

KVANTEFELTTEORI FRA EN OTTE SIDER LANG FORMEL TIL BAGSIDEN AF EN SERVIET

Vores forståelse af vekselvirkninger på naturens mest fundamentale niveau bygger på drabelige beregninger inden for såkaldt kvantefeltteori. Jacob Bourjaily arbejder på at gøre de drabelige beregninger mere simple og dermed også smukkere.

Da den berømte engelske fysiker Paul Dirac, en af kvantemekanikkens grundlæggere, i 1956 besøgte universitetet i Moskva, blev han, som traditionerne foreskrev, bedt om at skrive et selvvalgt budskab på en tavle. Med store bogstaver skrev Dirac sætningen: *A physical law must possess mathematical beauty* (En fysisk lov skal besidde matematisk skønhed).

I en vis forstand kan man sige, at "smuk" i denne sammenhæng bør oversættes til "simpel", om end det ikke betyder, at vi snakker om noget, der hverken er let eller ukompliceret. Det vil trods alt være en tilsnigelse at kalde kvantefeltteori for let.

For de fleste mennesker giver det nok heller ikke så megen mening at snakke om matematisk skønhed eller simpel kvantefeltteori, men det gør det for Jacob Bourjaily, der er adjunkt på Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet. Når vi andre ser tal og mystiske græske symboler i én vild forvirring, ser han den teoretiske fysiks svar på Mona Lisa.

»I de seneste år har vi næsten dagligt lært, at selv de smukke love, som Dirac beskrev, matematisk set er langt smukkere, end han

selv kan have forestillet sig,« siger Jacob Bourjaily.

Kvantefeltteori er en matematisk værktøjskasse

Dyb vejtrækning, og hold nu fast, for her kommer et lynkursus i kvantefeltteori:

Kvantefeltteori er den matematiske ramme, som forskere bruger til at beskrive naturens mest fundamentale love. Det er et sæt matematiske værktøjer for studier af vekselvirkninger mellem elementarpartiklerne, eksempelvis kvarker, fotoner, gluoner og elektroner. Hvordan opfører de sig, når de er tæt på hinanden? Kvantefeltteorien er så at sige værktøjskassen for forståelse af naturens mest fundamentale love, på samme måde som geometrien er den matematiske værktøjskasse for forståelsen af rum, og algebra er den matematiske værktøjskasse til forståelse af matematiske operationer som plus, minus, gange etc.

Så langt så godt. Nu skal vi bare lige have på plads, hvad kvantefeltteorien gør godt for.

Sammenligner man kvantefeltteori med en af fysikkens mest berømte love, Newtons anden lov (kraft = masse x acceleration), kan man bedre forstå, hvad man skal bruge kvante-

feltteori til. Newtons anden lov gør det muligt at forudsige, hvad der vil ske i fremtiden, når man kender til nogle objekters masser samt de kræfter, som influerer på dem. Forestil dig et billardbord, hvor ballerne flyver hen over den grønne filt. Ballerne har hver især en masse, og de bliver påvirket af kræfter, som kan være friktionen med underlaget, vindmodstanden, tyngdekraften, stødet med køen og så videre. Hvis man kender til størrelsen på masserne og de kræfter, som påvirker ballerne, kan man regne ud, hvor alle ballerne vil være på bordet efter et stød. Voila, sådan fungerer det.

Samme princip fungerer i alle mulige sammenhænge. Eksempelvis beskrev Newton selv, hvordan man ved hjælp af tyngdekraften og planeternes positioner på et givent tidspunkt (masserne) kan regne ud, hvor planeterne vil være på et hvilket som helst tidspunkt ude i fremtiden – en eksperimentel forudsigtelse. Samme princip gælder inden for kvantefeltteori.

»Som med klassisk fysik er det nødvendigt med to informationer for at kunne lave forudsigelser i kvantefeltteorien: Tilstanden af de involverede partikler og de kræfter, som de interagerer med,« forklarer Jacob Bourjaily.

