modellen. Siden universet først blev gennemtrængeligt for lys, da den kosmiske mikrobølgestråling blev skabt, så følger det, at den kosmiske baggrundsstråling også er både den ældste og længst-væk-fra-kommende elektromagnetiske stråling, som vi rent faktisk kan observere. På det tidspunkt, kun 380.000 år efter Big Bang, da den kosmiske mikrobølgestråling blev skabt, var universet meget mindre, da lys kun havde haft 380.000 år at rejse i. Størrelsen af vores observerbare univers er nemlig defineret ved, hvor langt lys har kunnet rejse siden Big Bang. Et væsen, der havde levet på det tidspunkt (hvis det havde kunnet lade sig gøre — universet var 3000 Kelvin på det tidspunkt), ville altså have kunnet se meget kortere og have observeret et meget mindre univers. Dette væsen ville på det tidspunkt have set et univers, som var 1/1.000.000 del af vores nuværende synlige univers. Vores nuværende synlige univers var altså 1.000.000 små uafhængige universer på det tidspunkt, da den kosmiske mikrobølgestråling blev skabt. Men hvis det er sandt, at ikke engang lys kunne have nået på tværs af de her 1.000.000 uafhængige universer, så er der ingenting, der ville have kunnet, og vi ville ikke forvente, at de har noget som helst tilfælles. Med andre ord, så ville vi forvente, at de havde vidt forskellige temperaturer, og når vi ser tilbage på dem i dag, hvor det observerbare univers er blevet større, og vi kan observere den kosmiske mikrobølgestråling fra dem alle, afhængigt af hvilken retning vi kigger, så ville vi forvente at observere vidt forskellige temperaturer afhængigt af retningen, vi kigger i. Men det gør vi ikke. Temperaturen er den samme i alle retninger!

Det er, som hvis vi var ankommet til en fest med 1.000.000 mennesker meget præcist klædt i nøjagtigt det samme tøj helt ind til underbukserne. Vi ville anta-

ge, at de havde modtaget en invitation inden festen med en dresscode eller på anden vis havde kommunikeret med hinanden. Hvis de påstod, at det var et tilfælde, at de mødte op alle 1.000.000 iklædt det samme tøj med så stor præcision, så ville vi ikke tro dem. Vi ville tænke, at de skjuler information for os om den fælles dresscode. På samme måde tænker vi, at det er umuligt, at alle 1.000.000 områder af universet, som vi i dag måler til at have meget nøjagtigt den samme temperatur, ikke har kommunikeret sammen eller modtaget en fælles besked på det tidspunkt 380.000 år efter Big Bang, da strålingen blev til. Paradokset i standard Big Bang-modellen er, at det jo tilsyneladende vil kræve kommunikation hurtigere end lysets hastighed at forklare, hvorfor temperaturen er ens i alle retninger!

Kosmisk inflation

Alan Guth var i 1981 den første til at komme med en løsning på dette paradoks. Han forstod som den første, at hvis universet har udvidet sig med en accelereret ekspansion i starten, så vil information have kunnet sprede sig hurtigere i universet og områder, som tilsyneladende ikke burde kunne have kendt til hinandens eksistens, har været i kausal kontakt med hinanden. Sådan en periode med accelereret ekspansion i det tidlige univers, kaldet kosmisk inflation, er med andre ord den invitation, hvor dresscoden stod skrevet på, som blev sendt ud inden festen.

Kosmisk inflation er en succesfuld teori for det tidlige univers. Ikke alene løser teorien kausalitetsproblemet i standard Big Bang-teorien, men den forudsiger også et spektrum af temperatur-variationer i den kosmiske mikrobølgestråling, som med rigtig høj præcision passer med vores efterfølgende eksperimentelle observationer. Kosmisk inflation er derfor vores foretrukne teori for, hvordan universet startede.

Inflationsteorien har også en anden attraktiv egenskab. Som Hawking påpegede, så kan vi ikke forstå, hvordan universet er startet uden først at forstå kvantegravitation. Men forudsigelserne i inflationsteorien er helt uafhængige af, hvordan inflation startede, eller hvad der kom før. Det betyder, at vi kan forstå egenskaberne af vores univers uden at løse problemet med kvantegravitation først. Vi behøver blot at antage, at nogle meget generelle betingelser var tilstede for, at inflationsperioden kunne starte i udgangspunkt. På denne måde skjuler inflationsteorien det andet af de grundlæggende problemer i standard Big Bang-modellen, nemlig hvordan universet startede nær ved Big Bang-singulariteten. Inflationsteorien giver ikke en komplet forståelse af universets oprindelse, men den tilbyder en komplet forståelse af universets egenskaber, sådan som vi observerer dem.

I den simpleste version af inflationsteorien er alt stof og struktur i universet skabt af et enkelt felt, og ved at forstå kvantefluktuationer af dette felt under inflationsperioden, kan vi forstå oprindelsen af alt stof og struktur i universet. I denne forstand kan inflationsteorien ses som endnu en foreningsteori, da den giver en forenet forklaring for altings oprindelse. Men dybest set er den mere et udslag af almindelig reduktionistisk

videnskabelig tankegang. Vi kan sagtens forestille os, at inflation involverede flere felter, men så længe den simpleste model er nok til at forklare data, så ser vi ingen grund til at antage en mere kompliceret model.

Kosmologer tester denne simpleste inflations-teori ved at se efter ikke-Gaussiske temperaturvariationer i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, isocurvature-variationer (variationer ude af sync med selve inflationsfeltet), og andre effekter som ikke kan forklares med blot ét inflationsfelt. På denne måde kan vi teste inflationshypotesen og også få bedre indsigt i detaljerne af den fysik, som gjaldt lige efter Big Bang, da universet havde en energitæthed så høj, som vi nok aldrig nogensinde kommer til at kunne studere i en menneskeskabt accelerator.

Forudsigelser fra inflations-teorien

Den vigtigste forudsigelse af den simpleste inflations-teori er, at tyngdebølger også skulle være blevet skabt under inflationsperioden, og de skulle have sat et aftryk i polariseringen af den kosmiske mikrobølgestråling. Vi har endnu ikke observeret dette aftryk, men ser vi det, så får vi til gengæld adgang til meget præcis information om inflationsperioden, og vi vil for eksempel kunne bestemme den præcise energitæthed i universet under inflationsperioden. Dette ville være en “smoking gun” for inflations-teorien, og nok også overbevise Nobelpriskomiteen om inflations-teoriens rigtighed. Men indtil da må vi leve med, at der også er alternativer til inflations-teorien i spil.

Ud over muligheden for at flere felter end inflationsfeltet er nødvendige for at forstå dynamikken lige efter Big Bang, så er det også muligt, at hele inflationsidéen er forkert. En alternativ mulighed er den såkaldte præ-Big Bang-teori, hvor universet først trak sig sammen for så at begynde at udvide sig igen. I denne teori er Big Bang øjeblikket, hvor universet går fra at trække sig sammen til at udvide sig igen. Frøene til alt stof og struktur er sået i fasen før Big Bang ved hjælp af det, som vi kalder en curvaton-mekanisme. Curvatonen er det felt, der erstatter inflationen som årsagen til alt stof og struktur i disse teorier (curvatonen kan også have denne funktion i inflations-teorier med flere felter, hvor inflationen ikke gør hele jobbet alene). Filosofien i denne type teorier for universets skabelse er derfor også helt modsat filosofien bag inflations-teorien. En teori for kvantegravitation er nødvendig for at forklare hvordan universet går fra at trække sig sammen til at udvide sig igen, og teorien er ikke komplet uden en forståelse af dette intermezzo. Mens vi husker, at i inflations-teorien blev det spekulative skabelsesøjeblik i kvantegravitationens domæne skubbet til et fjernt irrelevant øjeblik før inflationsperioden, så sker dette kvantegravitationsmirakel midt i det hele i præ-Big Bang-scenariet. Derfor er forudsigelserne i præ-Big Bang-modellen afhængige af, at den endelige teori for kvantegravitation skal fortælle os, hvordan dette “big-bounce” finder sted. Siden teorien for kvantegravitation ikke er endeligt kendt, så giver det en stor usikkerhed i denne type af forklaringer, som også har gjort dem mindre populære blandt forskere end inflations-teorien,

som er mere under kontrol med de metoder, som vi kender.

Men naturen må antages at være ligeglad med, hvor gode vi er til at forstå kvantegravitation, og i sidste ende er det observationer, der vil fælde dommen over hvilken teori for universets oprindelse, som er rigtig. I curvaton-modellen er der ikke noget aftryk af gravitationelle bølger i polariseringen af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, men til gengæld er der en unik signatur af ikke-Gaussiske fluktuationer i mikrobølgebaggrundsstrålingen, som kan bruges til at teste, om den ene eller den anden teori er korrekt.

Litteratur

- [1] A. A. Penzias og R. W. Wilson (1965) "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s". *Astrophysical Journal*, bind **142**, side 419–421.
- [2] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll og D. T. Wilkinson (1965) "Cosmic Black-Body Radiation", *Astrophysical Journal*, bind **142**, side 414–419.
- [3] S. W. Hawking (1966) "Properties of Expanding Universes", PhD thesis, University of Cambridge.

- [4] A. H. Guth (1981) "The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems", *Phys.Rev.*, bind **D23**, side 347–356.
- [5] M. Gasperini og G. Veneziano (1993) "Pre-big bang in string cosmology", *Astropart. Phys.*, bind **1**, side 317.
- [6] K. Enqvist og M. S. Sloth (2002) "Adiabatic CMB perturbations in pre-big bang string cosmology" *Nucl. Phys. B*, bind **626**, side 395.



Martin S. Sloth er professor ved CP3-Origins, Center for Cosmology and Particle Physics, på Syddansk Universitet.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Aug 2020				
31/8	18.15	Fra Gagarin til Mogensen – bemandede rummissioner og deres bidrag til videnskaben	Flemming Hansen	AS (Kbh)
Sep 2020				
7/9	19.15	Fra Gagarin til Mogensen – bemandede rummissioner og deres bidrag til videnskaben	Flemming Hansen	AS (Aarh)
7/9	19.30	Ørstedes bidrag til det danske sprog	Frans Gregersen	SNU
7/9	18.15	Det kolde og støvede univers – infrarøde øjne i rummet	Jes Kristian Jørgensen	AS (Kbh)
14/9	19.15	Det kolde og støvede univers – infrarøde øjne i rummet	Jes Kristian Jørgensen	AS (Aarh)
14/9	18.15	Vores fremtid i rummet – rumforskning og rumfart i de kommende årtier	Michael Linden-Vørnle	AS (Kbh)
21/9	19.15	Vores fremtid i rummet – rumforskning og rumfart i de kommende årtier	Michael Linden-Vørnle	AS (Aarh)
21/9	19.30	Hvad er magnetisme, og hvad er elektromagnetisme	Steen H. Hansen	SNU
21/9	18.15	Mørkt stof og mørk energi i fokus – Europas rummission Euclid	Michael I. Andersen	AS (Kbh)
28/9	19.15	Mørkt stof og mørk energi i fokus – Europas rummission Euclid	Michael I. Andersen	AS (Aarh)
28/9	18.15	Syngende stjerner og exoplaneter – rumteleskoperne Kepler og TESS	Rasmus Handberg	AS (Kbh)
Okt 2020				
15/10	19.15	Syngende stjerner og exoplaneter – rumteleskoperne Kepler og TESS	Rasmus Handberg	AS (Aarh)
19/10	19.30	Foredrag ved guldmedaljemodtager i fysik (tentativt)	NN	SNU
Nov 2020				
2/11	19.30	Om magnetometer	Chris Finlay	SNU
23/11	19.30	Ørstedes erkendelsesteori og metafysiske erindringer	Anja Skaar Jacobsen	SNU
Dec 2020				
14/12	19.30	Ørsted, Tesla og Faraday	Hans Buhl	SNU

AS (Kbh): Astronomisk Selskab (Kbh), CSS, Gammeltorvgade 15, 1353 København K, lokale 35.-1.05 (astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astronomisk Selskab (Aarh), Auditorium E, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, 8000 Aarhus C.

SNU: Aud. 1, H. C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturlæren.dk, facebook.com/SNU1824).

Foreningen af naturens kræfter længe efter Ørsted

Kristján Gulbrandsen, Troels C. Petersen og Børge Svane Nielsen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Ligesom Ørsteds opdagelse af elektriske strømmes indflydelse på magnetnåle og de efterfølgende mange års eksperimenter førte til en indsigtssrig matematisk forståelse af elektromagnetismen, har vi i årtier arbejdet inden for partikel- og kernefysik på at beskrive og forstå, hvordan de fire kendte naturkræfter kan sættes på de samme formler. Eksperimenterne ved LHC-acceleratoren ved CERN har givet os et væld af nye data, som både har cementeret den gængse Standardmodel for partikler og kræfter, og samtidig lagt grundlaget for at se videre ind i det hidtil ukendte. Vi skriver i denne artikel om landvindinger i forståelsen af en ny stoftilstand, kvark-gluon-plasma, og om status og implikationer af udforskningen af Higgs-bosonen.

Fra Ørsted til de fire naturkræfter

Da H. C. Ørsted i 1820 endelig, efter flere måneders tøven, satte sig for at undersøge den effekt, han havde noteret sig tidligere, nemlig at elektriske strømme havde en indflydelse på en magnetnål, tog han det første skridt imod at forstå alle naturens kræfter ved hjælp af en samlet formalisme [1]. Der var lang vej herfra til nutidens store spørgsmål inden for partikelfysikken, men første skridt var taget. I dag har vi en anderledes matematisk og kompliceret forståelse, som i mellemtiden er beriget med helt nye begreber som elektromagnetiske bølger, relativitetsteori og kvantemekanik, men vi slås stadig med at beskrive den kendte verden med så få begreber som muligt. Vi vil i denne artikel beskrive nogle af tidens vigtigste eksperimentelle bidrag til en sådan samlet beskrivelse i nyere partikel- og kernefysik.

På Ørsteds tid havde man i over et århundrede kendt Newtons utroligt indsigtfulde beskrivelse af tyngdekraften som en tiltrækning imellem to tunge legemer, som var rettet langs en linje imellem legemerne og med en styrke, som aftog med kvadratet på afstanden. Dette var en simpel læresætning, som jo virker helt til i dag, når man lige husker at medtage effekter fra den generelle relativitetsteori. Det kom derfor som lidt af et chok, da først Ørsted og siden mange andre indså, dels at elektriske strømme udstråler et magnetfelt, og dels at dette ikke opfører sig som dannet af en punktkilde eller en samling af sådanne. Kraften var rettet vinkelret på den strømførende ledning og altså ikke rettet mod punkter på ledningen. Det blev efterhånden klart, at man stod sig bedst ved at indføre et feltbegreb, som betød, at hele verdensrummet skulle gennemsyres af de lidt svært forklarlige felter, som kunne vekselvirke med materielle stoffer, såsom elektroner i en ledning eller et vakuumrør. Felterne kunne oven i købet vekselvirke med sig selv, således at elektriske felter havde en indflydelse på magnetiske felter og vice versa.

Siden de elektromagnetiske felters århundrede i 1800-tallet og indførelsen af relativitetsteorien og kvantemekanikken i 1900-tallet, har vi bygget en teori op, som kan forklare ikke bare de elektromagnetiske kræfter i en moderne kvantefeltteori, men også de nye kræfter, vi har lært at kende fra den atomare verden, nemlig de stærke og svage kernekræfter. Den stærke kernekraft er nødvendig for at forklare, hvordan pro-

toner og neutroner kan holdes sammen i atomkerner uden at disse bliver revet itu af de frastødende elektriske kræfter imellem protonerne. Den svage kernekraft er indført for at beskrive, hvordan radioaktive henfald sker med omdannelse af en type partikler til andre (fx neutroner til protoner). Som antydning i ordvalget, er den stærke kernekraft meget stærkere end den elektromagnetiske på de afstande, der findes i atomkerner, mens den svage kernekraft er flere millioner gange svagere og kun virker ved utroligt korte afstande.