Om forfatteren
Kristian Sjøgren er videnskabsjournalist
ksjoegren@gmail.com



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Aarhus Universitet, Lars Arge. Læs mere på www.dff.dk



CERN kan ikke eksistere uden kvantefeltteori

Inden for kvantefeltteori regner man dog ikke på planeternes placering på nattehimmelen eller billardballerne på den grønne fil, men derimod på udfaldet af vekselvirkningerne mellem de mindste bestanddele af atomer.

Kvantefeltteori er eksempelvis nødvendig for at forstå de eksperimenter, som man laver med den store partikelaccelerator LHC (LARGE Hadron Collider) på CERN, hvor forskere skyder protoner ind i hinanden. Udfaldet af disse kollisioner

kan forskere forudsige teoretisk ud fra såkaldte spredningsamplituder, der angiver den relative sandsynlighed for de mulige udfald af en given vekselvirkning mellem partiklerne. Her skal vi have fat i kvantefeltteoriens matematiske værktøjskasse, for at den slags beregninger og forudsigelser kan komme i hus. Det lyder måske som simple beregninger, men det er det langt fra. Ifølge Jacob Bourjaily har det krævet heroiske anstrengelser og en meget stor kugleramme at komme dertil, hvor vi er i dag, og hvor det overhovedet kan lade sig gøre.

Simpelt regnestykke blev til en otte sider lang formel

Et eksempel på kompleksiteten i kvantefeltteoriens matematiske værktøjskasse er en beregning af, hvordan man kan støde 2 gluoner ind i hinanden og få 4 gluoner ud af det. Det kan man på lige præcis 220 forskellige måder. Det lyder måske ikke af meget, men da forskerne Stephen Parke og Tomasz Taylor i 1985 lavede en matematiske formel, som beregnede de 220 forskellige kollisioner, måtte de benytte en af datidens supercomputere til at komme frem til en otte sider lang formel (8 sider!), som

Atlas-eksperimentet med LHC på CERN har til formål et kortlægge naturens mest fundamentale byggesten og naturens mest fundamentale kræfter. Illustration: ATLAS Collaboration - CERN.



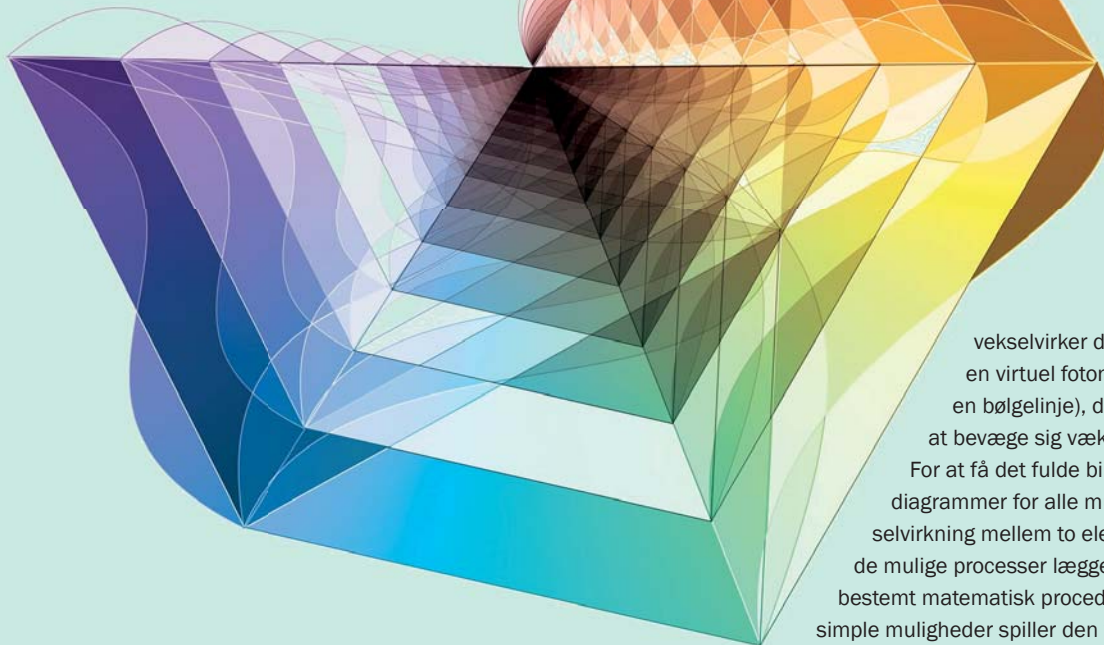
Om Jacob Bourjaily

Jacob Bourjaily er adjunkt ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Han afsluttede sin ph.d. i 2011 ved Princeton University og fortsatte derefter sit arbejde ved Harvard University, indtil han i 2014 flyttede sig selv og sin forskning til Danmark.

Med økonomisk støtte fra Det Frie Forskningsfond har Jacob Bourjaily opbygget sin egen forskningsgruppe på Niels Bohr Institutet, som inden for kvantefeltteori har været verdensledende i mange år. Muligheden for at arbejde sammen med kollegaerne på Niels Bohr Institutet spillede en stor rolle i Jacob Bourjailys beslutning om at flytte til Danmark. Jacob Bourjaily har også arbejdet med strengteori og partikelfysisk fænomenologi.

Fra Feynman- diagrammer til ny forståelse

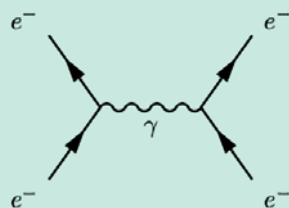
Illustration af et nyt matematisk objekt, som kaldes et *amplituhedron*.



vekselvirker de ved at udveksle en virtuel foton (som tegnes som en bølgelinje), der får de to linjer til at bevæge sig væk fra hinanden igen. For at få det fulde billede må man tegne diagrammer for alle mulige udfald af en vekselvirkning mellem to elektroner. Bidragene for de mulige processer lægges så sammen efter en bestemt matematisk procedure, sådan at de mest simple muligheder spiller den vigtigste rolle.

Naturens mindste byggesten – elementarpartiklerne – og de kræfter, der virker på dem (undtaget tyngdekraften), beskrives i en monumental teoretisk konstruktion kaldet "Standardmodellen". Historisk set har et helt afgørende værktøj til at etablere denne teori været såkaldte Feynman-diagrammer. De er en simpel måde at visualisere de mulige udfald af en given vekselvirkning, som fysikeren Richard Feynman foreslog i 1949. Siden 1930'erne havde fysikere forsøgt at regne på såkaldte spredningsamplituder, som er de relative sandsynligheder for de mulige udfald af en given vekselvirkning – for eksempel mellem to elektroner. Men disse beregninger viste sig overvældende vanskelige. Feynmans gennembrud var en intuitiv måde at tackle beregningerne på ved at visualisere de mulige udfald af en given vekselvirkning med simple pile og bølgelinjer.

Eksempelvis er den mest sandsynlige vekselvirkning mellem to elektroner, at de frastøder hinanden. I et Feynman-diagram tegnes denne situation som to streger, der nærmer sig hinanden – men før de mødes,



Feynman-diagram for to elektroner, der frastøder hinanden.

Problemet med Feynman-diagrammerne er, at beregningerne hurtigt bliver overvældende, når man regner på teorier, der involverer de stærke kernekræfter – det vil sige vekselvirkninger mellem kvarker og gluoner i atomkernerne. Det var det problem, som fysikere Parke og Taylor (omtalt i hovedteksten), i 1985 fandt en vej ud af, ved først at udregne spredningsamplituden for en vekselvirkning mellem 6 gluoner (2 ind og 4 ud) på den hårde måde og derefter udlede en generel formel på en enkelt linje, der kunne udregne nøjagtigt det samme.

En væsentlig grund til, at Feynman-diagrammerne kom til kort var, at de opererer med virtuelle partikler, som vi ingen muligheder har for at observere, men som kræver en hel masse matematik at holde rede på. I 2005 lykkedes det fysikerne Britto, Cachazo, Feng og Witten at udregne spredningsamplituder uden brug af virtuelle partikler, og i den proces udledte de Parke og Taylors formel.

Siden har Nima Arkani-Hameds gruppe ved Institute of Advanced Studies i New Jersey, som Jacob Bourjaily som studerende var en del af, yderligere vist, at de spredningsamplituder, som Britto og kolleger udregne, svarer til volumen af et nyt matematisk objekt, som de kalder et amplituhedron. Kort fortalt betyder det, at man kan få de samme svar ved at udregne volumen af et enkelt geometrisk objekt som ved at udregne tusinder af Feynman-diagrammer.

de publicerede videnskabeligt. Så komplicerede er beregningerne inden for kvantefeltteori.