Ligesom for elektromagnetismen er meget forskning gået ind i at beskrive hver af de fundamentale kræfter eksperimentelt og at udvikle teorier for dem. Da teorierne alle er bygget op som kvantefeltteorier, har man også brugt mange kræfter på at lave beskrivelser, som udnytter lighederne i de individuelle teorier til at knytte dem sammen i fælles beskrivelser. Dette er i høj grad inspireret af Maxwells flotte matematiske opstilling i fire ligninger, som beskriver sammenhængen imellem elektriske og magnetiske felter og elektriske ladninger, og dermed ikke kun sammenskriver Ørsteds og andres observationer, men også beriger vores viden med nye begreber, såsom elektromagnetiske bølger. Den samlede beskrivelse af de elektromagnetiske og svage vekselvirkninger kaldes den "elektrosvage teori". Den såkaldte Standardmodel forudså eksistensen af to nye tunge partikler for at forklare den meget korte rækkevidde af de svage kernekræfter. Fundet af W- og Z-partiklerne bekræftede på smuk vis denne teori, ligesom opdagelsen af Higgs-bosonen i dette årtusinde understregede, at vi er på rette spor. Det gav os også mod til at forsøge at inkludere de sidste to kræfter, den stærke kernekraft og tyngdekraften, i familien af 'forenede' kræfter, på trods af klare forskelle i deres måde at udtrykke sig på. Den stærke kernekraft er allerede beskrevet ved en kvantefeltteori kaldet QCD (Quantum Chromo Dynamics), mens tyngdekraften er beskrevet ved den almene relativitetsteori, men ikke har en beskrivelse i kvanteverdenen.

I Maxwells ligninger indgår elektriske og magnetiske felter samt elektriske ladninger, men som bekendt ikke magnetiske ladninger. Partikler med masse indgår heller ikke, da massebegrebet tilhører en anden begrebsverden, der følger Newtons love. I kvantefeltteorier indgår der dog et energibegreb, og der kommer så yderligere det til, at bølger i visse situationer må

beskrives som partikler, og at kræfterne imellem partikler må opfattes som energi-kanter, der udveksles. Vi siger, at kræfterne bæres af partikler. I tilfældet elektromagnetisme er det den masseløse foton, der er den kraftbærende partikel. For svage kernekræfter er det de tunge W- og Z-bosoner, mens de stærke kernekræfter er resultatet af udveksling af gluoner. Der er ligheder, men også væsentlige forskelle på disse kræfter på trods af den fælles underliggende kvantefeltteori.

Vi skal i det følgende beskrive egenskaberne ved først de stærke kernekræfter og siden de elektrosvage vekselvirkninger og vise, hvorledes begge områder stadig udfordrer os eksperimentelt. Hvor langt er vi i vores viden, og hvad mangler vi at forstå? Vi vil også se på hvilke eksperimentelle landvindinger, vi kan forvente i de næste årtier.

Aktuel forskning i den stærke kernekraft.

Den stærke kernekraft ytrer sig ved, at den binder bestanddelene af visse partikler (kaldet kvarker) sammen i fx protoner og neutroner. Den er desuden (og det var oprindeligt årsagen til at indføre den) ansvarlig for at holde protoner og neutroner sammen inde i en atomkerne på trods af en meget betydelig elektrisk frastødning imellem protonerne. Af den grund kalder vi den for "den stærke kernekraft", da den er ca. 100 gange stærkere end den elektromagnetiske kraft, når afstanden er på størrelse med en atomkerne.

Den stærke kernekraft er beskrevet ved en teori, vi kalder kvantekromodynamik, QCD. Ligesom fotonen i kvanteteorien for de elektromagnetiske kræfter udgør den partikel, der overfører kraften mellem positivt og negativt ladede partikler, findes der en kraftbærer for den stærke kernekraft, som kaldes en gluon. Analogt til den elektriske ladning for elektromagnetismen, har den stærke kraft en "farve"-ladning. Det kaldes "farve", fordi der findes tre typer ladning (rød, grøn og blå) snarere end én som for elektromagnetismen. Valget af ordet "farve" er inspireret af de tre primærfarver. En yderligere og dybtgående forskel mellem elektromagnetisme og den stærke kernekraft er, at gluonerne selv har "farve", mens fotoner er elektrisk neutrale. Det betyder, at mens fotoner ikke direkte kan interagere med hinanden, påvirker gluoner hinanden i høj grad. Dette giver anledning til mange yderligere interaktioner, der igen gør den stærke kraft til det, den er, nemlig meget stærk. Figur 1 viser kraftlinjerne mellem to tiltrækkende elektriske ladninger og to tilsvarende farveladninger. Kraftlinjernes tæthed er meget højere mellem to farveladninger, og de laver et "farve-rør" mellem ladningerne. Tætheden falder aldrig langs røret mellem ladningerne, og det betyder, at der er en konstant kraft uafhængigt af afstanden imellem ladningerne. Energien, der skal til for at adskille de to ladninger, vokser lineært med afstanden og overskrider til sidst hvilemassen af to kvarker. Når det sker, produceres et nyt kvark-antikvark-par, der forbinder sig til to farveløse systemer bestående af kvarker. Det oprindelige farve-rør opløses, og der dannes to nye. På grund af dette fænomen kan enlige kvarker (uden andre kvarker omkring sig inden for afstande på størrelse af

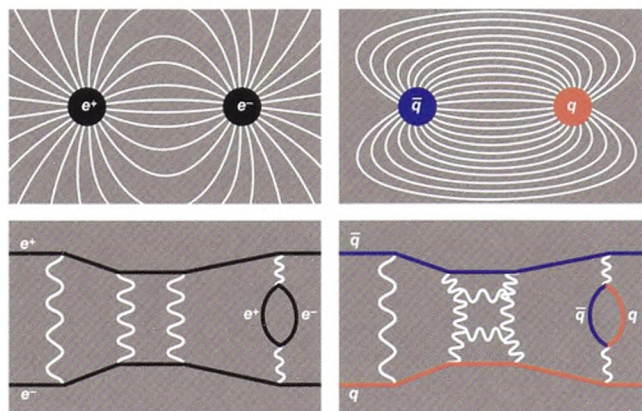
en proton) ikke findes i naturen. Dette træk ved den stærke kraft kaldes "indespærring" (confinement). Til gengæld vil kvarker, der er meget tæt på hinanden, vekselvirke relativt svagt, fordi der ikke er "plads" til så mange gluoner. Vi kalder det "asymptotisk frihed". Opdagelsen heraf vandt en Nobelpris i 2004.

Teorien om kvantekromodynamik har været meget succesfuld til at beskrive den stærke kraft. Det er en matematisk kompliceret teori at håndtere, og nøjagtige løsninger er ikke mulige. For at studere de grundlæggende vekselvirkninger imellem kvarker, kan man imidlertid anvende perturbationsteori, som også kendes andre steder, når man skal beregne ting i kvantemekanikken, som ikke kan løses analytisk. I perturbationsteori tilnærmer man systemet til et, hvor man kender en nøjagtig løsning, hvorefter man kan tilpasse sine løsninger iterativt med stadig mindre rettelser. Igennem det sidste halve århundrede er mange parametre, der involverer de grundlæggende vekselvirkninger mellem partikler, blevet målt i eksperimenter til ekstrem høj præcision, og sammenligning med de tilsvarende beregninger ud fra teorien har hidtil bekræftet dens nøjagtighed. Kvantekromodynamik er derfor en veletableret beskrivelse af den stærke kernekraft.

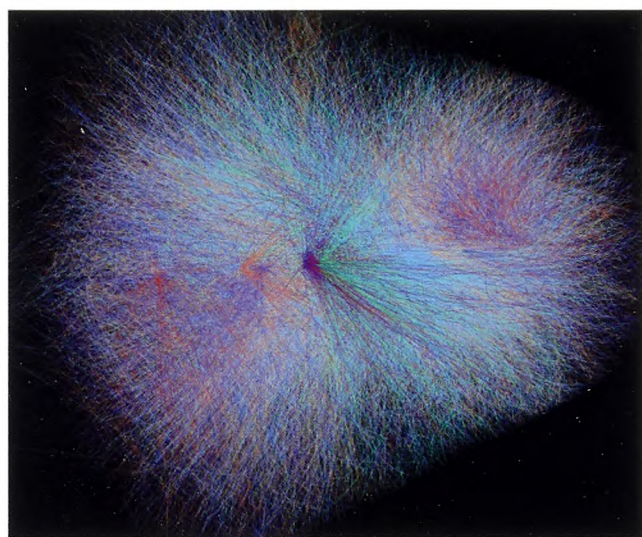
Der findes dog en komplikation med teorien, når man ønsker at studere kollektiv opførsel af mange partikler, der vekselvirker via den stærke kernekraft. Den kollektive adfærd har stor interesse, da det var den måde, universet tog sig ud kort tid efter Big Bang, og en forståelse af den kan kaste lys over den videre udvikling af universet. Fænomenerne involverer imidlertid generelt et stort antal vekselvirkninger med små impulsoverførsler. I dette tilfælde mislykkes perturbationsteorien, idet de mange små perturbationer tilsammen bliver så store, at forudsætningerne for beregningerne bryder sammen. Der findes dog en anden metode at udføre disse beregninger på, men det indebærer enorme mængder computerkraft. Derfor forenkler man ofte teorien, når man vil beskrive de kollektive effekter. Forenklingerne giver anledning til unøjagtigheder, men de giver trods alt forudsigelser, som kan sammenlignes med eksperimenter.

For at studere fænomenerne i det tidlige univers her på Jorden, skal stof komprimeres, så afstandene mellem kvarkerne er kortere end den længde, der skal til for at bryde "farve-røret". Vi skal ind i regimet for asymptotisk frihed, hvor man kan opfatte stoffet som en kvark-gluon-suppe snarere end en samling af protoner og neutroner. Det opnås ved at kolliderer tunge ioner af fx bly sammen med næsten lysets hastighed. Den resulterende kollision producerer et medium med en ekstrem høj energitæthed bestående af kvarker, der interagerer via et meget stort antal gluoner. Når det er skabt, udvider mediet sig meget hurtigt og bliver hurtigt mindre tæt. Når tætheden når under et vist niveau, produceres der igen "farveløse" partikler, som vi kan se i vores detektor – såsom protoner og neutroner, men også mange andre partikler. Idet mediet ekspanderer fra den supertætte kvark-gluon-suppe til at blive normalt stof, gennemgår det en række trin, som vi ikke kan følge i detaljer, men nogle observerbare størrelser indehol-

der trods alt information om det supertætte mediums kollektive opførsel. Således kan vi bruge forekomsten af forskellige partikler og deres impuls og rumlige fordeling til at uddrage information. Det er derefter op til eksperimenterne at måle disse størrelser.



Figur 1. Kraftlinjer dannes mellem (venstre) tiltrækkende elektriske ladninger og (højre) farveladninger. Kraftlinjerne ligger meget tættere mellem farveladningerne, hvilket resulterer i et farverør imellem farveladningerne. Den høje tæthed af linjer skyldes de ekstra vekselvirkninger mellem gluonerne, fordi disse har farveladning – i modsætning til fotoner, der er elektrisk neutrale (vist nederst) [2].



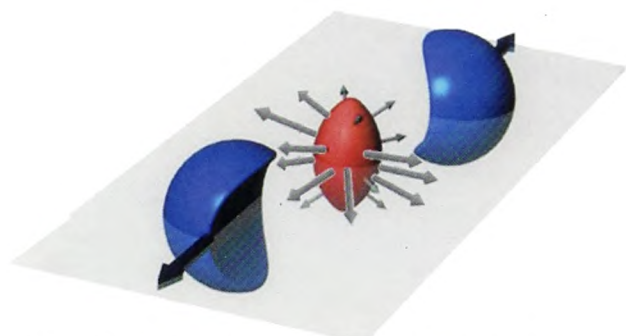
Figur 2. Simulerede partikelspor, der dannes i fire samtidige tungionskollisioner. Stort set alle disse partikler skal måles, så man kan beregne deres impulser og hastigheder.

For at gøre det skal man i sine eksperimenter med tungionskollisioner identificere så mange som muligt af de partikler, der skabes i sammenstødet som efterfølgere af det ekspanderende medium. Det kræver meget komplekse detektorer med ekstremt høj rumlig opløsning og en måde, hvorpå man kan måle partiklernes impuls og hastighed. Et eksempel på en sådan detektor er ALICE-detektoren ved LHC-acceleratoren ved CERN. Her er vi i stand til individuelt at identificere banerne på ca. 20.000 partikler i en enkelt kollision som vist i figur 2. Derudover skal der registreres en masse sammenstød, så man kan analysere målingerne statistisk. Da kollisionerne forekommer med høj rate,

skal detektoren også være i stand til at adskille hvilke partikler, der kom fra forskellige kollisioner, men efterlod et spor i detektoren på samme tid.

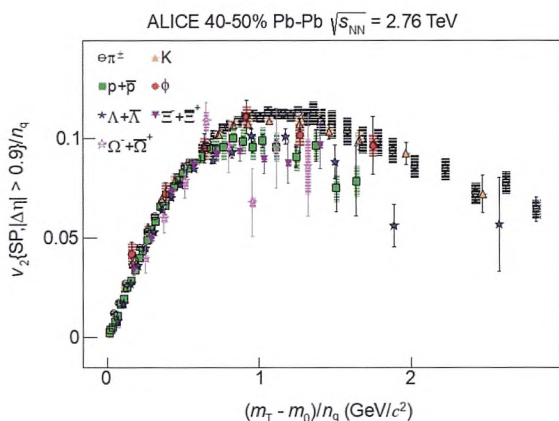
Ved at studere partiklerne, der strømmer ud fra kollisioner af tunge ioner, kan en række observable konstrueres, der relaterer til den oprindelige kollision. Simple målinger såsom blot at tælle antallet af partikler, der blev skabt, tillader én at vurdere den energitæthed, der blev nået i det lille kollisionsvolumen. Man finder, at det er ekstremt varmt – 100.000 gange varmere end i Solens indre. Fra QCD-beregninger ved vi, at dette bør være varmt nok til at smelte normalt kernestof til et plasma af sine bestanddele – kvarker og gluoner. Denne nye tilstandsform af kernestof kalder vi et kvark-gluon-plasma (QGP) [3].

Når kvark-gluon-plasmaet er skabt, får det indflydelse på dannelsen af det endelige partikelstof, der detekteres som bundne tilstande af kvarker og gluoner (i form af eksotiske versioner af protoner og neutroner). Visse partikler, der består af svagt bundne kvarker, er vanskeligere at danne. Derfor giver den relative mængde af hver observeret partikel os mulighed for at bestemme plasmaets kvark-sammensætning.



Figur 3. Skematisk fremstilling af to kolliderende, tunge ioner. Stoffet i det røde, mandelformede overlap udøver et større tryk i det vandrette plan, hvor det er mest sammenpresset, og skubber derved partiklerne ud i den retning med højere hastighed.

Når man har skabt et plasma, bør der eksistere trykgradienter fra samspillet mellem partiklerne. Disse vil presse hårdere på partikler i retninger, hvor trykket er højt (se figur 3). Resultatet er en asymmetri i vinkelfordelingen af partiklerne på vej ud af kollisionen. Man kan måle denne asymmetri (karakteriseret ved en parameter kaldet v_2) som en funktion af den transverse kinetiske energi (kinetisk energi i retning vinkelret på retningen af de kolliderende ioner) af partiklerne på vej ud af kollisionen, og man finder en voksende tendens. Sådanne afhængigheder viser, at der findes en trykgradient, hvilket igen viser, at vi har at gøre med et interagerende stof (en væske snarere end en gas). Hvis man yderligere ser på de forskellige partikeltyper og plotter v_2 divideret med antallet af kvarker i disse, finder man en universel kurve for alle partikeltyper (se figur 4). Dette giver bevis for, at trykgradienten virker på kvarkerne og ikke kun på de resulterende protoner registreret i eksperimentet. Sådanne målinger tillader én at udtrække viskositeten af kvark-gluon-plasmaet.



Figur 4. Et mål for ellipticitet (v_2) per kvark versus den transverse kinetiske energi per kvark. Det ses, at alle de producerede partikler har den samme afhængighed ved lave, transverse kinetiske energier per kvark, hvilket peger på, at partiklerne blev dannet ved sammensmeltning af kvarker med nogenlunde samme hastigheder [4].

Den elektrosvage kraft og Standardmodellen.

Ørstedes opdagelse af sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme gav sammen med Faradays lov ophav til, hvad der skulle blive til Maxwells fire ligninger. Disse ligninger indeholder en smuk symmetri, som binder elektricitet og magnetisme sammen på fornemmeste vis. Det skulle vise sig efter kvantemekanikkens opdagelse, at Maxwells ligninger "kun" er en approksimation til det, man kalder kvanteelektrodynamik, helt ligesom Newtons love er en approksimation til deres relativistiske modstykke.