Historisk har der dog været afgørende matematiske gennembrud, som har gjort det umuligt muligt og dermed åbnet døren for ny indsigt i naturens mest fundamentale vekselvirkninger – den mellem naturens mindste bestanddele. Tilbage i 1985 lykkedes det også Parke og Taylor nogle måneder senere at skære deres otte sider lange matematiske formel ned til et simpelt regnestykke på en enkelt linje, som med ganske få tal kunne beskrive det samme som den lange formel. Ikke nok med det, formlen virkede i princippet for vekselvirkninger mellem et vilkårligt antal gluoner og ikke kun seks (to ind og fire ud). Den korte formel ville dog ikke kunne verificeres, hvis ikke forskerne havde lavet benarbejdet med den lange formel først.

»En vigtig pointe er, at Parke og Taylor kunne tjekke, at deres gæt på en simple formel gav det rigtige resultat, fordi de først havde udført beregningerne på den hårde måde,« siger Jacob Bourjaily, der netop arbejder med den form for simplificering af kvantefeltteoriens komplekse matematiske værktøjer. Mere specifikt arbejder han i sit nuværende forskningsprojekt med at undersøge, om standardværktøjerne fra kvantefeltteorien kan reproducere udelukkende ved at benytte funktioner, der er kommet til veje på baggrund af observerbare data og ikke teoretiske data. De steder, hvor det indtil videre har været muligt at gøre sådan, har det ledt til dramatiske forbedringer i forhold til at forudsige udfaldet af eksperimenter og til fundamentale forståelsesændringer inden for både fysikken og matematikken.

Simplificeringen af kvantefeltteorien lader vente på sig

På trods af gennembruddene i forhold til at gøre kvantefeltteoriens matematiske formler og regler "smukkere", som Dirac ville have sagt det, er fremskridtene dog til

tider træge, og i dag undervises studerende i kvantefeltteori på en måde, der ikke adskiller sig nævneværdigt fra undervisningen i 1970'erne og 80'erne. Det er stadig møgsvært, selvom det måske ikke behøver at være det.

»Kvantefeltteori er meget teknisk krævende og svært, og det betyder, at vi skal igennem en utrolig mængde arbejde for at komme fra teori til forudsigelse af et eksperiment – hvad enten det er et tankeeksperiment eller et virkeligt eksperiment. Ikke desto mindre er de forudsigelser, vi når frem til, faktisk meget simple,« fortæller Jacob Bourjaily.

Da kvantefeltteori lettest beskrives med eksempler, tager vi lige et mere af slagsen.

I 1965 fik fysikerne Richard Feynman, Julian Schwinger og Sinitiro Tomonaga Nobelprisen i fysik for at forudsige forholdet mellem elektronens magnetiske og angulære moment (det kaldes for elektronens gyromagnetiske ratio).

Inden for kvantefeltteorien vil man i dag klassificere en del af det nobelpris-vindende regnestykke som et relativt simpelt problem, der tager studerende i kvantefeltteori en uges tid at løse med algebra i hånden. Og så er det også et sjovt et af slagsen.

»Efter problemet er løst, skal det matematiske udtryk fodres ind i en computer, og det vil computeren ofte ikke, så udtrykket skal simplificeres, og det tager en eftermiddag mere, før computeren forstår det. Ud af alle disse anstrengelser får man til sidst tallet 1. Man kan næsten ikke undgå at blive flov,« griner Jacob Bourjaily.

Beregningerne skal kunne være på bagsiden af en serviet

Alt det arbejde for at komme frem til tallet 1. Ja, man tænker da, at det må kunne gøres lettere, og det kan det også. Det har Jacob Bourjailys forskning blandt andet været med til at sørge for.

»Min forskning handler simpelthen om at reformulere det fundament, som kvantefeltteori hviler på, så vi kan komme fra teori til forudsigelse uden at skulle gennem så frygtelig meget arbejde,« forklarer Jacob Bourjaily.

Han understreger, at det ikke handler om at nå frem til andre og bedre forudsigelser. Forudsigelsen af tallet 1 i eksemplet passer jo perfekt med virkelige eksperimenter, så det er jo det korrekte svar. Det er i stedet måden, hvormed vi kommer frem til det korrekte svar på, der virker unødvendig bøvel. Tænk, hvis det tog en otte sider lang formular og en supercomputer at lægge tallene på bonen fra Netto sammen. Her er det godt, at den del af algebraen er simpel.

Jacob Bourjaily tror på, at en sådan forsimpelingsproces af kvantefeltteorien kan gøre os klogere på de fundamentale fænomener i naturen, selvom hans forskning ikke handler om at opdage ny fysik, eksempelvis hvad mørkt stof består af.

»Jeg tror, at når vi opdager, at en uges algebra kan reduceres til en hurtig beregning på en serviet, så afspejler det, at vi er kommet tættere på at forstå en dybere sandhed,« siger han. »Når vi fysikere gang på gang bliver overraskede over, hvor simple forudsigelser der kommer ud af vores heroiske beregninger, tyder det jo på, at vi ikke har forstået de underliggende teorier godt nok.«

Laver vanvittigt kompliceret beregning

Jacob Bourjaily har selv brugt masser af tid på at beregne ting, der er svære at beregne. Det har han gjort for at generere data, der kan gøre os klogere.

»Man kan tænke på det som eksperimentelle data, selvom det ikke er eksperimenter i den forstand, vi normalt tænker,« siger han. »Vi prøver ikke kun at lave forudsigelser af virkelige eksperimenter, men vi prøver også at gå til grænsen af vores beregningsmæssige muligheder for

Videre læsning

Artiklen bygger på et interview med Jacob Bourjaily.

Faglige artikler:

New Representations of the Perturbative S Matrix. Christian Baadsgaard, N. E. J. Bjerrum-Bohr, Jacob L. Bourjaily, Simon Caron-Huot, Poul H. Damgaard, and Bo Feng. *Phys. Rev. Lett.* 116, 061601

Perturbation Theory at Eight Loops: Novel Structures and the Breakdown of Manifest Conformality in $N=4$ Supersymmetric Yang-Mills Theory. Jacob L. Bourjaily, Paul Heslop, and Vuong-Viet Tran. *Phys. Rev. Lett.* 116, 191602.

Amplitudes and correlators to ten loops using simple, graphical bootstraps. Bourjaily, J.L., Heslop, P. & Tran, V.V. *J. High Energ. Phys.* (2016) 2016: 125. [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2016\)125](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2016)125)

Prescriptive unitarity. Bourjaily, J.L., Herrmann, E. & Trnka, J. *J. High Energ. Phys.* (2017) 2017: 59. [https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2017\)059](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2017)059)

Fra felter til kvantefelter

Når man i fysikken taler om et "felt", betegner det et område i rummet, hvor hver partikel er påvirket af en kraft. Det kan eksempelvis være tyngdefelter eller elektromagnetiske felter, som påvirker partiklerne. I feltteorier påvirker fysiske fænomener hinanden gennem kun den umiddelbare nabovirkning mellem felterne, og denne virkning kan herefter forplante sig videre til andre felter. Feltteorien står således i modsætning til eksempelvis Newtons forestilling om en tyngdekraft, der virker øjeblikkelig over store afstande og ikke gennem felternes nabovirkninger. I Einsteins relativitetsteori er denne forestilling om en langtrækkende tyngdekraft dog erstattet af en formulering baseret på tyngdefelter.

Kvantefeltteori er en udvidelse af kvantemekanikken fra punktformede partikler til felter. Det er nødvendigt med en sådan teori, fordi den almindelige kvantemekanik ikke kan forklare dannelsen eller ødelæggelsen af elementarpartikler, sådan som det kan observeres. Kvantemekanikken er desuden ikke kompatibel med Einsteins specielle relativitetsteori. Kvantefeltteori er på den måde et nødvendigt matematisk værktøj for at kunne beskrive stoffer og deres vekselvirkninger på en måde, der både er i overensstemmelse med

kvantemekanikken og den specielle relativitetsteori. Forskere har derudover den antagelse, at kvantemekanik er underliggende for alle fysiske fænomener, og derfor bør klassisk feltteori også have en pendant i kvantemekanikken – kvantefeltteorien. Eksempler på kvantefelter, der har fået et kvantemekanisk twist, er elektrodynamik – kvanteelektrodynamik, kromodynamik – kvantekromodynamik eller den elektrosvage teori – kvanteelektrosvage teori.