Kvanteelektrodynamikken (QED) er en næsten fabelagtig teori, som giver ophav til helt utroligt præcise forudsigelser. For eksempel kan man nu ved hjælp af QED beregne elektronens magnetiske moment (udtrykt som dimensionsløs g-faktor) med 13 decimalers nøjagtighed: 2,002 319 304 363 3. Hvis en elektron blot eksisterede "alene", ville tallet have været præcis 2, som forudsagt af Dirac, men pga. kvantemekanik kan elektronen udsende en virtuel foton, som den så opfanger igen. Det ændrer dens magnetiske moment med omkring $\alpha/2\pi$, hvilket er ca. 1/1000, det såkaldte anomale magnetiske dipolmoment (AMD). Ved at tage højere og højere-ordens korrektioner er man kommet frem til en utrolig forudsigelse af AMD.

Men det virkelig fantastiske er, at forudsigelsen stemmer overens med den lige så præcise måling!

Forudsagt: 0.001 159 652 181 64(76) [5]

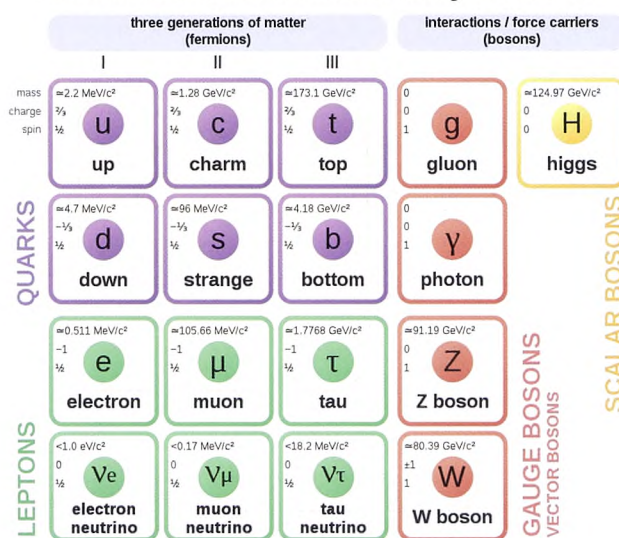
Måling: 0.001 159 652 180 91(26) [6]

Når man har en teori, som korrekt kan forudsige fysiske størrelser med 13 decimalers nøjagtighed, ja, så har man nok fat i den lange ende. Og derfor står QED som en af fysikkens absolutte triumfer.

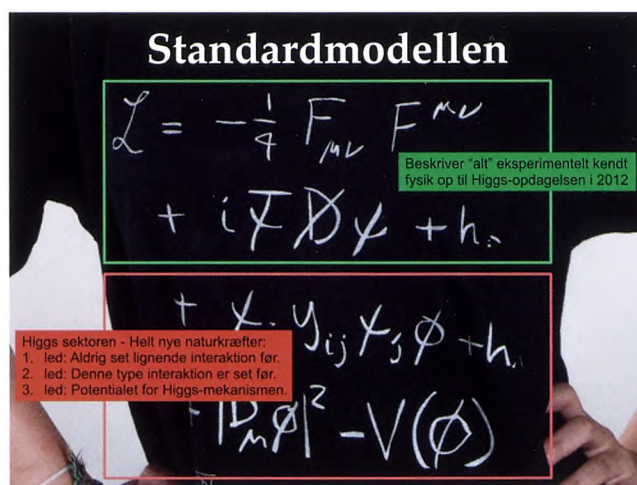
I foregående afsnit beskrev vi, hvordan den stærke kernekraft ligesom QED kan beskrives ved en kvantefeltteori, QCD. Det var derfor oplagt at se, om den svage kernekraft, som blev studeret indgående i 1950'erne og 1960'erne, kunne formuleres med samme formalisme. Det ikke bare lykkedes, men det har vist sig, at Ørstedes og Maxwells gode gamle elektromagnetisme

og den svage kernekraft rent faktisk er to sider af samme sag. De to kræfter kan matematisk forenes, ligesom Ørsted i sin tid havde bidraget til elektricitetens og magnetismens forening. Det fik Weinberg, Glashow og Salam Nobelprisen for i 1979, og i 1983 fandt CERN så de forudsagte W- og Z-bosoner, som er den svage kernekrafts pendant til fotonen og gluonen. Sammen med kvarkerne indgår disse bosoner herefter i Standardmodellen (SM) for partikelfysik. En samlet oversigt over Standardmodellens partikler findes i figur 5.

Standard Model of Elementary Particles



Figur 5. Partiklerne i Standardmodellen. Kvarkerne (som protoner og neutroner er opbygget af) er farvet lilla, mens leptonerne (fx elektronen) er grønne. Disse er alle stofpartikler (fermioner). I rødt finder vi kraftpartiklerne (bosoner), hvor gluonen repræsenterer den stærke kernekraft, fotonen den elektromagnetiske kraft og W- og Z-partiklerne den svage kernekraft. Sidst, men ikke mindst, finder vi Higgs-bosonen i gult, som falder lidt uden for kategori [7].



Figur 6. Standardmodellens Lagrangefunktion skrevet i meget kompakt form. Det første led er i realiteten 16 formler (idet indekserne μ og ν antager værdierne 0, 1, 2 og 3), hvoraf en af de fire diagonale indeholder Ørstedes lov. Som det kan ses, er udvidelsen med Higgs-mekanismen ret signifikant, og den er stadig under udforskning.

De tre led i Higgs-sektoren af Standardmodellens Lagrangefunktion svarer til hhv. Higgs-partiklens vekselvirkning med stofpartikler (kvarker og leptoner), med W- og Z-partiklerne og sidst, men ikke mindst, med sig selv! Det første led er af en helt ny slags og aldrig set før. Det er nærmest som at have opdaget en femte naturkraft, som giver stofpartiklerne masse. Derfor er selve eksistensen af Higgs-partiklen med de forudsagte vekselvirkninger så vigtig.

Efter selve opdagelsen af Higgs-partiklen i 2012 var det vigtigt at fastslå, at den faktisk kan tilskrives Higgs-mekanismens beskrivelse af partiklernes masse. Der er en meget simpel forudsigtelse, nemlig at Higgs-partiklen kobler proportionelt med partiklernes masse. I ATLAS-eksperimentet ved LHC arbejdes der på at teste, i hvor høj grad dette er tilfældet. Det kræver så præcise målinger som muligt af så mange forskellige henfald af Higgs-partiklen som muligt. Det foreløbige resultat kan ses opsummeret i figur 7. Som det kan ses, så stemmer det overens, men mere data vil kunne udfordre forudsigtelsen med større præcision.

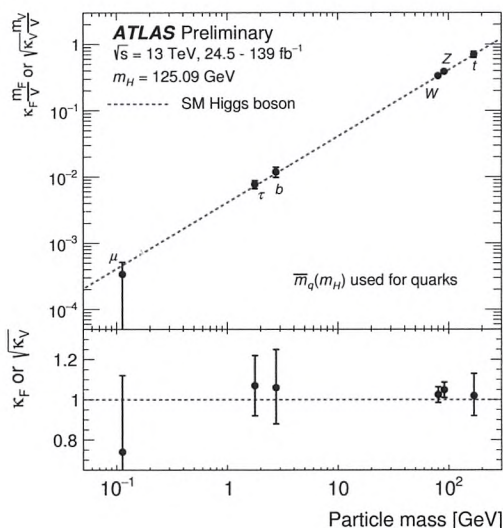


Figure 7. Plottet viser forskellige partiklers kobling med Higgs-partiklen versus deres masse. Hvis Higgs-mekanismen fungerer som forudsagt, bør der være en lineær relation mellem disse, hvilket synes at være tilfældet [8].

Standardmodellen kommer med meget præcise forudsigelser for, hvordan Higgs-partiklen selv skal henfalde (se figur 8), og hvor stærkt den kobler (dvs. interagerer) med de forskellige partikler. Til stor glæde for partikelfysikere har naturen valgt, at Higgs-partiklen har en masse på 125 GeV, hvilket resulterer i, at den kan henfalde på mange forskellige måder. Eksperimenterne viser igen, at forudsigelserne passer så godt, som vi er i stand til at måle. Dog må vi væbne os med tålmodighed, før vi vil få statistik nok til at måle de meget sjældne henfaldsmåder.

Det er i sig selv meget underligt, at Higgs-partiklen har denne masse, idet man teoretisk set umiddelbart skulle have forventet noget, som måske var en faktor 10^{13} større! Hvorfor det? Fordi Higgs-partiklens masse iflg. teorien får bidrag via kvantemekanik ved højere

energier, hvormed energier ved Planck-skalaen (10^{19} GeV) skulle give en langt højere masse. Men det har den ikke, og man står derfor tilbage med en følelse af, at der foregår noget endnu ukendt. Som om et eller andet princip sørger for, at disse bidrag på en eller anden måde modvirker hinanden.

Et bud på et sådant princip er Super Symmetri (SUSY). Ligesom alle partikler har en antipartikel, så kunne de også have en supersymmetrisk partner, hvor rollerne mellem stofpartikler og kraftpartikler er byttet rundt. Da disse bidrager til Higgs-massen med modsat fortegn, vil de have evnen til at modvirke hinanden. SUSY forudser dermed mange nye partikler, hvor den letteste evt. også kunne udgøre det mørke stof, som vi også ved eksisterer i universet, men som Standardmodellen heller ikke kan forklare! Vi har dog ikke set nogen tegn på SUSY endnu, og derfor forbliver dette blot en idé.

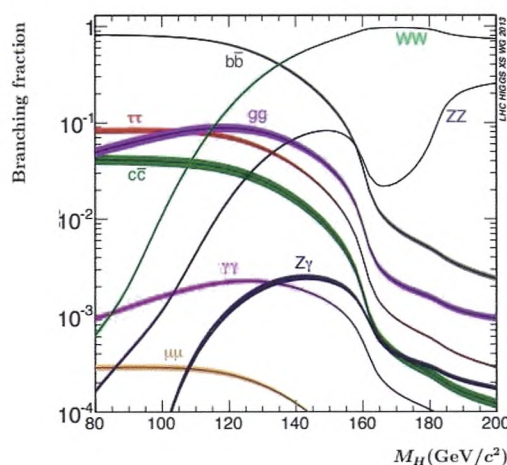


Figure 8. Beregning af Higgs-partiklens andel af henfald ("Branching fraction") som funktion af dens masse. Med den nu kendte masse på omkring 125 GeV findes mange forskellige henfald, der kan testes i eksperimenter.

LHC i endnu to årtier.

Som det fremgår ovenfor, er der kommet et væld af resultater ud af LHC's første ti leveår [9], som i alle henseender understøtter Standardmodellen og dens forudsigelser om sammenhængen imellem de fire fundamentale kræfter i naturen. Vi er kommet langt siden Ørstedes dage. Man kan så måske undre sig over, at man planlægger at fortsætte med LHC i endnu to årtier, men det er der rigtig gode grunde til. Ydermere har man et stort anlagt upgrade-program under opsejling, som skal øge antallet af partikelkollisioner med en faktor fem i forhold til nu. Det vil betyde, at når vi når hen i 2030'erne, vil den nuværende datamængde kun udgøre ca. 5%. Der er gode grunde til ikke at stoppe, hvor vi er.

Vi har antydnet ovenfor, at der er væsentlige dele af Standardmodellen, som vi endnu ikke kan teste, fordi vi ikke har tilstrækkeligt med data. Der er også forhåbninger om, at man ved at bore rigtig dybt kan finde små revner i modellen, som afdækker nye fænomener og en bedre forståelse af verden. Her kan blot nævnes muligheden for at observere nye partikler, som kan forklare naturen af mørkt stof, ligesom vi

allerede har nævnt SUSY som en vigtig udvidelse af Standardmodellen.

Det sidste led i figur 5, som repræsenterer Higgs-bosonens vekselvirkning med sig selv, er vigtigt for endeligt at kunne fastslå rigtigheden af Standardmodellens Lagrange-funktion. Det har vi stadig ikke kunne udforske eksperimentelt, idet det kræver meget mere data end LHC-acceleratoren hidtil har leveret. Med tyve gange mere data fra LHC vil det formentlig blive muligt at teste, om dette led også har sin realitet i virkeligheden. Også med Higgs-partiklens henfaldsmåder har vi stadig lang vej. De henfald, vi hidtil har studeret med præcision, svarer til dem, der i figur 6b ligger over 10% i branching fraction. Vi nærmer os kun lige 1%-niveauet, og vi vil meget gerne meget længere ned. Derfor vil vi gerne tage så meget data som overhovedet muligt og dermed undersøge alle Standardmodellens facetter og få præcise forudsigelser for stort set alle dele af partikelfysikken.

Selv om Standardmodellen kan virke kompliceret, er det på mange måder den simplest mulige model, vi kan forestille os med vores nuværende kendskab til partikler og kræfter. Det kunne dog sagtens tænkes, at der eksisterer både flere Higgs-partikler og flere W'er og Z'er, uden at Standardmodellen som sådan bryder sammen. Det vil umiddelbart komplicere sagerne, men det kunne måske også give indsigt i, hvad der skal til for at simplificere sagerne igen. Flere data er nødvendige.

Der er også mange ubesvarede spørgsmål omkring de stærke kernekræfter og kvark-gluon-plasma. Plasmaet er en hidtil ukendt tilstand af stoffet i universet, som vi stadig kun ved meget lidt om. Det er en stor succes at have tilvejebragt plasmaet i laboratoriet, så nu er det tid til at studere dets egenskaber nærmere. Med flere data og detektorer, som er i stand til bedre at adskille kvark-typerne og udforske de tungere kvarkers rolle, vil vi åbne for en bedre forståelse af kræfterne og udviklingshistorien af det tidlige univers.

I sidste ende har Standardmodellen en snes parametre, og deres værdi er afgørende for, hvordan universet omkring os ser ud. Der er en udbredt mistanke om, at der er et mønster i deres værdier, men vi har ikke kunnet gennemskue, hvordan de hænger sammen. Kunne vi bare ændre på en af dem, og så se hvordan de andre opførte sig, så kunne vi måske finde ud af det. Men ak, disse parametre er vi ikke herrer over. Alt, vi kan gøre, er at måle dem så godt, vi kan, og så se om vores intellekt kan gennemskue deres sammenhæng. Hvis vi kan, vil vi tage et stort skridt nærmere for at forstå universets mest basale naturlove helt fundamentalt, og hvorfor det ser ud, som det gør. Mere præcise målinger er vejen frem, både til opdagelse af nye fænomener og til at finde nye sammenhænge. Det var også tilfældet for 200 år siden, hvor det tog adskillige årtiers eksperimenter efter Ørsted, inden Maxwell kunne samle det hele i sine flotte og simple ligninger.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2020) *Fra Descartes til superstrengte: aspekter af foreningsteoriernes historie*, Kvant, dette nummer side 3.

- [2] B. Hayes (2008) *Getting Your Quarks in a Row*, American Scientist, bind **96**, side 6.
- [3] P. Christiansen (2015) *Kvark-gluon plasmaet – den perfekte væske vi ikke kan forstå*, Kvant, bind **30**, nr. 1.
- [4] B. Abelev, J. Adam, D. Adamová m.fl. (2015) *Elliptic flow of identified hadrons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*, J. High Energ. Phys. bind **190**.
- [5] T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita og M. Nio (2015) *Tenth-Order Electron Anomalous Magnetic Moment – Contribution of Diagrams without Closed Lepton Loops*, Phys. Rev. D., bind **91**, side 3.
- [6] M. Tanabashi m.fl. (Particle Data Group) (2018 og 2019-opdatering) *The Review of Particle Physics*, Phys. Rev. D, bind **98**, side 030001.
- [7] commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg
- [8] atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CombinedSummaryPlots/HIGGS/
- [9] M. Mangano (2020) *LHC at 10: The Physics Legacy*, CERN Courier, marts/april, side 40.



Kristján Gulbrandsen er lektor ved Niels Bohr Institutet og arbejder med ALICE-eksperimentet ved LHC.



Troels C. Petersen er lektor ved Niels Bohr Institutet og arbejder med ATLAS-eksperimentet ved LHC.



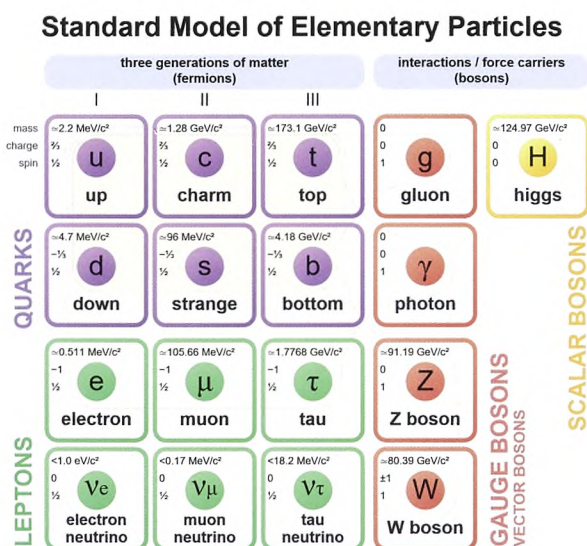
Børge Svane Nielsen er lektor ved Niels Bohr Institutet og arbejder med ALICE-eksperimentet ved LHC.

Holgers jagt på den fundamentale teori

Holger Bech Nielsen, Niels Bohr Institutet, og John Rosendal Nielsen, Aurehøj Gymnasium

Denne artikel er baseret på en samtale med Holger Bech Nielsen, hvor vi diskuterede fysik med fokus på en fundamental teori – også kendt som teorien om alting. Der er tilføjet flere af mine egne forklaringer til Holgers beskrivelse af fundamental fysik.

Jeg er på vej igennem Niels Bohr Institutets kringledede gange på vej over til bygning F. Det er her på øverste etage, at Holger Bech Nielsen har sit kontor. Jeg har været der mange gange i løbet af min studietid, men det er længe, længe siden. Dengang var jeg specialstuderende, og Holger var en af de professorer, der vejledte mig i mit speciale i teoretisk fysik. Da jeg står i Holgers kontor, må jeg konstatere, at der ikke er sket mange ændringer. Møblementet er det samme, og skrivebordet og hylderne har tendens til både kaos og orden. Det er i dette kontor, at gæstprofessorer og studerende har diskuteret utallige problemer inden for fundamental fysik i Holgers tid som professor på Niels Bohr Institutet [1].



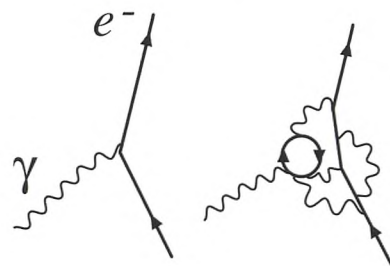
Figur 1. Partiklerne i Standardmodellen. Der er også vist deres masse, ladning og spin.

Hvad skal vi med en teori om alting?

Formålet med en fundamental, forenet teori i fysikken er, at den skal kunne beskrive alt, hvad vi allerede ved. Det vil sige, at den skal indeholde partikelfysikkens Standardmodel, hvor den elektrosvage teori og kvantekromodynamikken (QCD) beskriver stoffet og dets vekselvirkninger. Denne model indeholder 12 stofpartikler – også kendt som fermioner – der er delt i 3 generationer (se figur 1). Det er interessant, at næsten alt stoffet omkring os – dig, mig, Kvant-bladet og alt andet – udelukkende består af partikler fra første generation. De to andre generationers stof findes kun i

sammenstød af partikler i partikelfysikkens accelerators eller ved sammenstød mellem partikler fra kosmisk baggrundsstråling og partikler i den øvre del af atmosfæren. Standardmodellen beskriver med succes kræfter, der virker i stoffet. Hertil har man introduceret fotoner, Z- og W-bosoner, der er de partikler, som bærer henholdsvis den elektromagnetiske og svage kernekraft (der samlet beskrives i den elektrosvage teori). Der er desuden kvantebærerne af den stærke kernekraft, gluonerne, som ikke bare er ansvarlige for, at protonerne og neutronerne holder sig samlet i atomkernen, men også kvarkerne i nukleonerne.

Den fundamentale teori skal på den anden side også beskrive tyngdekraften. Til beskrivelse af stoffets tyngdekraftpåvirkning benytter vi os af Einsteins generelle relativitetsteori, der er en succesrig udvidelse af Newtons love. Relativitetsteorien har blandt andet været succesfuld til at beskrive stoffet eller lyset ved tilstedeværelse af et kraftigt tyngdefelt fra relativt tunge og tætte astronomiske objekter. Dertil har teorien med held kunnet beskrive nye objekter som sorte huller og universet som helhed, hvilket har resulteret i kosmologiens Big Bang-standardmodel. Det har vist sig problematisk at kombinere kvantefeltteoriene (kvanteelektrodynamikken (QED) og QCD) og relativitetsteorien med hinanden. Det har ikke været muligt at lave en teori, der fornuftigt har kunnet beskrive tyngdekraftens kvantepartikel – også kendt som gravitonen.



Figur 2. En elektrons vekselvirkning med en foton kan blive kompliceret, da der kan opstå virtuelle partikler, og partiklerne kan vekselvirke med sig selv.

Standardmodellens problemer

“Problemet med tyngdekraften er, at Standardmodellen er renormaliserbar – hvilket vil sige, at den giver fornuftige resultater, når man groft set stiller fornuftige spørgsmål”.¹ Hvis en kvantefeltteori ikke kan renormaliseres, vil ens udregninger give divergenser – dvs. ens

¹ Alle citater er fra samtalen med Holger Bech Nielsen, hvis intet andet er indikeret.

resultat bliver uendeligt, hvilket ikke er ønskværdigt. Disse divergenser opstår i kvantefeltteorien, når kvanter vekselvirker med sig selv, hvilket kvanter ofte gør. Et eksempel er en foton, der vekselvirker med en elektron – vist på figur 2. Ved denne simple vekselvirkning kan der opstå virtuelle partikler, som egentligt bryder med energibevarelse, men fordi de kun eksisterer i meget kort tid, tillader kvantefysikken, at de kan forekomme. Der kan for eksempel opstå virtuelle fotoner og elektroner (som vist på højre figur), der vekselvirker med sig selv.

Løsningen på dette problem er renormalisering. Når vi opstiller Lagrangefunktionen² i fx QED skal vi gøre os klart, at de fysiske størrelser såsom elektronens masse og ladning ikke passer med de fysiske størrelser, som vi kan måle i laboratoriet. Værdierne af de fysiske størrelser – også kendt som “bare størrelser” – bliver påvirket af kvanternes vekselvirkning med sig selv. Derudover bliver kvantefelterne også påvirket af selv-vekselvirkningen. Lagrangefunktionen i QED med “bare størrelser” vil blive,

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}_B [i\gamma_\mu (\partial^\mu + ie_B A_B^\mu) - m_B] \psi_B - \frac{1}{4} F_{B\mu\nu} F_B^{\mu\nu} \quad (1)$$

hvor symbolerne (ψ_B , γ_μ , e_B , A_B^μ , m_B og $F_{B\mu\nu}$) står for forskellige egenskaber ved felterne, der beskriver partiklerne og vekselvirkningerne imellem dem. Indekset B i Lagrangefunktionen indikerer, at der er tale om en “bar” størrelse. I hvert af disse led i ovenstående ligning, vil man introducere et “counter-term”, Z_n (hvor n kan være 0, 1 og 3 i QED).

Et simpelt matematisk eksempel på et dårligt defineret integral er

$$I = \int_0^a \frac{1}{z} dz - \int_0^b \frac{1}{z} dz = \ln(a) - \ln(b) - \ln(0) + \ln(0) \quad (2)$$

hvor $\ln(0)$ giver et dårligt defineret uendeligt resultat. Man kan fjerne denne divergens ved at ændre de nedre grænser af integralerne til ε_a og ε_b :

$$I = \ln(a) - \ln(b) - \ln(\varepsilon_a) + \ln(\varepsilon_b) = \ln\left(\frac{a}{b}\right) - \ln\left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b}\right) \quad (3)$$

Når man lader $\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} \rightarrow 1$, bliver $I = \ln\left(\frac{a}{b}\right)$. Tilsvarende matematiske tricks laver vi i kvantefeltteoriene ved renormalisering. Det er kendt som regularisering eller teorien om grænseværdierne. Partikelfysikkens Standardmodel har også flere problematikker, som den ikke giver et fornuftigt svar på. Nogle af problemerne er:³

- Hvorfor har partiklerne de masser, som de har? Ifølge Standardmodellen skulle neutrinoerne – de mindste fermioner – være masseløse. Eksperimenter viser, at selvom vi ikke kan måle neutrinoernes eksakte masser, kan vi måle, at de har en masseforskel, og derfor må de også have en masse. Det kunne desuden være rart at få svar på, hvorfor partiklernes masser og koblingskonstanter har de størrelser, som vi måler.

- Hvorfor er der tre generationer af partikler? Der må være en dybereliggende årsag til, at der er tre generationer af fermioner.

- Hvad er den dybereliggende teori, der giver os Standardmodellen? Standardmodellen er bygget på et kludetæppe af teorier, og det vil være at foretrække med en underliggende teori.

- Hvorfor er der mere stof end antistof i universet? For hver fermion i Standardmodellen er der en antipartikel, der har mange fælles træk med partiklen, men antipartiklen har bl.a. modsat ladning og spin. Bosonerne har også antipartikler, men de er deres egen antipartikel. Partikler og antipartikler kan skabes fra energi, hvis der er en tilstrækkelig mængde energi. Det får dog én til at spørge: Hvorfor er der et overskud af partikler i forhold til antipartikler? Dette partikeloverskud forklarer Standardmodellen ikke, men det bør en mere fundamental teori gøre.

- Hvad er mørkt stof? Ifølge standardkosmologi skal der være stof, som ikke består af kvarker eller leptoner. Er der en eller flere partikler af en anden type end dem, som vi allerede kender?

Med hensyn til det sidste punkt bør det nævnes, at Holger mener, at problematikken med mørkt stof kan forklares inden for rammerne af Standardmodellen. Idéen, der involverer Multipel-Punkt-Princippet, foreslår, at mørkt stof kan forekomme som centimeter-store perler af bundne tilstande af top-kvarker med en masse på omkring 100.000 ton hver (se [1, kap. 7]).

En fundamental teori forventes at svare på et eller flere af ovenstående problemer. Holger nævner desuden, at man kan stille visse skønhedskrav til en fundamental teori. Men han indskyder dog, at man nok ikke bør være for krævende på dette område. Siden starten af 1970'erne har man ment, at strengteorien og senere superstrengteorien var en mulig kandidat til den “fundamentale teori – teorien om alting”.

Strengteorien

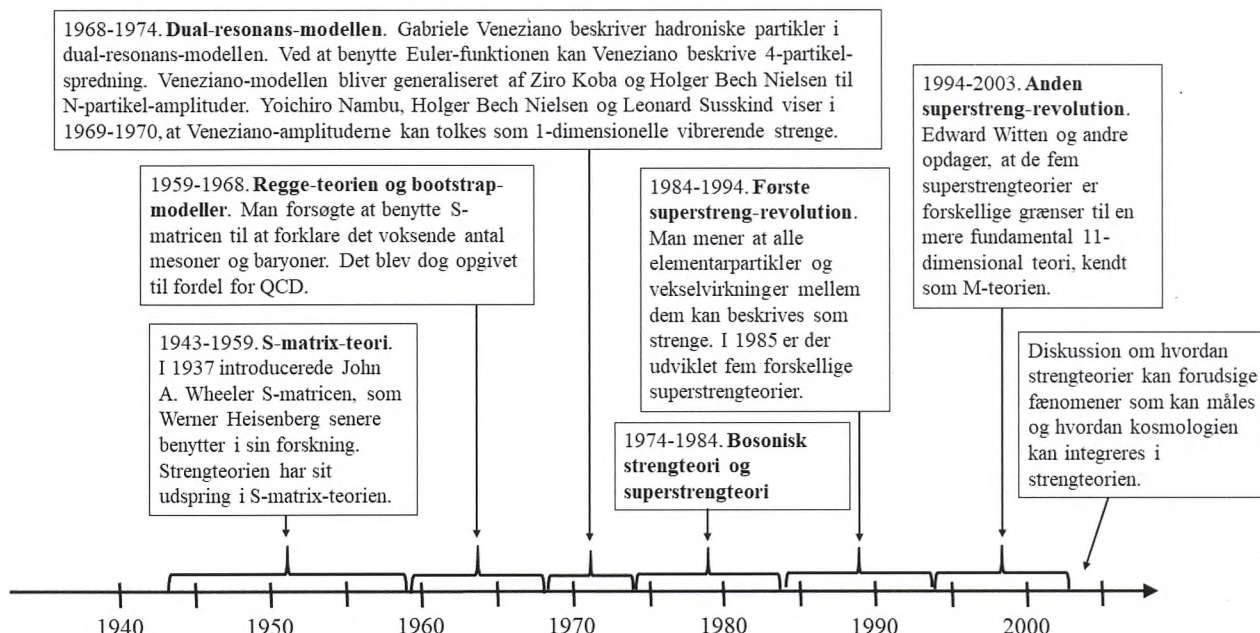
I strengteorien tænker man ikke på partikler som punktformede objekter, men som strenge. Strengens svingninger afgør, hvilke egenskaber partiklen har såsom ladning, masse, spin, osv. Idéen om strengteori trækker tråde tilbage til introduktionen af S-matricer af John A. Wheeler og Werner Heisenberg [2]. Men selve begrebet om vibrerende strenge som partikler kom først på tale i starten af 1970'erne, hvor Holger og den japanske teoretiske fysiker Ziro Koba fra begyndelsen var bidragsydere til strengteorien.

Dual-resonans-modellen beskrev hadroniske partikler, hvilket vil beskrives i større detaljer i næste afsnit. Den første egentlige strengteori fra 1974 var bosonisk, hvilket begrænser sig til de kraftbærende partikler – bosonerne. Løsningen på at inkludere partikler var supersymmetri, der er en smuk udvidelse af matematikken bag relativitetsteorien. Supersymmetri skal forbinde bosoner og fermioner, hvor hver boson har en tungere fer-

²Lagrangefunktionen er en matematisk funktion, som beskriver dynamikken af et mekanisk system. Lagrangefunktionen i mekanikken er en funktion af de generaliserede variable, deres tidsafledte og tiden. I feltteorier er variablene felter.

³En mere detaljeret beskrivelse af problemer i fysikken findes på Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_physics

Tidslinje over strengteoriens historie



mion-superpartner og hver fermion har en tungere bosonisk superpartner. Egenskaberne ved den supersymmetriske partner skulle være de samme som de normale partikler, men deres spin er ændret, så supersymmetriske bosoner er halvtallige, og supersymmetriske fermioner er heltallige. Det vil være en smuk symmetri, der dog kræver, at der er endnu flere fundamentale partikler.

En teori om æteriske atomer

De supersymmetriske partikler må være endnu ikke-opdagede partikler, som, håber man, vil dukke op i CERNs Large Hadron Collider (LHC). Disse ukendte partikler kunne bl.a. inkludere det mørke stof, der skal forklare stofsammensætningen i universet, hvilket vil være besnærende. Desværre har man ikke kunnet observere de supersymmetriske partikler, selvom LHC burde ligge inden for massegrænsen ifølge den minimale (eller simple) supersymmetriske Standardmodel. CERNs LHC har elimineret flere 'simple' supersymmetriske modeller, men der er stadig mulige supersymmetriske modeller [3].

På nuværende tidspunkt er der fem strengteorier, der hver især er baseret på forskellige matematiske grupper og algebraer i ti dimensioner og en supergravitations-teori. Et teoretisk gennembrud for strengteorien er, at man opdagede, at disse teorier kunne samles i en 11-dimensionel teori, som kaldes for M-teorien. Om denne teori er en endelig teori for alting, er det alt for tidligt at sige.

Venezianos Dual-resonans-model

Den italienske teoretiske fysiker Gabriele Veneziano (1942-) undersøgte en spredning af partikler. Holger

nævner et eksempel med pi-mesoner:

$$\pi + \pi \rightarrow \pi + \omega \quad (4)$$

hvor ω -partiklen ligeledes er en meson, som typisk vil henfalde til en pion og et gammakvant – eller tre pioner. Veneziano opdagede i 1968, at spredningsamplituden for denne firepartikelproces kunne beskrives med Eulers Betafunktion:

$$B(x, y) = \int_0^1 u^{x-1} (1-u)^{y-1} du \quad (5)$$

der gælder for reelle og positive værdier af x og y . Eulers Betafunktion er opkaldt efter den schweiziske matematiker, fysiker og ingeniør Leonhard Euler (1707-1783), der har studeret denne funktion. Der er en tæt forbindelse mellem Gammafunktioner og Betafunktioner⁴:

$$B(x, y) = \frac{\Gamma(x)\Gamma(y)}{\Gamma(x+y)} \quad (6)$$

Ziro Koba og Holger Bech Nielsen generaliserede spredningsamplituderne i Veneziano-modellen til en N-partikelspredning. Senere i 1969-1970 gav Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen og Leonard Susskind en fortolkning af Veneziano-amplituderne. De foreslog, at amplituderne repræsenterede kernekraften som vibrerende endimensionelle strenge. Dette markerede formentligt den egentlige start på forskningen i strenge som fundamentale objekter. Beskrivelsen af den stærke kernekraft som strenge kom dog med nogle forudsigelser, som var i direkte modstrid med de eksperimentelle resultater, og derfor blev denne strengmodel opgivet. Men man kan sige, at Veneziano-dual-modellen lagde idégrundlaget til fremtidens strengteorier og superstrengteorier, som vi beskrev i et tidligere afsnit.

⁴Hvis x og y er heltal, kan man bestemme Betafunktionen ved fakultetsfunktionen:

$$B(x, y) = \frac{(x-1)!(y-1)!}{(x+y-1)!}$$

Vi vil afslutte vores beskrivelse af strengteorien med et citat af professor i teoretisk fysik Lee Smolin [4]:

String theory is a powerful, well-motivated idea and deserves much of the work that has been devoted to it. If it has so far failed, the principal reason is that its intrinsic flaws are closely tied to its strengths—and, of course, the story is unfinished, since string theory may well turn out to be part of the truth. The real question is not why we have expended so much energy on string theory but why we haven't expended nearly enough on alternative approaches.

Citatet er en passende indledning til Holgers egen teori – Tilfældig Dynamik.

Tilfældig Dynamik

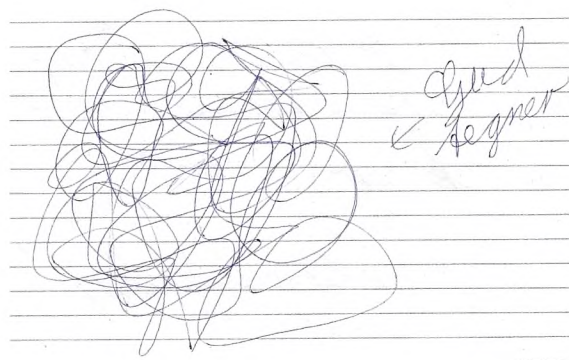
Holger Bech Nielsens eget bud på en fundamental teori er nu “Tilfældig Dynamik” (eller Random Dynamics, RD). Tilfældig Dynamik går kort sagt ud på, at de grundlæggende naturlove er umådeligt komplicerede og bedst kan betragtes som tilfældige – deraf navnet [5]. En hovedantagelse i Tilfældig Dynamik er, at man ikke skal antage noget.⁵ I fysik ønsker fysikere, at man skal antage så lidt som muligt (Occams ragekniv), og i Tilfældig Dynamik er det et ideal, at intet skal antages. Holger må dog erkende, at det i praksis er svært at leve op til dette ideal, men “hvis vi antager noget om den mikroskopiske fysik, så er de antagelser næsten sikkert forkerte. Hvis vi taler om fysikken uden for eksperimenternes område, gætter vi næsten sikkert forkert”. Dette er grunden til, at Holger er temmelig loren over for kvantegravitationsteoriene, hvor man gætter, hvad der sker ved afstande på Plancklængden på 10^{-35} m. Selvom man kan ekstrapolere ud fra eksperimenterne, vil der stadig være for mange muligheder, så der er stor sandsynlighed for, at man gætter forkert. Holger opfatter superstrengteorien som et modigt gæt om kvantegravitation, og det er nok det bedste gæt på markedet. Men det er stadig et gæt og derfor nok forkert.

“Oh ja, gravitation er nok lidt svært”. Lad os nu søge de antagelser, som vi bliver nødt til at gøre. “For at minimere hvad jeg må putte ind i min kvantegravitationsteori, skal vi vide, hvad vi har brug for at putte ind”. Hvilke antagelser kan vi ikke undgå at drage eller sagt på anden måde, “hvilke antagelser kan undgås?”. I Tilfældig Dynamik tager man en naturlov, som vi antager, at man ikke kender eller ligefrem dropper, men vi kender nok nogle af de andre naturlove. Kan vi så udlede den fjernede naturlov? Det er en ønskedrøm i Tilfældig Dynamik, at vi får alle naturlovene af sig selv uden at antage noget som helst. Holger må dog anerkende, at det nok er for stærk en drøm, at naturlovene skulle komme ud af sig selv uden nogen antagelser.

Den komplicerede antagelse

Holger stiller spørgsmålet: Hvis der slet ikke er noget, hvordan kan man så gøre noget som helst? Altså hvis der ingen antagelser er, kan man så udrette noget i

fysik? Det er nærmest håbløst. Lad os i stedet gøre en svær antagelse: Vi antager noget så kompliceret, at vi stort set ikke ved, hvad det er.



Figur 3. Gud (med Holgers hånd) tegner! Tegningen er noget kompliceret, og vi ved ikke, hvad det er. Vi kender heller ikke reglerne for at tegne det. Det er nogle regler, som Gud tegner efter (de vandrette streger er fra Johns notesbog og har ikke noget med tegningen at gøre).

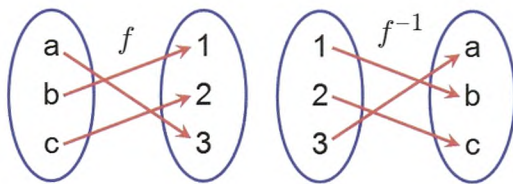
Vi skal tænke abstrakt. Hvis vi intet antager, ville det være en mere specifik og stærk antagelse, og det vil vi undgå. Hvorimod det at antage noget kompliceret er en svagere antagelse, og det er vores ønske. Det kan beskrives pædagogisk med den vilde tegning, men et mere matematisk forslag er en “umådelig kompliceret matematisk struktur” som et topologisk rum eller mængdelære. Hvordan skal man starte? Holger foreslår: Lad os være ledt af den tidlige uddannelse i matematik. Vores ledestjerne eller ånden i Tilfældig Dynamik kan være begreber som mængder og isomorfier. Holger håber at benytte kategori-teori til at formulere Tilfældig Dynamik.

Holger er overbevist om, at naturlove skal komme naturligt fra en slags matematik, og hvorfor skulle det ikke være mængdelære, som al matematik i bund og grund er? Mængdelæren er så generel, at al matematik kan formuleres ved hjælp af mængdelære. Holger anser matematikken som det sprog, som vi skal tale med Gud.⁶ Den fundamentale teori er baseret naturligt på et sprog, som vi ikke behersker. Tilsvarende ville sproget i (partikelfysikkens) Standardmodel være meget fremmed for folk for et par hundrede år siden, og hvis vi skulle præsentere modellen for dem, ville vores forfædre finde sproget fremskredet. H. C. Ørsted kunne måske forstå sproget om Standardmodellen, men selv for ham ville det kræve større omskoling. Hvordan skal vi så tale om den fundamentale teori, når vi har svært ved at beherske det naturlige sprog, som den fundamentale teori er baseret på, og når det er fremmed for os? Her lægger Holger sig op ad Niels Bohrs tankegang. Bohr påpegede, at vi kun har vores dagligdagsprog til at beskrive fysikken. Deri er vores begrænsning, og ligeså snart vi kommer på en ny teori, prøver vi at skabe et sprog, der er egnet til at kommunikere vores nye teori. Det kan være navngivningen af begreber i de videnskabelige artikler, og når disse begrebsnavne

⁵ Denne del af artiklen er næsten udelukkende baseret på samtalen med Holger Bech Nielsen.

⁶ Da jeg bemærker over for Holger, at han inddrager Gud i diskussionen, lader han os forstå, at det er et abstrakt udtryk for den fundamentale teori.

er nævnt nogle gange i artikler m.m., bliver de en del af sproget. Man skal derfor læse alt, hvad der er skrevet om emnet. Det bliver samtidigt også et sprog, der bliver uforståeligt for andre. Det er måske en nødvendig proces, fordi vi ikke har nogen garanti for, hvordan man skal formulere den rigtige teori. Det er meget alvorligt, at vi bliver nødt til at gøre noget i den retning.



Figur 4. I kategoriteori er en morfi en strukturbevarende afbildning fra én matematisk struktur til en anden af samme type. Et eksempel på morfisme er to mængder – vist t.v., hvor objekterne a , b og c afbildes ved en funktion f til 1, 2 og 3. Hvis det omvendte gælder, hvor f^{-1} afbilder 1, 2 og 3 til a , b og c i eksemplet, er der tale om en isomorfi.

Sproget i en teori for alt?

Holger stiller det retoriske spørgsmål: “Hvordan skal vi formulere en teori for alt, hvis sprog vi ikke kender?” Det er et godt spørgsmål til det, som Holger kalder den usunde del af Tilfældig Dynamik.⁷ Det er her, hvor vi skal introducere kategoriteori. Vi har nogle mængder af nogle objekter, der kun er kendt i den fundamentale teori. Vi kender altså ikke teorien, men vi gætter på, at den har nogle mængder af noget, som vi kan betegne som objekter eller elementer. Derudover er der noget struktur; det kunne fx være en relation, som er en mængde af par. En relation er defineret som en undermængde R af et krydsprodukt af de to mængder M_1 og M_2

$$R \subseteq M_1 \times M_2 \quad (7)$$

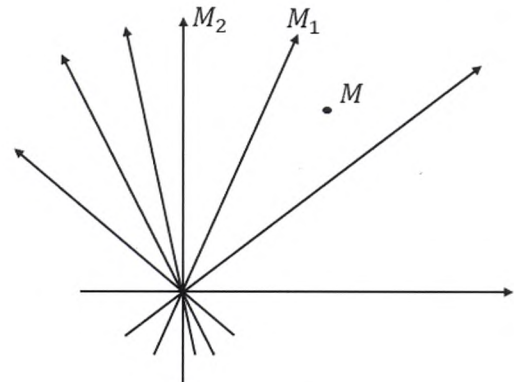
Holger er med vilje noget uklar i sine generelle overvejelser om relationen, hvilket nok er meget godt i tråd med vores mangelfulde sprog om en teori om alt. Vi kan have en morfi, som vi kalder for $m : M_1 \rightarrow M_2$. Et eksempel kunne være, at $x, y \in M_1$ og $x, y \in R$, så ville der gælde, at billedet af x og billedet af y er i relationen i M_2 :

$$(m(x), m(y)) \in R(M_2) \quad (8)$$

Sådan en morfi bevarer sin struktur i relationen. Hvis morfien m er bijektiv, hvor M_2 afbildes i M_1 , kaldes m for en isomorfi, og så er M_1 isomorf med M_2 . Dette er begyndelsen på et sprog til Holgers teori for alt.

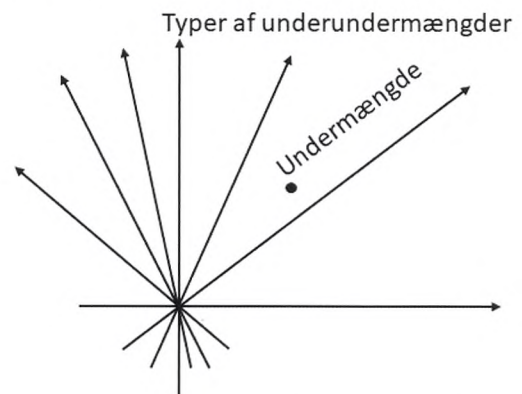
Lad os nu tage en mængde M_1 og spørge, hvor mange $M_k \in M$ er isomorfe med M_1 ? Vi introducerer et naturligt tal k , som er antallet af undermængder eller strukturer (i vores tilfælde M_1). Mængden M er hermed en kompliceret struktur – dvs. med relationer osv. – og der er så understrukturerne, der nok ikke er defineret klart. Disse understrukturer er M_1 og de mængder, som minder om den som $M_2, \dots, M_k$. Disse understrukturer kan så have underunderstrukturer, da

man kunne blive ved med at finde strukturer inde i understrukturerne. Mængden antages at være meget stor og kompliceret, hvilket gør, at man kan skabe de mindre understrukturer, underunderstrukturer, osv. Det er selvfølgelig under meget generelle omstændigheder, men vi er kommet i gang med et komplekst sprog.



Figur 5. Koordinatsystem med de mange akser – tegnet efter Holgers skitse. Koordinaterne er understrukturerne.

Hvordan skal vi tolke dette sprog? Altså hvordan skal vi forstå disse strukturer, understrukturer osv.? Lad os tænke på et koordinatsystem med mange akser, som det er vist i figur 5. Det skal forstås symbolsk. Understrukturerne $M_1, M_2, \dots$ er navnene på koordinataksene, og mængden M bliver et punkt. Koordinaterne korresponderer med undermængderne (eller understrukturerne), og koordinaterne er antallet af isomorfe kopier.



Figur 6. Graf med antallet af undermængder afbildet i rummet, hvis koordinater er underundermængderne.

Hvert punkt, der kan realiseres som i grafen i figur 6 – hvilket ikke alle kan, men der vil være et helt spindelvæv af punkter – giver et tal for hver koordinatakse, altså hver type af underundermængder. Tallet er, hvor mange af de isomorfe underundermængder, der er i undermængden betegnet med punktet. Det vil sige, at grafens koordinat viser hver klasse (eller type) af isomorfe underundermængder, og dens hovedmængde giver nu et tal for hver undermængde. Vi kan så lave en tilsvarende graf for underunderundermængden, hvor punkterne bliver underunderundermængder. I princippet kan man blive ved med at sætte et ekstra “under” på vores undermængder.

⁷En mere detaljeret beskrivelse kan findes i Astri Kleppe og Holgers artikel [6].

Hvad er forbindelsen til en fundamental teori, kan man spørge sig selv om? Vi kan sætte et ekstra “under” på grafens hovedmængde i figur 6, hvor koordinaterne er koordinater mærket med underundermængder, og punkterne svarer til undermængder. I underunderundermængde-koordinatsystemet bliver punkterne underundermængder, og grafen bliver nu i korrespondance med en undermængde, idet vi har sat et overflødigt “under” på. Hovedmængden bliver dermed en slags funktional, idet den bliver en funktion af funktioner – sagt på en anden måde: den bliver en funktion af graferne. Holger vil identificere funktionalet for hovedmængden med virkningsfunktionalet S , der er givet ved et integral over firedimensionelle rum

$$S = \int \mathcal{L}(x) d^4x \quad (9)$$

Holger påpeger, at ligheden mellem funktionalet for hovedmængden og virkningsfunktionalet er, at de begge er funktionaler, og det er måske det bedste, som vi kan gøre i dette abstrakte niveau. Vi vil fortsætte med vores identifikationsantagelse:

- Undermængdetypen er funktionalet af felternes tidsudvikling i en model – fx Standardmodellen – hvilket igen er en slags tænkbare historier. Det er en udvikling af systemet eller sagt på en anden måde: det er en konfiguration af felterne til alle tider.

- Underundermængder svarer til begivenheder. Det er i virkeligheden et felt, som er en funktion af rum og tid. Underundermængder svarer altså til rummets punkter eller begivenheder. Feltet har en spinkomponent, hvilket også skal inddrages (det kan være et potentielt problem, som Holger dog håber, at man slipper ud af).

- Underunderundermængder bliver så de normale koordinater (de er i korrespondance med symbolerne x, y, z, t) og evt. ekstra stof til at specificere spin. En fundamental funktional er den kvantemekaniske Feynman-Dirac-Wentzel-funktional

$$\int \mathcal{D}\phi e^{\frac{i}{\hbar} S[\phi]}. \quad (10)$$

Virkningsfunktionalelets eksponent svarer til hovedmængdens funktional. Plancks konstant kan bare sættes til én, da den kun er afhængig af valget af enheder, men Holger er opmærksom på, at den imaginære del kan blive et problem. Dette leder op til et mere sundt Tilfældig Dynamik-projekt, som Holger har forsket i sammen med japaneren Nagao. De har fundet, at kun den reelle del af virkningen S er vigtig, hvilket gør eksponenten til en ren imaginær størrelse.

En videnskabelig teori bør indeholde troværdig information om virkeligheden, som vi ikke har i forvejen. Den skal i princippet kunne modstå et teoretisk eller eksperimentelt falsificeringsforsøg, og samtidig skal den være smuk i den henseende, at den er så enkel, at den kan anvendes i praksis til at beskrive vores omverden [5]. Der er nok af kandidater til den fundamentale teori om alt – vi har beskrevet to teorier, som Holger har haft indflydelse på eller ligefrem er ophavsmanden til. Holgers Tilfældig Dynamik betragter vores univers som så kompliceret, at det ville være vanvittigt at forsøge at gætte på den bagvedliggende fysik. De fysiske processer ville være så komplicerede, at beskrivelsen

ville kræve computerhukommelse, der ville fylde mere end hele universet.

Endnu har man ikke kunnet finde evidens for supersymmetrien, som er vigtig for strengteoriens overlevelse. Der er forsøg i CERNs LHC, som har falsificeret nogle af de enklere supersymmetriske modeller, men der er stadig muligheder for, at superstrengteorien er den fundamentale teori. Man er for øjeblikket enige om, at superstrengteorien er en af de bedste kandidater, men det ville være rart, hvis fysikerne også brugte tiden på andre teorier.

Da jeg forlod Niels Bohr Institutet kunne jeg (John) ikke lade være med at blive lidt filosofisk. Tidligere har fysikere og ingeniører udtalt sig om fremtidens teknologiske fremskridt som computere og flyvemaskiner, og de har en stor skepsis over for vores formåen. Så på trods af Tilfældig Dynamiks lidt pessimistiske syn på mulighederne for at finde en teori for alt, tror jeg, at vi gætter forkert i at afvise en sådan teori. En falsificerbar teori, der måske ikke giver os alle detaljerne om universet, men som kan give os en beskrivelse af de fundamentale egenskaber i universet, burde være inden for rækkevidde, men man bør nok ikke være så fokuseret på strengteorien alene.

Litteratur

- [1] H. B. Nielsen og J. K. Rathje (2019) “Teorien om alt”, Gyldendal.
- [2] D. Richles (2014) “A Brief History of String Theory”, Springer.
- [3] D. Castelveccchi (2012) “Is supersymmetry Dead?”, *Scientific American*, side 9–10, maj 2012.
- [4] L. Smolin (2006) “The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next”, side 349, Penguin Books.
- [5] H. B. Nielsen (2010) “Om begyndelsen til alt og det mindste af alt”, kap. 4 i B. R. Jørgensen, J. Lyngbye og H. G. Bohr (red.), “Maskinen skabt i menneskets billede”, Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck.
- [6] A. Kleppe og H. B. Nielsen (2007) “Random dynamics in starting levels”, www.researchgate.net/publication/44218129_Random_dynamics_in_starting_levels.



Holger Bech Nielsen (t.h.) er professor emeritus i teoretisk højenergifysik ved Niels Bohr Institutet, og John Rosendal Nielsen (t.v.) er lektor ved Aurehøj Gymnasium, hvor han underviser i fysik. Han beskæftiger sig desuden med videnskabshistorie og kosmologi.

Vand som alternativt elektromagnetisk materiale i mikrobølge- og antennteknik

Samel Arslanagić, Institut for Elektroteknologi, DTU, Rasmus E. Jacobsen og Andrei V. Lavrinenko, Institut for Fotonik, DTU

Der er en stærkt stigende forskningsinteresse for såkaldte metaflader, som kan manipulere elektromagnetiske felter på vilkårlig vis. Det blev for nylig foreslået at realisere disse flader via inklusioner bestående af intet andet end vand pga. vands pris, tilgængelighed, miljøvenlighed og de omfattende dynamiske egenskaber, som vand har. I nærværende artikel gennemgår vi nogle af vores nylige resultater inden for simple vandbaserede metaflader for en række vigtige anvendelser inden for mikrobølge- og antennteknik.

En ganske omfattende forskningsindsats inden for fagområdet metamaterialer (MM'er) og metaflader (MF'er) har over de seneste år ført til bemærkelsesværdig fysik med stort potentiale for at imødekomme flere videnskabelige samt teknologiske udfordringer af samfundsmæssig betydning [1]. MM'er er kunstige materialer, som kan virkeliggøre egenskaber, der ikke findes i naturligt forekommende materialer, og som dermed kan interagere med elektromagnetiske felter på vilkårlig vis. Fx er det muligt at realisere materialer med negativ dielektricitetskonstant eller permittivitet, permeabilitet og brydningsindeks. MM'er består af en samling af (ofte periodisk fordelte) elektrisk små partikler/inklusioner, hvori elektriske og/eller magnetiske dipolresonanser kan anslås effektivt. Disse resonante partikler opfører sig på samme måde, som almindelige atomer gør i naturligt forekommende materialer: de giver anledning til elektriske og magnetiske dipoler, som fører til henholdsvis dielektriske egenskaber (permittivitet) og magnetiske egenskaber (permeabilitet).

Den indledende indsats var hovedsageligt rettet mod rumlige, tredimensionelle MM'er. Det blev dog hurtigt indset, at blot et enkelt lag af disse materialer, kendt som MF'er, har lignende og ofte mere nyttige funktionalteter. De oprindelige MF'er anvendte metalliske, resonante inklusioner [2], hvis egenskaber blev begrænset af ledningstab, navnlig ved høje frekvenser. Derfor blev blikket for nylig kastet på dielektriske materialer med høj permittivitet og lave tab [3]. Intense forskydningsstrømme og resonanser kan anslås i sådanne inklusioner med ønskede elektriske og/eller magnetiske dipoler til følge. I mikrobølgefrekvensområdet har forskningen hidtil været fokuseret på dyre, keramiske materialer med begrænsede dynamiske egenskaber. Et sandt teknologisk gennembrud kræver dog billige, enkle og miljøvenlige materialer med omfattende dynamiske egenskaber. Til dette formål blev vand for nylig foreslået til brug for de resonante inklusioner i MM'er og MF'er pga. den lave pris, tilgængelighed, miljøvenlighed og vands høje og ret så temperaturjusterbare permittivitet [4].

I denne artikel opsummerer vi nogle af vores nylige aktiviteter inden for vandbaserede mikrobølge-MF'er. I modsætning til mange andre indsatser, er vores fokus rettet mod flader med enkle og let-fremstillede

inklusioner. Vi fremhæver, hvorledes MF'er bestående af simple stang-lignende vandinklusioner kan filtrere eller "switche" indfaldende elektromagnetiske bølger via en mekanisk rotation på 90° . Vi viser også, hvordan en MF bestående af en række forskellige cylindriske vandinklusioner kan reflektere en indfaldende bølge i en retning, som ikke følger den almindeligt kendte Snells refleksionslov. Dermed emulerer MF'en det, der i antenneverden kendes som et reflekt-array. Endelig viser vi, at blot en enkelt halvkugleformet vandinklusion kan danne grundlag for elektrisk små (små målt i bølgelængder) dielektriske resonator-antennes. Vi viser både numeriske og eksperimentelle resultater. Alle de numeriske resultater er udregnet i Comsol Multiphysics [5]. Artiklen er inspireret af [6–9], som læseren henvises til for yderligere diskussion og tekniske detaljer. Alle resultater er opnået for de såkaldte tidsharmoniske felter, hvor vi har benyttet tidsfaktoren $\exp(j\omega t)$, hvor ω er vinkelfrekvensen, og t er tiden. Før vi viser egne resultater, opsummeres kort den elektromagnetiske model for vandets permittivitet, som ligger til grund for dette arbejde.

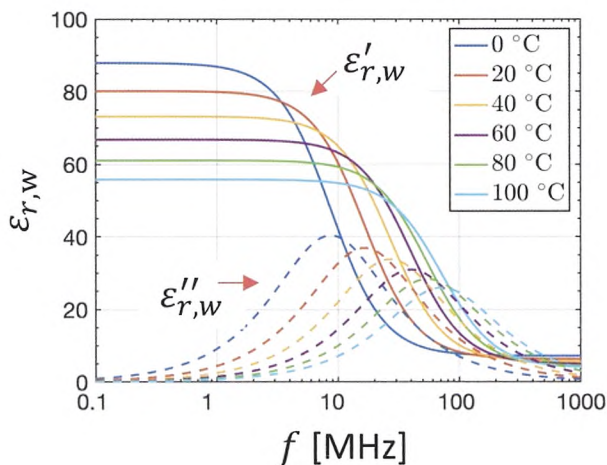
Vandmodel

Vands dielektriske egenskaber kan beskrives med den såkaldte Debye-formel [4, 10], som angiver den relative, komplekse permittivitet $\epsilon_{r,w}$ på følgende form:

$$\begin{aligned}\epsilon_{r,w} &= \epsilon'_{r,w} - j\epsilon''_{r,w} \\ &= \epsilon_\infty(T_w) + \frac{\epsilon_s(T_w) - \epsilon_\infty(T_w)}{1 - j\omega\tau(T_w)},\end{aligned}\quad (1)$$

hvor T_w er temperaturen, ϵ_∞ og ϵ_s er henholdsvis den optiske og statiske permittivitet, mens symbolet τ angiver relaksationstiden. En graf af ligning (1) som funktion af frekvens og temperatur er vist i figur 1. Den reelle del, $\epsilon'_{r,w}$, antager høje værdier i den lave del af frekvensområdet (hvilket foretrækkes for at kunne anslå de ønskede dipolresonanser), mens den aftager ved højere frekvenser, hvor tabene (angivet med $\epsilon''_{r,w}$) går op. Dette begrænser brugen af vand ved høje frekvenser, da tabene utvivlsomt vil dæmpe resonanserne. Et fald i temperaturen mindsker $\epsilon'_{r,w}$, mens en stigende temperatur omvendt mindsker tabene. Figur 1 vidner

om et materiale med omfattende dynamiske egenskaber og med moderate tab i den lave ende af det viste frekvensområde (op til ca. 2 GHz ved 20°C).



Figur 1. Relativ permittivitet af vand som funktion af frekvens, f , og temperatur, T_w .

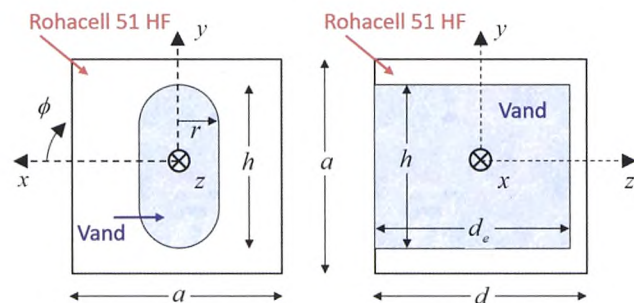
Resultater og diskussioner

Vi viser først en MF som via en simpel mekanisk rotation enten blokerer eller tillader transmission af bølger, og som dermed fungerer som et simpelt filter eller en switch. Dernæst demonstreres et MF-reflekt-

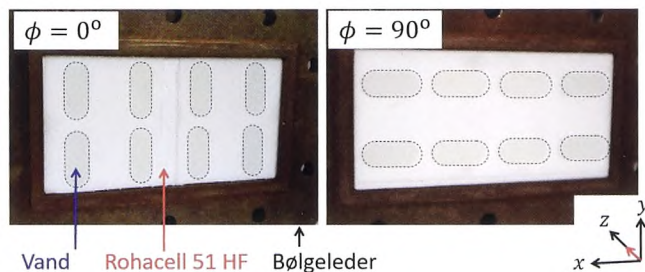
array, og endelig diskuterer vi, hvorledes en enkel vandinklusion i form af en halvkugle, anslået med en kort monopolantenne, kan føre til elektrisk små dielektriske resonator-antenner.

Metaflader som filtre og switches

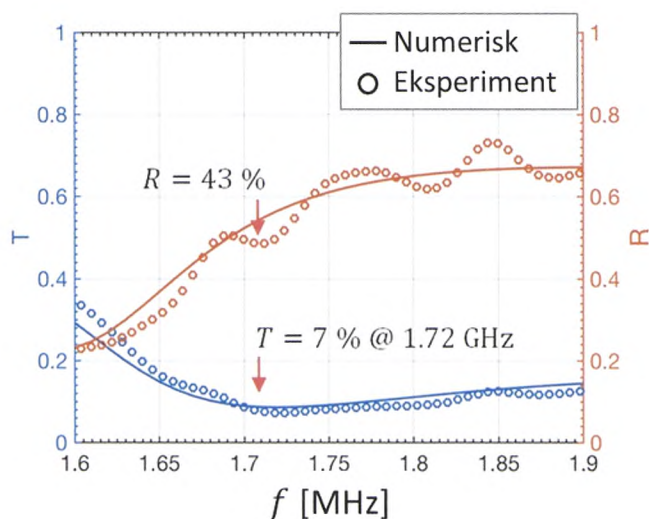
Vi betragter polarisationsfølsomme MF'er, som består af simple stang-lignende vandinklusioner indlejret i et Rohacell 51 HF-baggrundsmedium med en lav permittivitet [6, 8]. Figur 2a viser den såkaldte enhedscelle set både ovenfra (venstre) og fra siden (højre). Et rektangulært (x, y, z) -koordinatsystem er indført som vist i figuren. Perioden for fladen er angivet med a , mens ϕ angiver orienteringen af inklusioner. Enhedscellen er optimeret således, at transmissionen igennem fladen minimeres ved 1,7 GHz, når stængerne antager $\phi = 0^\circ$ -orientering, mens den maksimeres ved 90° ; de geometriske parametre har værdierne $a = 27,4$ mm, $r = 5$ mm, $h = 22,5$ mm, $d_e = 18,7$ mm og $d = 25$ mm. To flader, med hver sin orientering af vandinklusioner, blev fremstillet til dette formål jf. figur 2b, der viser fladerne i en sektion af en rektangulær L -bånds (1–2 GHz)-bølgeleder, som vi har anvendt til den eksperimentelle karakterisering. Den røde pil angiver udbredelsesretningen for den indkommende bølge, som er den grundlæggende TE_{10} -mode [11] i det frekvensområde, som har vores interesse.



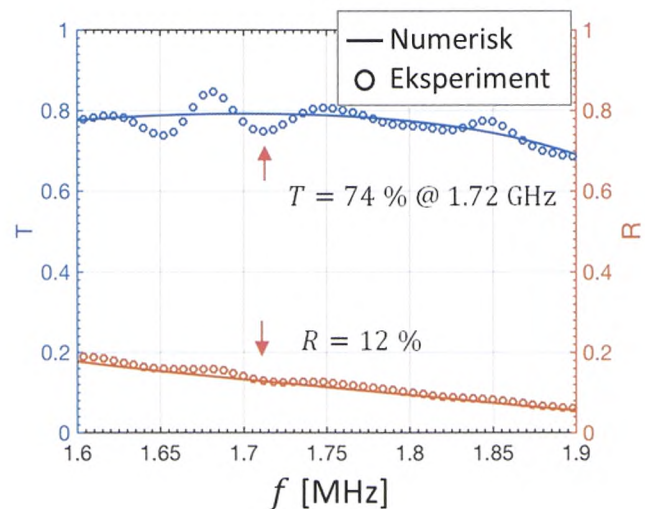
(a)



(b)



(c)



(d)

Figur 2. (a) Stang-lignende vandinklusion for filter/switch-MF'er, (b) viser de fremstillede MF'er, (c) de numeriske og eksperimentelle resultater for transmittans (T) og reflektans (R) for $\phi = 0^\circ$ -orientering, og (d) for $\phi = 90^\circ$ -orientering.

Frekvensresponsen for de to MF'er er vist i figur 2c for $\phi = 0^\circ$ og i figur 2d for $\phi = 90^\circ$, hvor T er dens transmittans, og R er dens reflektans. Det er tydeligt, at den transmitterede effekt er særdeles undertrykt for $\phi = 0^\circ$ -orienteringen af vandinklusioner. Mere specifikt er det kun omkring 7% af den indfaldende effekt, som transmitteres ved 1,72 GHz, mens pasbåndet genoprettes efter en simpel mekanisk rotation på 90° , hvor hele 76% af den indkommende effekt går igennem. Den vandbaserede MF fungerer altså som et filter eller en switch, som ændrer fladens transmittans hele 70% gennem en simpel mekanisk rotation.

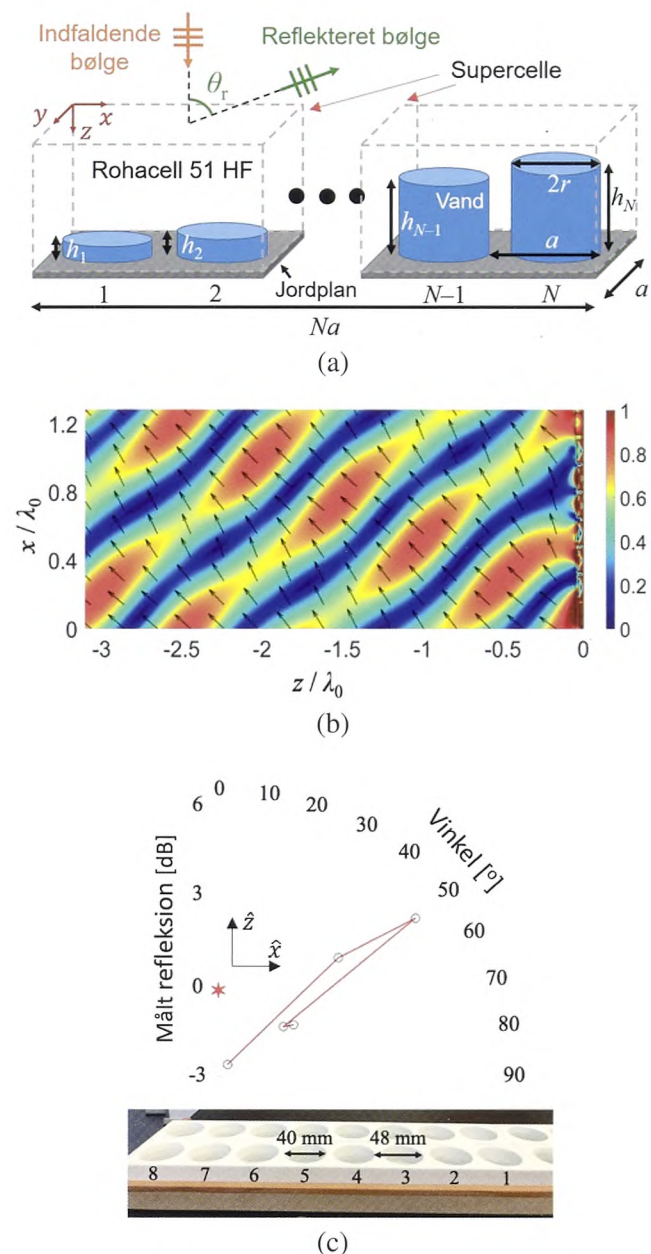
Selvom det ikke er vist eksplicit heri, bemærkes det, at den omtalte switching-funktion også kan realiseres med flader, som er i vakuum (eller luft), og som er belyst med fx plane bølger eller andre bølgetyper, som udstråles af mere lokaliserede kilder såsom dipolantenner. Desuden kan effektiviteten styrkes, hvis flere af disse MF'er stables sammen i en såkaldt MF-stak. Interessant nok kan sådan en stak på effektiv vis indfange, lede og fokusere effekten fra en nærliggende dipolantenne i retningen, hvori fladerne er stablet sammen. Dette sker naturligvis kun, hvis alle flader har $\phi = 90^\circ$ -orienteringen, mens $\phi = 0^\circ$ -orienteringen blokerer transmissionen kraftigt.

Metaflader som reflekt-arrays

Når en plan bølge falder på en plan dielektrisk / metallisk overflade, vides det, at indfaldsvinklen er lig udfaldsvinklen, jf. den almindelige Snells refleksionslov. Hvis man derimod modificerer fladerne ved fx at tilføje inklusioner, som introducerer kontrollerede rumlige fasehop, kan retningen af de reflekterede bølger styres på vilkårlig vis. Dette er i grove træk grundprincippet for de såkaldte reflekt- og transmit-arrays, som længe har været kendte i antenneverden [12, 13], men som for nylig blev kædet sammen med MF'er og de såkaldte generaliserede Snells refleksions- og transmissionslove [2, 14].

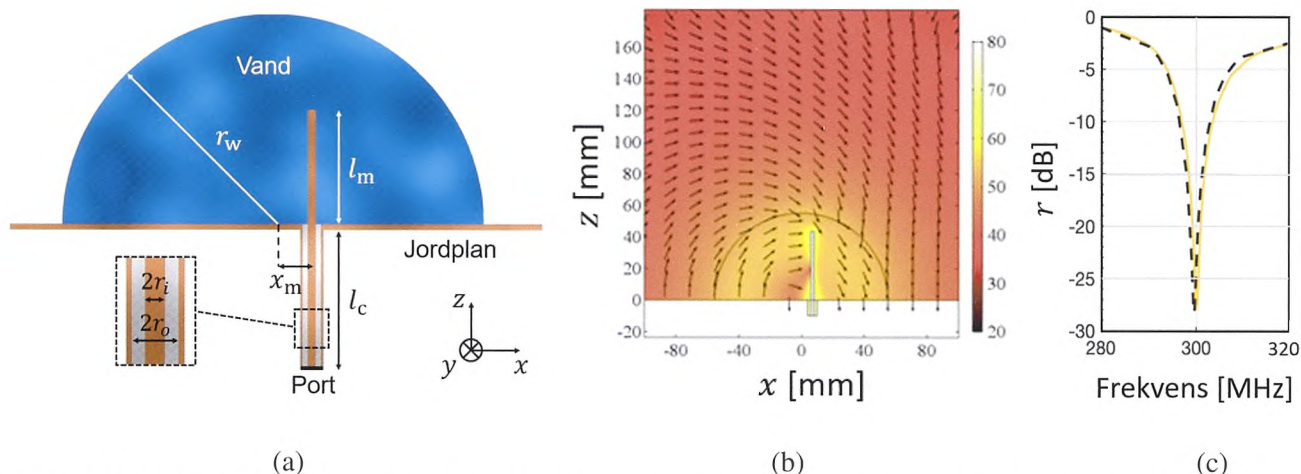
Vi har designet et reflekt-array, som består af N forskellige cylindriske vandinklusioner, igen indlejret i et Rohacell 51 HF-baggrundsmedium med et metallisk jordplan (flade) på bagsiden [8]. Den enkelte cylinder sidder inde i en enhedscelle med perioden a , mens gruppen af de N cylindre udgør supercellen (med perioden Na) for reflekt-arrayet, se figur 3a, som også viser det indførte, rektangulære (x, y, z) -koordinatsystem. Ved at variere vandniveauet i de enkelte cylindre og på den måde anslå magnetiske dipolresonanser med forskellig størrelse og fase, kan vi opnå et totalt faseskift for refleksionskoefficienten på 2π . Faseskiftet muliggør refleksionen af en normalt indfaldende bølge i en vilkårlig retning θ_r , som ikke er i overensstemmelse med den almindelige Snells refleksionslov. Vores supercelle inkluderer 8 cylindre med samme radius $r = 20$ mm, og de respektive højder h_i , $i = 1, \dots, 8$, er 6; 9,6; 10,2; 10,5; 10,7; 10,9; 11,5 og 14,7 mm, mens perioden $a = 48$ mm. Hver cylinder introducerer et faseskift på 45° , og fra den generaliserede Snells refleksionslov [2, 14] bestemmes den forventede refleksionsvinkel til at være $\theta_r \approx 51^\circ$. Fladen er belyst med en normalt indfaldende

plan bølge, hvor styrken af det elektriske felt er 1 V/m, og frekvensen er 1 GHz.



Figur 3. Reflekt-array-supercellen med N cylindriske vandinklusioner (a), størrelsen af det reflekterede elektriske felt (farve) og retning af energiudbredelsen (pile) (b), samt målt refleksion for den fremstillede MF, vist med supercelle (c).

De numeriske resultater er vist i figur 3b, hvor farven angiver størrelsen af det reflekterede elektriske felt, mens pilene angiver udbredelsesretningen for energien. Det reflekterede felt er tilnærmelsesvist en plan bølge, som udbreder sig i en retning, der danner en vinkel på ca. 51° med normalen (som svarer til z -aksen i den viste figur) som forventet. En prototype af reflekt-arrayet indeholdende 4 superceller blev fremstillet, og et udsnit af denne er vist i figur 3c. En specielt udviklet måleopstilling med bl.a. ETS-Lindgren-hornantenner som sender- og modtager-antennener blev brugt i den eksperimentelle karakterisering af reflekt-arrayet. Målingerne er vist i figur 3c, og de afslører klart, at størstedelen af effekten reflekteres i en retning som svarer til omkring 51° .



Figur 4. Vandbaseret dielektrisk resonator-antenne (a), det simulerede elektriske felt (b), samt den simulerede (stiplet linje) og målte refleksionskoefficient (fuldt optrukne linje) (c).

Selvom det ikke er vist i den nærværende artikel, kan en simpel omfordeling af vand imellem de enkelte celler føre til andre værdier af θ_r og dermed til rekonfigurerbare MF'er, som er af interesse for bl.a. kommunikationssystemer.

Metaflade-vandinklusion som dielektrisk resonator-antenne

Mens udvalgte og nøje fordelte vandinklusioner kan danne rammen om MF'er med helt særlige egenskaber, er det lige så interessant at bemærke, at blot en enkelt enhedscelle/vandinklusion kan danne grundlag for simple dielektriske resonator-antenners [8]. Som en illustration betragtes en elektrisk kort monopolantenne med længde l_m over en metallisk jordplan, se figur 4a.

Monopolantennen er en forlængelse af den inderste leder af et koaksialkabel RG402 med indre radius $r_i = 0,92$ mm og ydre radius $r_o = 2,99$ mm. I simuleringerne har vi i bunden af kablet placeret en port, hvorfra en effekt på 1 W sendes til antennen. Grundet den korte længde er monopolen dårligt tilpasset til fødekablet og udstråler derfor stort set ingen energi i det omgivende medium. Hvis man imidlertid beklæder monopolen med en vand-halvkugle, som vist i figur 4a, kan den tilpasses til både fødekablet og det omgivende medium. Dette skyldes resonanser, som monopolen anslår i vand-halvkuglen. Ved en temperatur på 20°C og en frekvens på 300 MHz (vakuumbølglængde $\lambda_0 = 1$ m) kan en magnetisk dipolresonans anslås i vand-halvkuglen, når $r_w = 55,18$ mm $\approx \lambda_0/18$, og når monopolen med $l_m = 43,6$ mm $\approx \lambda_0/23$ er forskudt fra halvkuglens centrum med en afstand på $x_m = 7$ mm $\approx \lambda_0/143$. Det numerisk udregnede elektriske felt er vist i xz -planen i figur 4b, hvor styrken i decibel (dB) er angivet med farverne, mens retningen er angivet med pilene. Et cirkulerende elektrisk felt, som er ækvivalent med en magnetisk dipol, ses tydeligt.

En prototype af resonator-antennen er blevet fremstillet, hvor halvkuglen blev fræset ind i en cylindrisk Rohacell 51 HF-klods, som efterfølgende blev limet til en cirkulær aluminium-jordplan med 1 m i diameter. Jordplanen havde to åbninger: en til monopolantennen og en til at fylde vandet i halvkuglen. Refleksionskoefficienten, r [dB], er vist i figur 4c; både den målte og den numerisk udregnede respons er inkluderet, og der rapporteres om god overensstemmelse. Mere specifikt

haves en refleksionskoefficient på -24,1 dB ved 300 MHz, som viser fremragende tilpasning af antennen til koaksialfødekablet. Stort set al effekt, som sendes langs koaksialkablet, bliver accepteret af resonator-antennen. Det noteres ydermere, at udstrålingseffektiviteten (forholdet imellem udstrålet effekt og effekten, som accepteres af antennen) er omkring 30%. Dette skyldes tab i vandet, men også resonator-antennens rekordlille størrelse, som, elektrisk set, er 18 gange mindre end vakuumbølglængden (det kan nævnes, for god ordens skyld, at en typisk resonant antenne kræver en størrelse, som er det halve af vakuumbølglængden). Hvis kravet om størrelsen lempes, kan man realisere vandantenners med højere udstrålingseffektiviteter, som dermed gør sådanne antenner ret interessante for en række anvendelser i VHF- og UHF-frekvensbånd.

Sammenfatning og konklusion

I nærværende artikel har vi opsummeret en række af vore nylige resultater inden for vandbaserede metaflader og antenner. Simple metaflader, som er i stand til at filtrere og reflektere elektromagnetiske bølger på vilkårlig vis, er blevet fremhævet. Desuden blev det vist, at selv enkelte vandinklusioner kan danne grundlag for elektrisk små dielektriske resonator-antenners. Vi har dermed demonstreret, at vand har et potentiale som et alternativt elektromagnetisk materiale til en række anvendelser inden for mikrobølge- og antennteknik. Selvom vandbaserede metaflader ikke kan konkurrere med konventionelle metaflader, når det gælder fx hastigheden, så bestyrkes potentialet og interessen for disse strukturer med vands lave pris, tilgængelighed, miljøvenlighed og de omfattende dynamiske egenskaber, som vand har.

Litteratur

- [1] G. V. Eleftheriades og N. Engheta (2011) "Metamaterials: Fundamentals and Applications in the Microwave and Optical Regimes", *Proc. of the IEEE*, bind **99**, side 1618–1621.

- [2] H.-T. Chen, A. J. Taylor og N. Yu (2016) "A review of metasurfaces: physics and applications," *Rep. Prog. Phys.*, bind **79**, side 076401.
- [3] S. Jahani og J. Zubin (2016) "All-dielectric metamaterials," *Nature Nanotechn.*, bind **11**, side 23–36.
- [4] A. Andryieuski, S. M. Kuznetsova, S. V. Zhukovsky, Y. S. Kivshar og A. V. Lavrinenko (2015) "Water: promising opportunities for tunable all-dielectric electromagnetic metamaterials," *Sci. Rep.*, bind **5**, art. nr. 13535.
- [5] Comsol Multiphysics 5.3. (2017) www.comsol.com.
- [6] R. E. Jacobsen, A. V. Lavrinenko og S. Arslanagić (2018) "Water-based metasurfaces for effective switching of microwaves," *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, bind **17**, side 571–574.
- [7] R. E. Jacobsen, A. V. Lavrinenko og S. Arslanagić (2019) "Electrically small water-based hemispherical dielectric resonator antenna," *Appl. Sci.*, bind **9**, nr. 22, doi:10.3390/app9224848.
- [8] J. Ø. Nielsen, R. E. Jacobsen, A. V. Lavrinenko og S. Arslanagić (2020) "Water-based reflect-arrays," 14th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), København.
- [9] S. Arslanagić, J. Ø. Nielsen, R. E. Jacobsen og A. V. Lavrinenko (2019) "Water-based microwave metasurfaces and electrically small antennas," 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials, Rom, Italien. Inviteret bidrag.
- [10] W. Ellison (2007) "Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure over the frequency range 0 – 25 THz and the temperature range 0 – 100°C," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, bind **36**, side 1–18.
- [11] C. A. Balanis (2012) *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [12] D. M. Pozar, S. D. Targonski og H. D. Syrigos (1997) "Design of millimeter wave microstrip reflectarray," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, bind **45**, nr. 2, side 287–296.
- [13] C. A. Balanis (2016) *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [14] N. Yu og F. Capasso (2014) "Flat optics with designer metasurfaces," *Nat. Mat.*, bind **13**, side 139–50.



Samel Arslanagić er lektor i anvendt elektromagnetisk feltteori ved DTU Elektro. Hans forskningsinteresser inkluderer bl.a. spredning og interaktion af elektromagnetiske bølger med komplekse materialestrukturer fra radio og op til optiske frekvenser. Han er modtager af DTUs Årets Underviserpris i 2018.



Rasmus E. Jacobsen er ph.d.-studerende ved DTU Fotonik og DTU Elektro. Hans forskningsprojekt omhandler vandbaserede elektromagnetiske systemer og materialer. Rasmus er dimittend fra DTU Elektro med speciale i trådløs kommunikation.



Andrei V. Lavrinenko er lektor og leder af Metamaterials-gruppen ved DTU Fotonik. Hans forskningsinteresser ligger inden for metamaterialer og plasmoniske/optiske materialer, fotoniske krystaller, numeriske beregningsmetoder i fotonik, samt undervisningsmetoder.

PFEIFFER VACUUM

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Svingninger, opdrift og mørkt stof

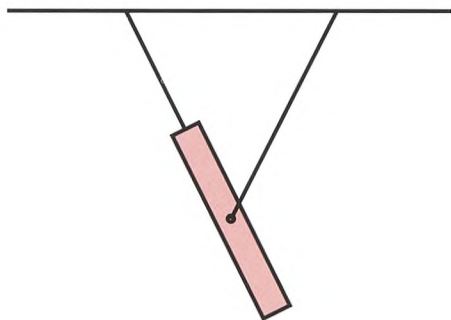
- breddeopgave 85, 86 og 87 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC

Her bringes løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af Kvant var disse breddeopgaver (nr. 85, 86 og 87 i rækken her i Kvant):

Breddeopgave 85. Svingninger

En homogen stang er ophængt i to snore, som vist på figuren. Hvordan svinger stangen, hvis henholdsvis den ene og den anden snor knækker? Begrund svaret.



Løsning

Knækker den venstre snor, vil stangen herefter være påvirket af tyngdekraften og snorkraften fra den anden snor. Da begge kræfter angriber i tyngdepunktet, vil stangen ifølge momentsætningen om tyngdepunktet for stive legemer bevare sin retning i rummet. Medens den ifølge tyngdepunktssætningen vil svinge, som var stangens masse samlet i dens midtpunkt.

Knækker den højre snor, vil stangen herefter ifølge tyngdepunktssætningen svinge bundet til den anden snor. Men snoren og stangen vil holde op med at være i forlængelse af hinanden. Snorkraften fra den anden snor vil derfor få en projektion vinkelret på stangen og dreje den om dens tyngdepunkt. Alt i alt bliver bevægelsen af stangen en kaotisk blanding af rotation om dens tyngdepunkt og svingning af tyngdepunktet.

Breddeopgave 86. Opdrift

En spand vand, hvori der flyder en træklods, sættes på gulvet i en elevator. Hvorledes ændrer træklodsens stilling sig i forhold til vandoverfladen, når elevatoren begynder at køre? Begrund svaret.

Løsning

Træklodsens stilling i vandet, når elevatoren er i hvile, er givet ved, at opdriftkraften på den modsvarer tyngdekraften på den. Opdriftkraften er lig med tyngdefeltstyrken, g , gange massen af det fortrængte vand. Tyngdekraften er lig med massen af træklodsens gange g . Massen af det fortrængte vand er derfor lig med massen af træklodsens.

Når elevatoren begynder at køre med accelerationen a , befinder vi os i et accelereret referencesystem, hvor det resulterende kraftfelt er $g - a$. Her er a positiv, hvis acceleration er nedadrettet, og negativ, hvis accelerationen er opadrettet. Vi skal nu gange de to balancerende kræfter. Men det ændrer ikke på, at massen af det fortrængte vand stadig må være lig med massen af træklodsens. Træklodsens stilling i forhold til vandoverfladen er derfor upåvirket af, at elevatoren kører.

Breddeopgave 87. Mørkt stof

Hypotesen om mørkt stof blev først fremsat i 1933 af Fritz Zwicky, fordi han observerede, at galakserne i en bestemt galaksehob bevægede sig, som om massetætheden i galaksehoben var omkring 400 gange større end massetætheden af det synlige stof i galaksehoben. Hvor mange gange hurtigere bevægede galakserne i galaksehoben sig, end de ville have gjort, hvis det alene var synligt stof, der bevægede dem? Begrund svaret.

Løsning

Lad os antage, at galaksehoben er kugleformet med en jævn massetæthed ρ . Hvis vi for simpelhedens skyld antager jævn cirkelbevægelse, er den fart v , som en galakse med massen m i afstanden r fra galaksehobens centrum bevæger sig med, givet ved:

$$m \frac{v^2}{r} = Gm \frac{4\pi\rho r^3}{3r^2} \quad (1)$$

hvor G er gravitationskonstanten i Newtons gravitationslov. Det følger af Newtons anden lov for en jævn cirkelbevægelse sammen med Newtons teorem, at påvirkningerne fra stoffet i galaksehoben i større afstande fra centrum end r er nul, og at påvirkningen fra stoffet i mindre afstande end r svarer til, at det var samlet i centrum.

Af ligningen ses det, at en vurderet forøgelse af ρ med en faktor 400 må have hængt sammen med en iagttaget forøgelse af v med en faktor $\sqrt{400} = 20$ i forhold til det forventede, hvis det alene var synligt stof, der bevægede galakserne.

Kommentar

Nu om dage er det oprindelige breddekursus på RUC opdelt i to. Fysisk problemløsning I på bachelordelen af fysikstudiet og Fysisk problemløsning II på kandidatdelen. På kandidatdelen stilles der eksamensopgaver i et helt fysikpensum i bredden, på bachelordelen det halve af dette pensum. De tre mekanikopgaver her er fra den samme eksamen på Fysisk problemløsning

I. Ud over de tre mekanikopgaver bestod eksamenssættet af en relativitetsteoriopgave og en hydrodynamik/termodynamikopgave. I alt fem opgaver, hvoraf de studerende skulle besvare fire efter eget valg.

Jeg har valgt at bringe de tre mekanikopgaver fra samme eksamen samlet for at kunne diskutere deres relative sværhedsgrad.

Da min medeksaminator (Tina Hecksher) og jeg bedømte eksamensbesvarelsene, støttede vi os som sædvanligt til point, som vi hver for sig gav for besvarelsen af de enkelte opgaver i hvert opgavesæt, for slutteligt at vurdere besvarelsen af opgavesættet i dets helhed. Lægges både mine og Tinas point ved den pågældende eksamen sammen for alle de studerendes besvarelses, gav vi 48% af det maksimalt opnåelige sammenlagte antal point for besvarelsene af svingningsopgaven, 67% af det maksimalt opnåelige antal point for besvarelsene af opdriftopgaven, og 75% for opgaven om mørkt stof. Procenterne skal ikke tages for mere end en strømpil. Fysikstudiet på RUC er lille (og hyggeligt) med kun 11 studerende til den pågældende eksamen. Og vores måde at give point på er ikke udtryk for eksakt videnskab. Ikke desto mindre er procenterne i overensstemmelse med, hvad man kunne forvente.

Opgaven om mørkt stof er emnemæssigt spændende og interessant, men den mindst udfordrende af de tre opgaver. Newtons anden lov anvendt på jævn cirkelbevægelse er mere eller mindre indarbejdet rutine hos de fleste af de studerende fra mange andre problemløsninger. Det samme gælder til en vis grad anvendelsen af Newtons teorem.

Opgaven om opdrift (som skyldes Poul Winther Andersen) er begrebsmæssigt mere udfordrende. De studerende kender godt Arkimedes' lov. De ved også godt, at der optræder supplerende kræfter i et accelereret referencesystem. Men en ting er at kende og kunne anvende Arkimedes' lov i konkrete situationer. Noget andet er at have fået ind under huden, hvorfor Arkimedes' lov gælder. Og derigennem være klar over, at størrelsen af det resulterende kraftfelt i elevatoren er uden betydning.

At opgaven om den svingende stang var den sværeste, kom som sagt ikke som nogen overraskelse. Det er en kendt sag, at begrebsforståelsen vedrørende det grundlæggende i Newtons mekanik er svær at tilegne sig. Googler man "Force concept inventory", finder man en overvældende kaskade af fysikdidaktisk litteratur fra 1985 og fremefter, som rapporterer undersøgelse efter undersøgelse, der dokumenterer gymnasieelevers og fysikstuderendes mangel på grundlæggende begrebslig forståelse af Newtons mekanik. Eleverne og de studerende kan typisk kun anvende Newtons mekanik i indøvede standardsituationer.

I vores tilfælde havde nogle af de studerende styr på, hvad der sker, når den venstre snor knækker. Men ingen havde et rimeligt bud på, hvad der sker, når den højre snor knækker. Det mest almindelige bud var, at den venstre snor og stangen så svingede ligesom et pendul i et bornholmerur, som om snoren og stangen var stift forbundne. Og det kan ikke lade

sig gøre. Kalder vi længden af snoren l_1 , længden af stangen l_2 , massen af stangen M , vinklen med lodret Θ , og tyngdefeltstyrken g , skal en sådan bevægelse både respektere tyngdepunktsætningen for bevægelsen af stangens massemidtunkt, og momentsætningen for stang plus snors drejning omkring ophængspunktet i loftet:

$$M(l_1 + l_2/2)\ddot{\Theta} = -Mg \sin \Theta \quad (2)$$

og

$$M((l_1 + l_2/2)^2 + l_2^2/12)\ddot{\Theta} = -Mg \sin \Theta (l_1 + l_2/2) \quad (3)$$

For en i praksis masseløs snor, der ikke kan levere en kraft på tværs af sin længderetning, viser de to ligninger, at antagelsen om en svingning ligesom pendulet i et bornholmerur for alle værdier af $\Theta (\neq 0)$ medfører en modstrid:

$$M((l_1 + l_2/2)^2 + l_2^2/12) = M(l_1 + l_2/2)^2 \quad (4)$$

De studerende forsøgte sig typisk med det fysiske pendul som skema for deres overvejelser over, hvad der sker, når den højre snor knækker. Hvorimod de ikke foretog analysen mere grundlæggende ud fra tyngdepunktsætningen og momentsætningen for stive legemer. Hverken kvalitativt eller kvantitativt. Det er heller ikke nemt. Især da ikke kvantitativt. Hvis vi antager snoren stiv og forbundet med stangen med et drejeleje, er der tale om et kaospendul. Og endnu værre er det med en ikke stiv snor, som ikke behøver at være strakt hele tiden. Opgaven var derfor først og fremmest en invitation til at gøre sig kvalitative overvejelser ved hjælp af grundbegreberne i Newtons mekanik for stive legemer.

Hvorfor stille så udfordrende en opgave til eksamen?

Den nævnte kaskade af undersøgelser ved hjælp af "Force concept inventory" viser samstemmende, at studerende typisk bliver stående ved situationsbundne, konkrete forståelsesmåder, så længe de rækker. For at lære dem mere generelle, abstrakte forståelsesmåder er det nødvendigt at udfordre dem med eksempler, hvor den konkrete og situationsbundne forståelse ikke rækker. Da vores undervisning bygger på samlingen af tidligere eksamensopgaver, er der derfor brug for sådanne udfordrende opgaver i samlingen.

Men der er også mere opskriftorienterede opgaver i samlingen. Som den om opdrift, og i højere grad den om mørkt stof.

Breddeopgave 88. Hvilemasse

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen august 2015, nr. 88 i rækken her i Kvant):

En snurretop på en vægt vejer mere, jo hurtigere den snurrer. Hvor hurtigt skal den snurre, for at det kan måles? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

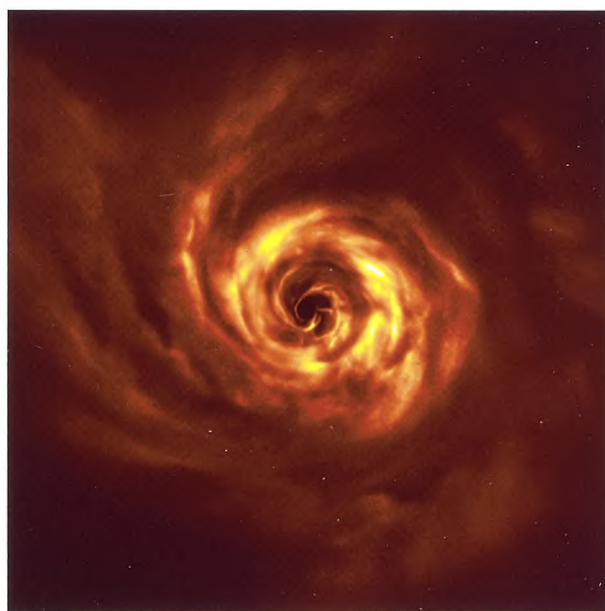
KVANT-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

Teleskop observerer planetfødsel og et jordnært sort hul

ASTROFYSIK. ESOs VLT (European Southern Observatory's Very Large Telescope) i Chile har observeret fødslen af et nyt planetsystem ved stjernen AB Aurigae i stjernebilledet Kuskens kun 520 lysår fra Jorden. Omkring stjernen er der en skive af støv og gas, hvori teleskopet har observeret en spiralstruktur med det lille twist, som astronomerne mener er et tegn på dannelsen af en ny planet. Det er første gang, at dannelsen af en planet er observeret, og observationen er sensationel, da den kan hjælpe forskerne med bedre at forstå, hvordan nye planeter dannes. Astronomer har observeret utallige exoplaneter, men ved meget lidt om, hvordan de dannes. De ved, at planeterne dannes i skiverne omkring yngre stjerner, når støv og gas klumpes sammen. Den nydannede planet skubber til gassen og skaber forstyrrelser i skiven, der udbreder sig i form af en bølge. Når planeten roterer omkring stjernen, bliver bølgen formet til en spiralarm.

Allerede for nogle år siden observerede astronomerne tegn på en mulig planetdannelse omkring AB Aurigae med ALMA-teleskopet (Chile), da de så to spiralarme af gas tæt på stjernen. For at få et godt billede brugte de SPHERE-instrumentet på ESOs VLT, som kan tage nogle detaljerede billeder. SPHERE-instrumentet bruger en metode, der kaldes *direkte afbildning* (direct imaging), hvor det forsøger at tage billeder kun af planeten, hvilket er meget svært, da lyset fra stjernen er så kraftigt, at planeten ikke kan ses. SPHERE kan blokere for det meste af stjernens lys, så planeten er synlig. Lyset udsendt fra stjernen er upolariseret, men når det reflekteres fra støvskiven og fra planeten, er det polariseret, og derfor kan de to lyskilder adskilles, og lyset fra stjernen kan blokeres, så det er muligt at få et skarpt billede af selve planeten. Med SPHERE kunne astronomerne se det svagere lys fra den indre skive, og de bekræftede eksistensen af spiralarmene, og så det twist, som forventes ud fra teoretiske modeller af planetdannelse. De to spiralarme, som bevæger sig hhv. indad og udad set fra planetens bane, mødes i et twist netop dér, hvor planeten er. Det er gennem spiralarmene, at planeten får gas og støv fra skiven, som den bruger til at vokse med. Astronomerne er i gang med at bygge et nyt teleskop, Extremely Large Telescope, som vil hjælpe dem med at få endnu mere detaljerede billeder af planetdannelser.



ESO har desuden for nylig fundet et sort hul kun 1000 lysår fra Jorden. Det sorte hul befinder sig i stjernebilledet Kikkerten, og er dermed det sorte hul, der er tættest på Jorden. Det sorte hul blev opdaget ved et tilfælde, da astronomerne observerede et dobbelt stjernesystem. De to stjerners bevægelser viste nemlig, at de kredsede omkring et sort hul. Faktisk er det sorte hul så tæt på Jorden, at de to stjerner i triplesystemet kan ses fra den sydlige halvkugle i klart vejr, endda uden et teleskop. Astronomerne har observeret en lille mængde sorte huller i vores galakse, men det nye sorte hul er specielt, da det er et af de første sorte huller, der ikke vekselvirker kraftigt med dets omgivelser, og derfor er helt sort. Sorte huller er som bekendt kun synlige ved at observere, hvordan de påvirker deres omgivelser, eller ved at observere den stråling, som nogle sorte huller udsender (fx Hawkingstråling eller røntgenstråling fra et sort hul-stjernesystem). Ved at studere den indre stjernes kredsløb kunne forskerne udregne det sorte huls masse til fire gange Solens masse, og det var den høje masse, der gjorde, at de vurderede, at der var tale om et sort hul. Efter opdagelsen af det rolige, sorte hul tror forskerne, at der findes mange flere mindre aktive sorte huller i Mælkevejen, og nu har de en idé om, hvad de skal lede efter for at finde dem.

Kilde: A. Boccaletti m.fl., *Possible evidence of ongoing planet formation in AB Aurigae*, *Astronomy&Astrophysics* 637, **L5** (2020) & T. Rivinius et al., *A naked-eye triple system with a nonaccreting black hole in the inner binary*, *Astronomy&Astrophysics* 637, **L3** (2020).