Den simpleste og mest praktiske af kvantefeltteoriene er kvanteelektromagnetisme. I den eksisterer der to felter: Det elektromagnetiske felt og elektronfeltet. Disse to felter interagerer hele tiden med hinanden, hvorved energi bliver overført mellem dem, og exiteringer bliver skabt og ødelagt. Lad os som eksempel forestille os en elektron, der drejer rundt om en foton. Inden for kvanteelektromagnetisme er denne forestilling af to partikler erstattet af specifikke vekselvirkninger mellem det elektromagnetiske felt og elektronfeltet. Heri mister det elektromagnetiske felt én exiteret kvant, og elektronfeltet får dens energi. Kvantefelter interagerer altså ikke med stof. De er stof, og det, som vi ser som partikler, er i virkeligheden exiteringer af kvanter i sig selv.

at studere, hvilke former forudsigelserne har.«

Han nævner igen eksemplet med tallet 1, som det tager studerende en uge at nå frem til. Denne beregning er faktisk kun den første korrektion ud af en uendelig række kvantemekaniske korrektioner til klassisk fysik, hvilket vil sige, at tallet faktisk ikke er 1, men virkelig tæt på at være 1. Beregningerne betyder mindre og mindre for hver korrektion, men i takt med at eksperimentalfysikerne bliver bedre og bedre til at lave præcise målinger, bliver mere præcise forudsigelser også nødvendige.

»For at sætte den beregningsmæssige opgave af "1" i perspektiv, så tog det 10 år at regne sig frem til den anden korrektion, og den næste igen tog 30 år,« siger Jacob Bourjaily.

Man kalder disse korrektioner for "loop orders", og i projektet, der er støttet af Danmarks Frie Forskningsfond, er det blandt andet lykkedes Jacob Bourjaily og kolleger

at sætte en markant beregningsrekord for antallet af korrektioner for nogen teori i fire dimensioner (det vil sige teorier med 3 rumlige dimensioner og en tidslig).

»Det var en slags legetøjsmodel af et eksperiment, men det lykkedes os at komme helt op på at beregne 10 loop-orders. Jeg mener ikke at have set nogen beregninger komme over 3 for den klasse af teorier. Hvis vi blot havde slået op i lærebogen og gået frem efter den, ville der have været lige så mange led i ligningen, som der var atomer i den computer, vi forsøgte at regne det ud på,« fortæller Jacob Bourjaily.

Vil være med til at skrive fremtidens tekstbøger

Ifølge Jacob Bourjaily er der en masse smuk matematik associeret med formen af disse forudsigelser, som har ledt til samarbejde med matematikere inden for både grafteori, kombinatorik og algebraisk geometri.

»Vi presser alle vores mest sofistikerede og kraftfulde redskaber for

at lave nye forudsigelser, som vi ikke havde adgang til før, og ved at gøre det, styrker vi vores redskaber, fordi vi bliver bedre til at lave forudsigelser. Men vi opdager også nye egenskaber ved forudsigelserne selv, som tillader os at kortslutte det hele og gætte endnu længere. At beregne noget, ingen har gjort før, er på mange måder det samme som teoretiske data, som folk kan stirre på og lære af,« siger han.

Forskeren drømmer om, at hans arbejde vil være med til at skrive fremtidens tekstbøger inden for kvantefeltteori. De fysiske love bliver raffineret langsomt. Vi underviser stadig i Newtons love, selvom de er fyldt med huller. Det samme gælder kvantefeltteori, der heller ikke er perfekt endnu.

»Det er sjældent, at et forskningsfelt med så fundamental betydning er så overflødig. Min generation af fysikere vil lave de opdagelser, som vil være med til at skrive det næste århundredes tekstbøger,« siger Jacob Bourjaily. ■



DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK