NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL *natur* VIDENSKAB

JAGTEN PÅ HUNDENS OPRINDELSE

Nye målinger afgør sagen. Antistof falder ikke opad

Udforskningen af de største havdybder

På vej mod faststofbatterier

NR.5 - 2023 NOVEMBER 50 KR.

NOTER

EM-guld til Unge Forskere

For andet år i træk har Unge Forskere vundet guld ved EM i science – EU Contest for Young Scientists (EUCYS), som blev afholdt i september i Bruxelles. Ved EUCYS deltog tre danske vindere fra Unge Forskere-konkurrencen Martin Stengaard Sørensen, Nanna Kalmar (th på billedet) og Alexandra Cotigo. Både Martin og Nanna kunne hjemføre en guldmedalje, og hertil blev Martin hædret med en særpris fra European Space Agency for sit projekt om rumraketter, mens Nanna modtog en særpris fra Expo-Sciences Luxembourg for sit projekt om vertikalt landbrug.

Kilde: ungeforskere.dk

Vaccine-gennembrud giver nobelpris

Nobelprisen i fysiologi eller medicin går i 2023 til de to forskere Katalin Karikó og Drew Weissman, hvis arbejde har været afgørende for, at det under corona-pandemien var muligt at udvikle en vaccine baseret på mRNA-teknologi. Da de to forskere udførte deres arbejde, var den store udfordring ved at bruge mRNA til vacciner eller lægemidler, at det fremprovokerede kraftige immunreaktioner, når mRNA kom ind i kroppens celler. De to forskere udviklede kemisk modificerede udgaver af mRNA, der ikke gav sådanne immunreaktioner og som samtidig øgede produktionen af protein. Dermed banede de vejen for corona-vacciner baseret på mRNA-teknologi.

Foto: Colourbox

Kilde: Nobel.se

Hjælp til gymnasieelever

Videnskab.dk har netop lanceret en guide til gymnasieelever, der skal i gang med deres SRP eller anden stor opgave. Guiden indeholder en masse værktøjer, der kan gøre gymnasietidens store opgaver og projekter nemmere at gå til – blandt andet en god introduktion til kildekritik, formidling og videnskabsteori. Gymnasieguiden er resultatet af et samarbejde mellem Videnskab.dk og Aarhus Universitet som en del af projektet "Giv De Unge Ordet" og er støttet af Novo Nordisk Fonden.

Kilde: Videnskab.dk

Quizzen

Hvor gammel er det ældste kendte gravfund, der dokumenterer, at mennesket har levet sammen med hunde?

1. Godt 20.000 år,
2. Godt 14.000 år
3. Godt 7.000 år

Læs svaret i artiklen *Jagten på hundens oprindelse* i dette nr.

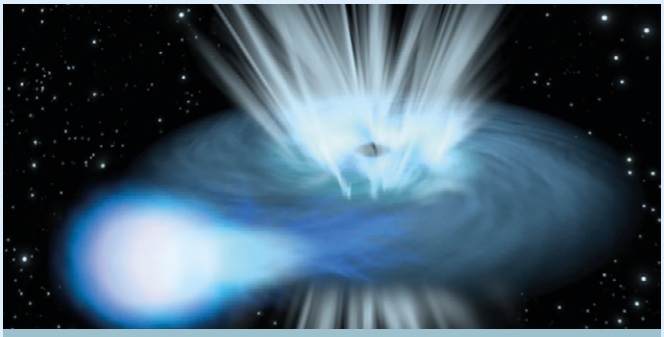


Illustration: ESA / C. Carreau

Forskere opdager ny type kosmisk eksplosion

En gruppe astrofysikeres begejstring for fodboldklubben Liverpool FC er en del af grunden til, at de har navngivet et nyt kosmisk fænomen Luminous Fast Coolers (forkortet LFC ligesom fodboldklubben). I deres jagt på kosmiske eksplosioner, såkaldte supernovaer, i Universet, opdagede forskerne i december 2022 tilsyneladende en spændende en af slagsen, som var den mest lysstærke, de nogensinde havde set. Men hvor "normale" lysstærke supernovaer typisk falder i lysstyrke til omkring det halve indenfor en måneds tid, forsvandt denne supernova stort set indenfor det samme tidsrum. Desuden fandt begivenheden sted i en galakse, som ikke huser stjerner, der er store nok til at kunne blive til supernovaer. Forskerne mener derfor, at den mest sandsynlige forklaring på fænomenet er, at det opstår ved en kollision mellem et sort hul og en stjerne. Illustrationen giver en kunstnerisk gengivelse af netop sådan en begivenhed.

Kilde: M. Nicholl et al 2023 ApJL 954 L28

Foto: .grida.no/resources/3536/CC BY-NC-SA 2.0

Genetiske konsekvenser af hvalfangst

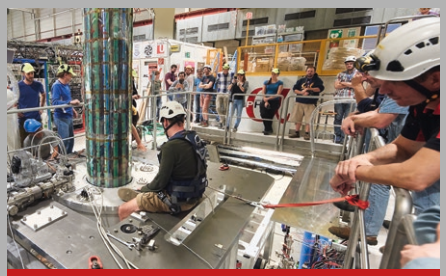
Nedslagtningen af et stort antal hvaler i det sydlige Atlanterhav i perioden fra cirka 1900-1960 har tilsyneladende sat sig sine spor i hvalernes genetiske diversitet i dag. Forskere fra Oregon State University har undersøgt mitokondrielt DNA (som kun nedarves fra moderen) fra nulevende hvaler og fra hvalknogler fra strande nær en forladt hvalstation på den lille ø South Georgia. Forskerne har fundet, at flere genetiske linjer af både blåhvaler og pukkelhvaler formentlig er gået tabt, og det kan være baggrunden for, at der ikke er mange af disse hvaler, der besøger området omkring South Georgia i dag, fordi den "kulturelle hukommelse" er gået tabt.

Kilde: Journal of Heredity, esad048

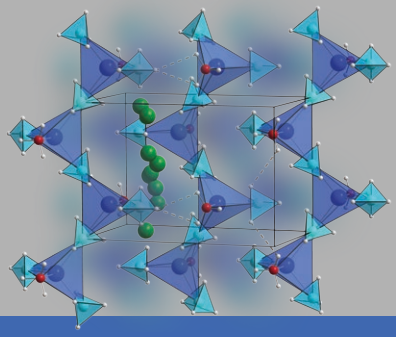
indhold

Udforskningen af de største havdybder
Teknologiske landvinger har gjort det stadig lettere for forskerne at skaffe sig viden om de dybeste dele af oceanerne under 6 kilometers dybde kaldet den hadale zone. Det står nu klart, at dybhavsprocesser har stor betydning for livet på Jorden. 8

Jagten på hundens oprindelse
De enorme mængder af data, som forskere i dag har til rådighed, gør det muligt at komme med et kvalificeret bud på, hvornår mennesker domesticerede ulven og gjorde den til vores bedste ven – hunden. 20



Antistof falder ikke opad
Fysikerne forsøger at besvare det grundlæggende spørgsmål, om antistof opfører sig på samme måde som almindeligt stof. Det seneste forsøg viser, at atomer af antihydrogen og atomer af almindeligt hydrogen opfører sig ens i et tyngdefelt. 14



På vej mod faststofbatterier
I fremtidens grønne energisystem bliver der brug for nye typer af batterier, der kan imødegå begrænsningerne i det traditionelle litium-ion-batteri. Et lovende bud er faststofbatterier. 27

FORSKNING OG NYHEDER

4 KORT NYT

8 Udforskningen af de største havdybder

14 Nye målinger afgør sagen: Antistof falder ikke opad

20 Jagten på hundens oprindelse

27 På vej mod faststofbatterier

32 Pladsmangel og pesticider udrydder alverdens insekter

38 Insektovervågning for alle

44 BAGSIDEN: Fysik på den helt korte tidsskala

AKTUEL NATURVIDENSKAB

Udgiver
Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og Faculty of Technical Sciences, i samarbejde med:

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Roskilde Universitet

Ansvarshavende
David Lundbek Egholm, professor, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

Redaktion
Redaktører Carsten Rabæk Kjaer og Jørgen Dahlgaard
Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk
Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

SPONSOR-ABONNENTER

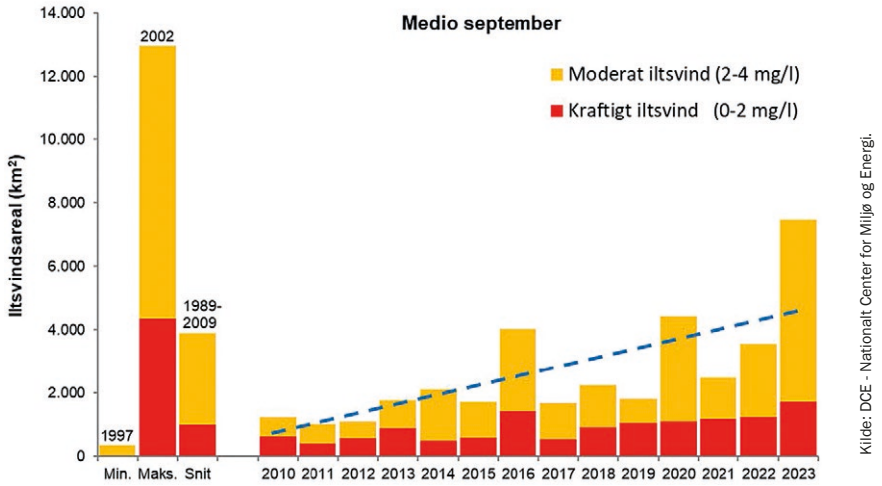
AARHUS UNIVERSITET
SDU DET NATURVIDENSKABELIGE FAKULTET
GRUNDFOS
KØBENHAVNS UNIVERSITET
RUC Roskilde Universitet
novo nordisk®

Værste iltsvind i 20 år

Til trods for de kraftige sommerstorme har de høje temperaturer i kombination med næringsstoffer i havet og septembers relativt rolige vindforhold skabt historisk dårlige iltforhold for fisk, bunddyr og planter. Det viser et notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, som rapporterer om iltsvindets udbredelse og styrke på baggrund af målinger fra Miljøstyrelsen og data fra myndighederne i Tyskland og Sverige.

Det samlede areal berørt af iltsvind i de indre danske farvande udgjorde midt i september knap 7.500 km^2 – et areal større end Sjælland. Heraf var cirka en fjerdedel påvirket af kraftigt iltsvind. Iltsvindets udbredelse i september var i 2023 på niveau med udbredelsen i 1989 og 2000 og det næststørste for september, kun overgået af iltsvindet i 2002.

I flere af de værst ramte områder, herunder især det sydlige Lillebælt, Aabenraa Fjord, Flensborg Fjord og Det Sydfynske Øhav var en stor del af farvandenes areal og vandsøjle påvirket af overvejende kraftigt iltsvind. Det samlede areal berørt af iltsvind i de indre danske farvande er steget markant siden 2010.



Kilde: DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.

Forskerne bag notatet beskriver også, hvordan der for første gang i 15 år er udbredt iltsvind i den sydlige og den centrale del af Kattegat. En forsættelse eller forværring af den nuværende iltsvindssituation vil ifølge forskerne bag notatet være meget alvorlig for livet i de indre danske farvande og tilstødende områder.

DCE udsender hvert år fire iltsvindsrapporter. Det aktuelle notat gør status for udviklingen og udbredelsen af iltsvind i de indre farvande i perioden fra 24. august til og med 21. september 2023.

Figuren viser modelleret arealudbredelse af moderat (2-4 mg/l) og kraftigt (0-2 mg/l) iltsvind midt i september i de indre danske farvande 2010-2023 samt den største og mindste udbredelse 1989-2023 og den gennemsnitlige udbredelse 1989-2009.

Den stiplede linje angiver en statisk signifikant stigning siden 2010 (p=0,003).

Michael Strangholt, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi
Hele notatet kan findes på dce.au.dk

Mere motion kan føre til mere dovneri

Måske kender du det selv. Efter en lang løbetur eller en omgang træning, synes du, at du har fortjent en ekstra lang slapper på sofaen eller at tage elevatoren i stedet for trappen. Du er ikke alene! En lang række forskellige forskningsstudier viser, at når folk øger deres motionstræning, har de en tendens til at "dovne den" mere, når det gælder de daglige fysiske aktiviteter, som ikke er decideret motion.

»Vi kan se, at folk i 67 % af studierne skærer ned på de fysiske aktiviteter i deres dagligdag som kompensation for mere motionstræning. Det kan for eksempel være at gå mindre, cykle mindre og at tage elevatoren i stedet for trappen,« siger Julie Marvel Mansfeldt, kandidatstuderende ved Institut for Idræt og Ernæring på Københavns Universitet.

Foto: Colourbox

Hun er førsteforfatter til en systematisk gennemgang af 24 forskningsstudier, som alle beskriver niveauet af folks fysiske aktiviteter i dagligdagen før og under forsøg med forskellige træningsprogrammer. Studiet er udgivet i tidsskriftet *Current Nutrition Reports*.

Og niveauet af den almindelige fysiske aktivitet ser ud til at kunne spille en væsentlig rolle for, om man har succes med at tabe sig eller ej.

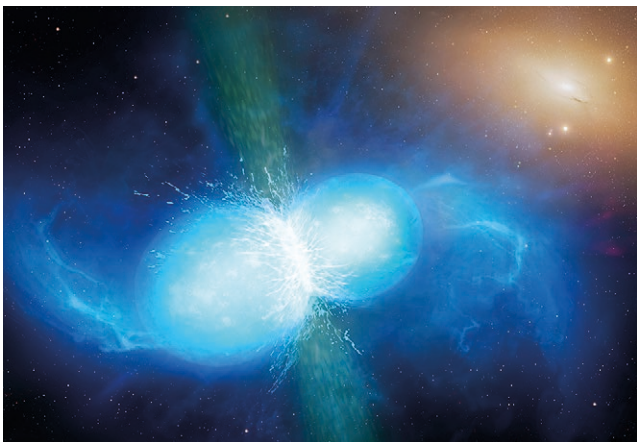
»At tabe sig handler om at ændre balancen mellem den mængde energi, man indtager, og den mængde man forbruger. Man kan enten ændre sin kost, så man spiser mindre, eller øge sin fysiske aktivitet,« siger Julie Marvel Mansfeldt. Ifølge Julie Marvel Mansfeldt er vores tendens til at bevæge os mindre resten af tiden, når vi træner mere, formentlig en blanding af fysiologiske og psykologiske mekanismer i os.

»Kompensationen kan for det første komme af, at du simpelthen føler dig mere træt efter en tur i træningscentret. Men der er sandsynligvis også en psykologisk faktor i spil, som er en form for belønningssystem, der går i gang, og som gør at vi synes, at vi har fortjent at ligge på sofaen,« forklarer Julie Marvel Mansfeldt.

Maria Hornbek, KU. Kilde: Curr Nutr Rep 12, 327–337 (2023)

Neutronstjerner sladrer om universets udvidelse

Det er et velkendt faktum, at Universet udvider sig. Den præcise hastighed, hvormed denne udvidelse sker, er beskrevet ved den såkaldte Hubble-konstant, som er en af de vigtigste størrelser i moderne kosmologi. Der findes flere forskellige metoder til at måle den; metoder som er indbyrdes uafhængige og heldigvis giver samme resultat. Eller det vil sige, næsten! Ved at måle på galakser og deres hastighed får man, at universet udvider sig med 22,7 ± 0,4 km/s per million lysår, mens man ved at analysere ujævnheder i den kosmiske baggrundsstråling får 20,7 ± 0,2 km/s. Denne forskel vil for eksempel udmønte sig i en forskel på en beregnet alder på Universet på omkring en milliard år.



Kunstnerisk fortolkning af to sammensmeltende neutronstjerner, der giver ophav til en kilonova. Illustration: University of Warwick/Mark Garlick/CC BY 4.0

Tidligere mente man, at måleusikkerheder kunne forklare forskellen på de to metoder. Men i dag er målingerne så nøjagtige, at vi med meget stor sikkerhed kan sige, at begge metoder ikke kan være rigtige. Hvad der så er årsagen til, at denne forskel opstår, er et af astronomiens varmeste emner i dag.

En af de største usikkerheder ligger i at bestemme afstandene til galakser. Men i et nyt studie foreslår ph.d.-studerende ved Cosmic Dawn Center på Københavns Universitet Albert Sneppen sammen med en række kolleger en ny metode til at måle afstande på, som kan hjælpe med at afgøre disputten.

Forskerne udnytter i den nye metode en såkaldt kilonova, der er en kosmisk eksplosion, der opstår, når to neutronstjerner – der i sig selv er efterladenskaber fra supernova-eksplosioner – smelter sammen. En kilonova er bemærkelsesværdig symmetrisk og derudover kan den trods dens kompleksitet beskrives med en enkelt temperatur. Tilsammen gør det astronomerne i stand til at beregne præcist, hvor meget lys, en kilonova udsender. Ved at sammenligne denne lysstyrke med, hvor meget lys, der når hen til Jorden, kan forskerne beregne, hvor langt væk kilonovaen er. De har dermed opnået en ny, uafhængig, og potentielt mere nøjagtig metode til at beregne afstandene til galakser, som indeholder kilonovaer.

For at demonstrere metodens potentiale anvendte astrofysikerne den på en kilonova, som blev opdaget i 2017. Resultatet blev en Hubble-konstant på 20,54 ± 1,10 km/s per million lysår – altså tættest på baggrundsstrålings-metoden. Men om kilonova-metoden kan løse Hubble-balladen, tør forskerne dog endnu ikke udtale sig skråsikkert om, da der er brug for mange flere eksempler for at opnå et robust resultat. Men fordelene ved metoden er, at den omgår nogle kendte kilder til usikkerhed og er et meget "rent" system at studere.

CRK, Kilde: nbi.ku.dk

Vandmænd er klogere, end vi troede

Gopler – eller vandmænd – kan siges at have været en evolutionær kæmpesucces, idet de er vidt udbredte i dag og har eksisteret på Jorden i over 500 millioner år. Men vi har altid betragtet gopler som simple skabninger med meget begrænsede indlæringsevner. For den herskende opfattelse er, at jo mere avanceret nervesystemet er hos et dyr, jo mere avanceret indlæring har det. Gopler og deres slægtninge, tilsammen kaldet polypdyrene, regnes for de tidligste nulevende dyr, der udviklede et nervesystem. Men der er tale om et ret simpelt nervesystem uden en central hjerne.

Nu viser det sig imidlertid, at de slet ikke er så simple, som man hidtil har troet. Og det rokker ved hele vores forståelse af, hvad simple nervesystemer er i stand til.

»Man er gået ud fra, at gopler kun formår de allermest simple former for indlæring. Men vi kan nu se, at gopler har en langt mere raffineret indlæring og faktisk er i stand til at lære af deres fejl og deraf ændre deres adfærd,« fortæller Anders Garm, lektor på Biologisk Institut.

En af de mest avancerede ting, vi kender fra nervesystemet, er evnen til at ændre sin adfærd som følge af erfaring – at huske og lære. Så den evne satte forskerholdet med Jan Bielecki fra Kiel Universitet og Anders Garm i spidsen sig for at teste i en klasse af gopler kaldet havhvepse. Resultaterne er netop udgivet i tidsskriftet *Current Biology*.

Den type havhveps, *Tripedalia cystophora*, som forskerne har undersøgt, og som kun er på størrelse med en fingernegl, lever i mangrovesumpene i Caribien, hvor de bruger deres synssystem med 24 øjne til at jage vandlopper inde mellem mangroverødderne. Men det er et farligt sted for en gople, fordi rødderne kan ødelægge deres bløde gele-krop.

»Vi kan se, at hver dag, når havhvepsene begynder at jage, lærer de den aktuelle kontrast ved at kombinere synsindtryk og føleindtryk under undvigemanøvrer, der slår fejl. Så på trods af kun 1000 nerveceller – vores hjerne har cirka 100 milliarder – kan de forbinde tidsmæssige sammenfald af forskellige indtryk og lære en sammenhæng – det, man kalder associativ indlæring. Og de lærer det faktisk nogenlunde lige så hurtigt som avancerede dyr som bananfluer og mus.«

Maria Hornbek, KU. Videnskabelig artikel: doi.org/10.1016/j.cub.2023.08.056

Nyt lys på epigenetikkens molekylærbiologi

I disse år er mange forskere optaget af epigenetikken; altså at faktorer udefra i kortere eller længere tid kan ændre på, hvordan en celles ellers uforanderlige gener kan variere i udtryk. En af disse forskere er Jasmin Mecinovic, der er professor på Institut for Kemi, Fysik og Farmaci ved SDU. Han har for nylig modtaget godt 13 millioner kroner fra Novo Nordisk Fonden til at forske i, hvad der foregår på det molekylære niveau, når der indtræffer en bestemt epigentisk påvirkning af et gen.

Epigenetiske påvirkninger – om de er tilsigtede fra naturen eller udløst af miljøpåvirkninger – igangsætter kemiske ændringer af nogle strukturer, der har tæt tilknytning til selve DNA'et inde i hver eneste cellekerne. Disse strukturer kaldes histoner, og de udgør først og fremmest et skelet, som de to meter lange DNA-strenge kan vikles op om. Men de har også billedligt talt en hale, der stikker uden for DNA'et. Den kan enzymer hæfte, fjerne eller genkende små kemiske "tags" på, og når det sker, sendes der besked gennem histonet om, at der skal tændes eller slukkes for nogle af DNA'et mange gener.

Hvor og hvordan, enzymer sætter disse tags på histonerne, og hvordan sådanne ændringer kontrollerer de genetiske udtryk er et kæmpe puslespil, som forskerne kun i de seneste cirka 30 år har haft mulighed for at udforske. Ændringerne er nemlig så små, at det har krævet ekstremt avancerede kemiske værktøjer at kigge ind i histonernes verden.

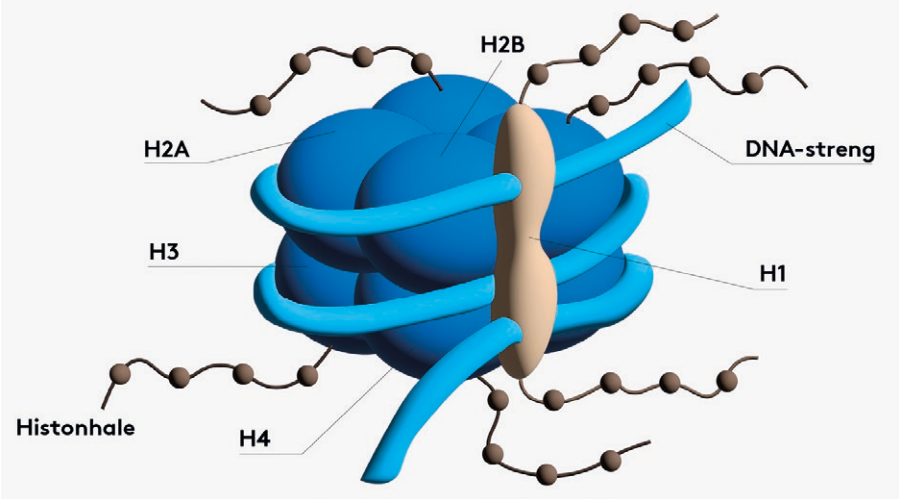


Illustration: Nina Bjørnskov/SDU

Illustrationen viser, hvordan de forskellige histoner er arrangeret i forhold til DNA-strengen.

Af samme årsag har man indtil nu beskæftiget sig mest med de fire kernehistoner, som DNA-strengene vikler sig om. Men der findes et femte histon, kaldet linker H1, som er så uregerligt, at det indtil for ganske nyligt har været umuligt at studere med eksisterende teknikker. Jasmin Mecinovic beskriver det, som om dette histon har "spaghettiarme, der hele tiden flagrer rundt". En af opgaverne for Jasmin Mecinovic's forskningsgruppe bliver derfor at udvikle nogle kemiske metoder, som overhovedet gør det muligt at se, hvad der foregår i de epigenetiske kringelkroge af det uregerlige H1-histon. Ligesom de øvrige histoner har H1 også en hale, der sidder udenfor DNA'et. Også den kan blive modificeret af enzymer, så der via H1 kan opstå ændringer på generne inde i cellekernen.

»En anden vigtig opgave bliver at forsøge at bygge H1-histoner, som vi kan modificere specifikt til at ligne naturlige H1-histoner for så at se, hvilken effekt, det kan få på interaktionen med histoner, epigenetiske proteiner og DNA,« siger Jasmin Mecinovic.

At studere, hvordan H1-histoner interagerer med andre biomolekyler på molekylært niveau, er kemisk grundforskning. Men det er også sygdoms- og medicinal-relateret forskning, fordi histonerne kan forårsage uhensigtsmæssige aktiveringer eller slukninger af gener og dermed føre til sygdomme som visse kræftsygdomme og autoimmune sygdomme.

Birgitte Svennevig, journalist, Det Naturvidenskabelige Fakultet og SDU Climate Cluster

Nobelpris til kvanteprikker

Hvis du skulle være den lykkelige ejer af et tv med såkaldt QLED-teknologi (der står for Quantum dot Light-Emitting Diode), kan du betragte et meget konkret resultat af den forskning, der i år er blevet belønnet med Nobelprisen i Kemi. Den går nemlig til tre forskere, der har pioneret forskningen indenfor det fænomen, der kaldes kvanteprikker (eller kvantepunkter).

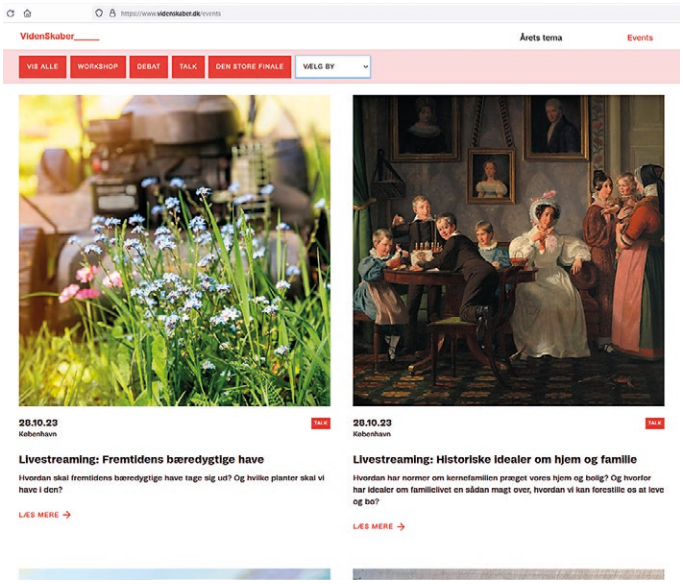
Kvanteprikker er i korthed krystaller med en størrelse på få nanometer, som har unikke optiske og elektroniske egenskaber som fx evnen til at transporter elektroner og udsende lys ved forskellige farver, når det udsættes for UV-lys. Med kvanteprikker udnytter man i praksis, at der på nanoskalaen opstår kvantefænomener, der er betinget af størrelsen af komponenterne. Alexei Ekimov demonstrerede i 1981 som den første denne størrelsesafhængige kvanteeffekt i praksis ved at vise, hvordan nanopartikler af kobberklorid via kvanteeffekter gav glas forskellig farve afhængig af størrelsen på partiklerne. I 1983 demonstrerede Louis Brus størrelsesafhængige kvanteeffekter i partikler, der var frit flydende i en væske.

Endelig revolutionerede Moungi Bawendi i 1993 den kemiske produktion af kvanteprikker, så det blev muligt at producere næsten perfekte partikler. Dette var en forudsætning for, at kvanteprikker kan udnyttes til praktiske formål, og det har banet vejen for, at kvanteprikker i dag udnyttes i både forbrugerelektronik (QLED-teknologi) og til alskens forskning indenfor både fysik, kemi og biologi.

CRK, Kilde: Nobel.se

Forskere og borgere skal i dialog i VidenSkaber

Videnskabernes Selskab har for nylig lanceret et nyt initiativ – *VidenSkaber* – som skal være et mødested, hvor borgere og forskere kan diskutere hverdagens store problemstillinger. Projektet løber de næste tre år, hvert år med sit eget tema, som der vil blive sat fokus på i en række aktiviteter som workshops, debatter og formidling. Med initiativet ønsker VidenSkaber at udbrede kendskabet til, hvordan videnskaben arbejder og konsekvent stille spørgsmålet "hvordan ved vi det?", så vi alle bliver bedre til at skelne mellem, hvad der er videnskabeligt underbygget viden, og hvad der ikke er.



Temaet i 2023 har titlen *Hvordan skal vi bo i fremtiden?* og går ud på at undersøge, hvad der er et godt hjem for dig, mig, din nabo og planeten. Altså hvordan vi skaber hjem, som er bæredygtige, samtidig med at de værner om vores mentale og fysiske helbred og kan styrke både de små og store fællesskaber.

Årets partnere er blandt andet Folkeuniversitetet, flere boligforeninger, en række lokale museer, Nationalmuseet i København, Ræson og Videnskab.dk. De sørger for, at årets aktiviteter kommer til Aalborg, Odense, Høje-Taastrup, Holstebro, Varde, København, Aarhus og Herning.

Efterårets aktiviteter omfatter fem workshops, fire debatter, livestream fra visionernes og demokratiets festival, arrangeret af Ræson den 28. oktober samt journalistiske artikler på Videnskab.dk, der foholder sig til årets tema. Den store finale foregår på Nationalmuseet i København den 22. januar 2024. Her vil der blive samlet op på indsigterne fra årets mange aktiviteter og deltagernes bud på, hvordan vi skal bo i fremtiden ved et festligt arrangement.

VidenSkaber er støttet af Carlsbergfondet, Novo Nordisk Fonden og Lundbeckfonden. Læs mere om VidenSkaber og om efterårets program på videnskaber.dk

CRK, Kilde: Pressemeddelelse fra Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab.

Tag på Science Camp

på Syddansk Universitet i Odense

sdu.dk @sduscience

En camp består af to dage, hvor du møder undervisere og studerende. Gennem oplæg, øvelser og forsøg kommer du tættere på dit studievalg og får indblik i, hvad det vil sige at være studerende på Syddansk Universitet.

Fysik Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/fysikcamp

Kemi Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/kemicamp

Matematik Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/matematikcamp

Datalogi Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/datalogicamp

Kunstig intelligens Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/kunstigintelligenscamp

Biotek Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/biotekcamp

Biologi Camp
3. - 4. februar 2024 | sdu.dk/biologicamp

IT Camp for piger
2. - 3. marts 2024 | sdu.dk/itcampforpiger

Alle camps er særligt tilrettelagt for 2. og 3. gymnasieår og dig, der holder sabbatår.
Se program og tilmeld dig under den enkelte camp. Det er gratis at deltage,
og vi sørger for overnatning og forplejning - og selvfølgelig hygge og sjov!

SDU

UDFORSKNINGEN AF DE STØRSTE HAVDYBDER

Om forfatteren

Ronnie N. Glud er professor i Marin Biogeokemi ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet og ved Tokyo Universitet for Marin forskning og Teknologi. Han er leder af grundforskningscenteret *Dansk Center for Hadal forskning* (HADAL). Hans forskning er centreret omkring omsætningen af organisk materiale, og hvorledes mikrobielle processer vekselvirker med biologiske, kemiske og fysiske forhold – på mikrobiel og global skala.
rnglud @biology.sdu.dk

Teknologiske landvinger har gjort det stadig lettere for forskerne at skaffe sig viden om de dybeste dele af oceanerne under 6 kilometers dybde kaldet den hadale zone. Selvom store dele af dybhavet stadig er uudforskere, står det nu klart, at dybhavsprocesser har stor betydning for livet på Jorden.

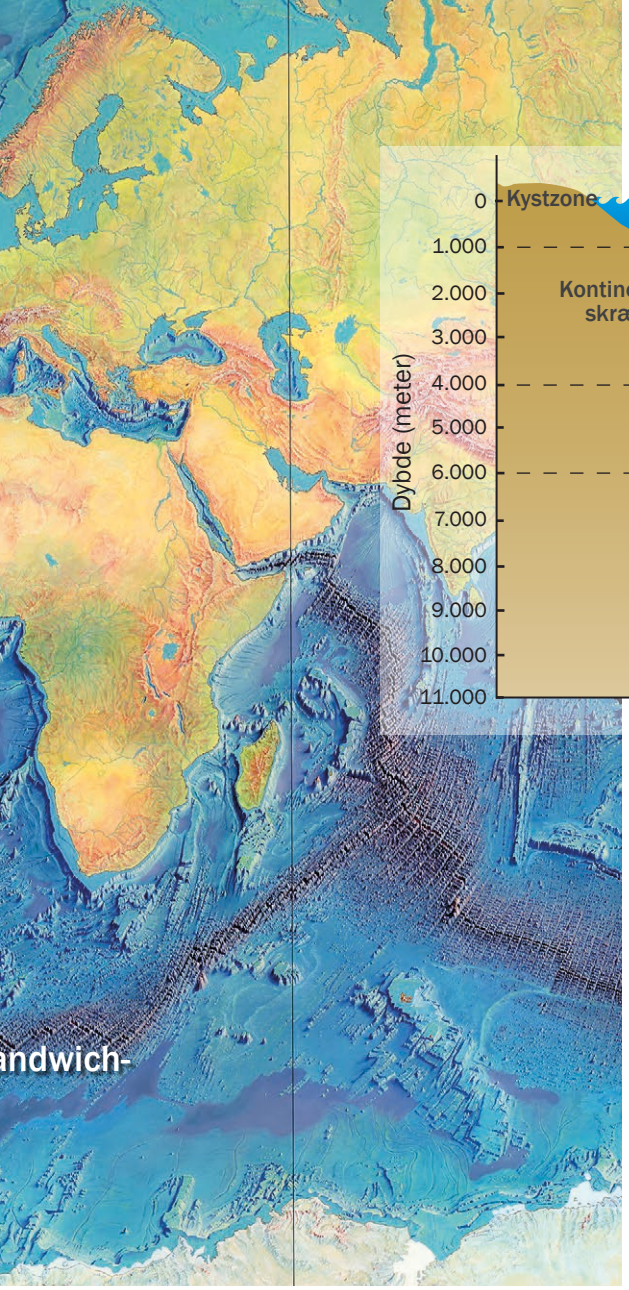
Jorden er en blå planet – mere end 70% af klodens areal er dækket af hav med en gennemsnitsdybde på 3,8 kilometer. Dybhavet er således en af Jordens største habitater og har afgørende betydning for livsbetingelserne på vores planet. Dybe havstrømme regulerer temperaturfordelingen og klimaforholdene på Jorden, og biogeokemiske processer i dybhavet regulerer eksempelvis koncentrationerne af ilt og kuldioxid i atmosfæren. Dybhavet huser også utallige ukendte livsformer.

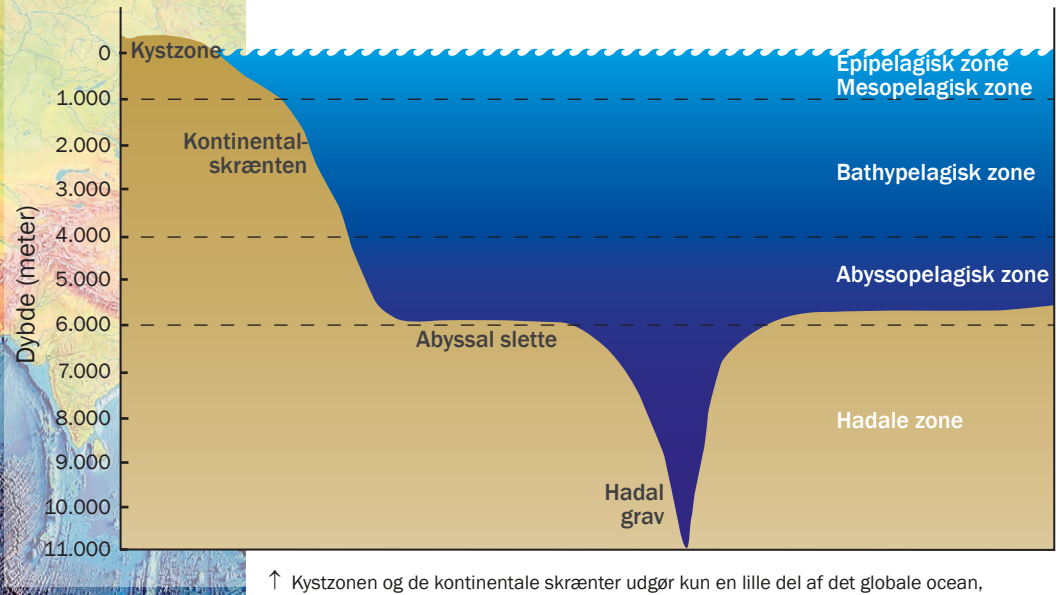
Næsten hver eneste dybhavsekspedition gør nye spændende erkendelser og finder hidtil ukendte arter og biologiske samfund.

For at forstå Jordens udvikling, klimadynamik og biodiversitet er det derfor helt centralt at få en detaljeret indsigt i livet og elementkredsløbene i dybhavet. Det meste af dybhavet er imidlertid stadig uudforsket – det gælder især de allerdybeste havområder; den hadale zone, der dækker 1-2% af verdenshavet og strækker sig fra 6 kilometers dybde ned til det dybeste sted på kloden; Challenger Deep i Marianergraven, der når ned på 11 km dybde.

De hadale grave, en uforstået del af verdenshavet

Der dannes til stadighed ny havbund langs enorme undersøiske bjergkæder. Her vælder magma ud fra Jordens indre og størkner i det kolde bundvand, og ved kontinentaldrift glider den nydannede havbund gennem oceanerne med en hastighed på op mod 5-10 centi-





↑ Kystzonen og de kontinentale skrænter udgør kun en lille del af det globale ocean, der domineres af store abyssale dybhavssletter på 4-6 km dybde. De dækker cirka halvdelen af Jordens areal. De hadale grave dækker kun 1-2 % af havbundes areal, men repræsenterer 45 % af oceanernes vertikale udstrækning; fra 6 til 11 km dybde.

← Der findes i alt 27 hadale grave, hvor den 11 km dybde Marianergrav nok er den mest kendte. Men mange andre hadale grave er mindst lige så fascinerende og inkluderer dem, der er vist på kortet. Baggrundskort: Berann, Heinrich C., Heezen, Bruce C., Tharp, Marie/public domain.

meter per år. Under rejsen dækkes de langsomt af sedimentaflejringer, der udgør et arkiv over forholdene i de overliggende vandmasser. Oceanpladerne støder mod kontinentalpladerne, der bærer klodens kontinenter, og her tvinges de atter ned i jordens indre ved en proces, der kaldes subduktion. Det er her, de hadale dybhavsgrave dannes. Der findes 27 hadale grave, de er i gennemsnit kun 70 kilometer brede, men strækker sig altså tusindvis af kilometer langs subduktionszonerne.

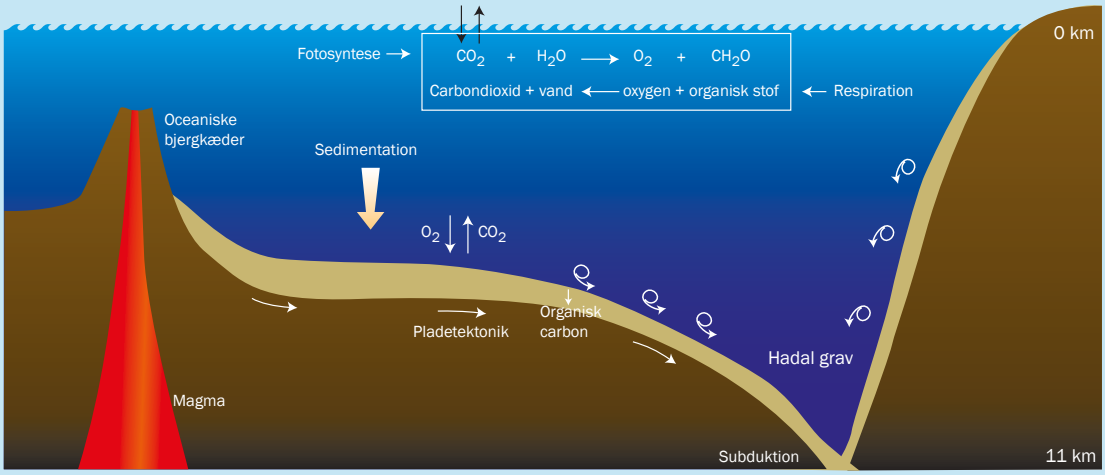
Det har længe været forbundet med store udfordringer at udforske de største havdybder. Men nye tekniske landvindinger har nu gjort det enklere et tage prøver og muligt at udføre eksperimenter og dykke ned til selv de dybeste dele af verdenshavet. Desuden har erkendelsen af betydningen af dybhavsprocesser for livet på Jorden, jagten på forekomster af sjældne mineraler til den grønne omstilling og geopolitiske forhold i de senere år forøget interessen for udforskningen af dybhavet.

Generelt falder den biologiske aktivitet med havdybden, og oprindeligt troede man ikke, der fandtes liv i dybhavet. Dybhavet er koldt, mørkt, næringsfattigt og påvirket af et enormt hydrostatisk tryk – umiddelbart ikke et indbydende sted for liv. Som navnet antyder, gjaldt denne antagelse især for den hadale zone. Hadal er afledt af ordet Hades, der betegner dødsriget i den græske mytologi. Den nyeste forskning viser imidlertid, at de hadale grave ikke er øde og golde, men faktisk repræsenterer biologiske "hotspots" i dybhavet. Gravene har en overraskende høj biologisk aktivitet og en stor biodiversitet, og de spiller dermed en stor rolle for eksempelvis carbon- og nitrogenkredsløbet i havet.

Materialedeponering på ekstrem dybde

Vi ved nu, at de hadale grave er depocentre for organisk materiale. Gravenes V-form betyder, at materiale fokuseres i bunden af gravene, og det har vist sig, at det gradvist stigende tryk hæmmer nedbrydningen af det synkende organiske materiale. Organisk materiale er derfor overraskende næringsrigt, når det lander på store dybder, hvor tryktolerante organismer florerer.

De hadale grave dannes i områder med høj seismisk aktivitet, og



De hadale grave

Ny havbund dannes, når magma vælder ud i bundvandet langs oceaniske bjergkæder. De pladetektoniske processer skubber og trækker den nydannede havbund gennem oceanet, mens der akkumuleres materiale (sedimenter) ovenpå, der stammer fra de øvre vandmasser. I overfladen producerer mikroalger oxygen og organisk materiale, der understøtter livet i de frie vandmasser. Men en del af det organiske materiale synker ud som små aggregater, fækalier og ådsler, og dette udgør føden for liv i dybhavet. En del af det organiske materiale, der når havbunden, omsættes, mens den resterende del begraves. Ultimativt er det effektiviteten, hvormed det sedimenterede organiske materiale omsættes under et oxygenforbrug eller begraves, der regulerer mængden af oxygen og redoxforholdene i oceanerne, atmosfæren og på Jorden. De hadale grave dannes, hvor oceanpladerne støder mod kontinentalpladerne og skydes nedenunder disse. På grund af de hadale graves V-form samt hyppige jordskælv i disse områder føres store mængder af organisk materiale ned i de centrale dele af graven – både fra oceansiden og fra kontinentalskrænten, hvor sedimentet er beriget med materiale fra den produktive kystzone og fra land. De hadale grave er derfor karakteriseret af en høj deponeringsrate af organisk materiale, der både understøtter en høj biologisk produktion og en høj begravelsesrate af organisk carbon.

hyppige jordskælv skaber mudderskred, der transporterer enorme mængder af organisk materiale ned i de dybeste dele af gravene. Således estimeres det, at mere end 1 million tons organisk carbon blev transporteret til de dybeste dele af Japanergraven ved det store Tohoku-Oki Jordskælv i 2011. Lavinerne af mudder udgør en katastrofe for faunaen på gravenes sider, og de døde dyr beriger sedimentet i bunden af gravene med frisk organisk materiale. Efterfølgende tsunamier kan også bidrage til en intens deponering af frisk organisk materiale i gravene. Fire måneder efter Tohoku-Oki jordskælvet var overfladesedimentet på 9,3 kilometers dybde i Japanergraven således beriget med den kortlivede radioaktive isotop ^{134}Cæsium, der kun kunne stamme fra den nedsmeltede reaktor på atomkraftværket i Fukushima. Det viser, at materiale hurtigt kan transporteres ned i de dybeste dele af verdenshavet, og at miljøet i de hadale grave er tæt forbundet med forholdene på land og i kystzonen. Sedimentakkumuleringen i de hadale grave er i samme størrelsesorden som rater observeret i kystnære områder, og er langt højere end for dybhavet generelt. Foreløbige beregninger viser, at akkumuleringen af organisk carbon per kvadratmeter er 70 gange større i de hadale grave end på de enorme omgivende dybhavssletter. Så på trods af, at de hadale grave kun dækker 1-2 % af havbunden, kan gravene være uforholdsmæssigt vigtige for havets evne til at lagre organisk materiale og modvirke klimaforandringer forårsaget af afbrænding af fossile brændsler.

Mikroorganismer i dybet

Men tilførslen af relativt næringsholdigt, organisk materiale stimulerer altså også den biologiske aktivitet i de dybe grave. Målinger med undersøiske robotter har vist, at iltforbruget i de hadale sedimenter er langt højere end på de omgivende dybhavssletter. Det afspejler en stærkt forøget mikrobiel aktivitet i de dybe grave. Tilsvarende er antallet af bakterier, rundorme og andre små organismer langt større på hadal dybde end i dybhavet generelt. Sammenligner vi forholdene i de forskellige hadale grave, er der en tæt kobling mellem antallet af mikroorganismer samt omsætningsraten af organisk materiale til produktiviteten i overfladeoceanet over de enkelte grave. Det betyder, at regionale variationer i den biologiske produktion i havoverfladen afspejler sig i livsbetingelserne helt ned på 8-11 kilometers dybde – og at klima-inducerede forandringer i overfladeproduktionen vil påvirke de biologiske samfund – selv på de allerstørste havdybder.

Udstyr til de største dybder

De store dybder og det ekstreme tryk gør det vanskeligt at udforske dybhavet og den hadale verden. Prøver indsamlet i dybet vil ofte være påvirket af tryk og temperaturforandringer, og målinger ombord på et skib vil ikke nødvendigvis afspejle de faktiske procesrater i dybet. Derfor har forskere udviklet en række autonome instrumenter – såkaldte *landere* – der kan frigøres fra et skib og gennemfører målinger og eksperimenter direkte i dybet. Et typisk eksempel på et landerinstrument ses her. Dette specifikke instrument er udviklet til at føre små sensorer ned i havbunden, der kan kortlægge iltfordelingen i sedimentet. Data kan blandt andet buges til at kvantificere havbundens oxygenforbrug.

Grafen viser et eksempel på, hvorledes oxygen trænger længere ned i havbunden på den abyssale slette end i den dybe hadale grav – hvilket afspejler en større biologisk aktivitet på den største havdybde.

En lander er typisk 3-4 meter høj og vejer op mod et ton ved udsætningen. Den synker ned i dybet på grund af ballast, der slippes, når missionen er fuldført. Trykstabilt opdriftsmateriale i landeren sørger derefter for, at instrumentet stiger op mod overfladen. Her udsender instrumentet et signal, der opfanges på moderskibet, og landeren tages ombord med sin last af data og prøver.

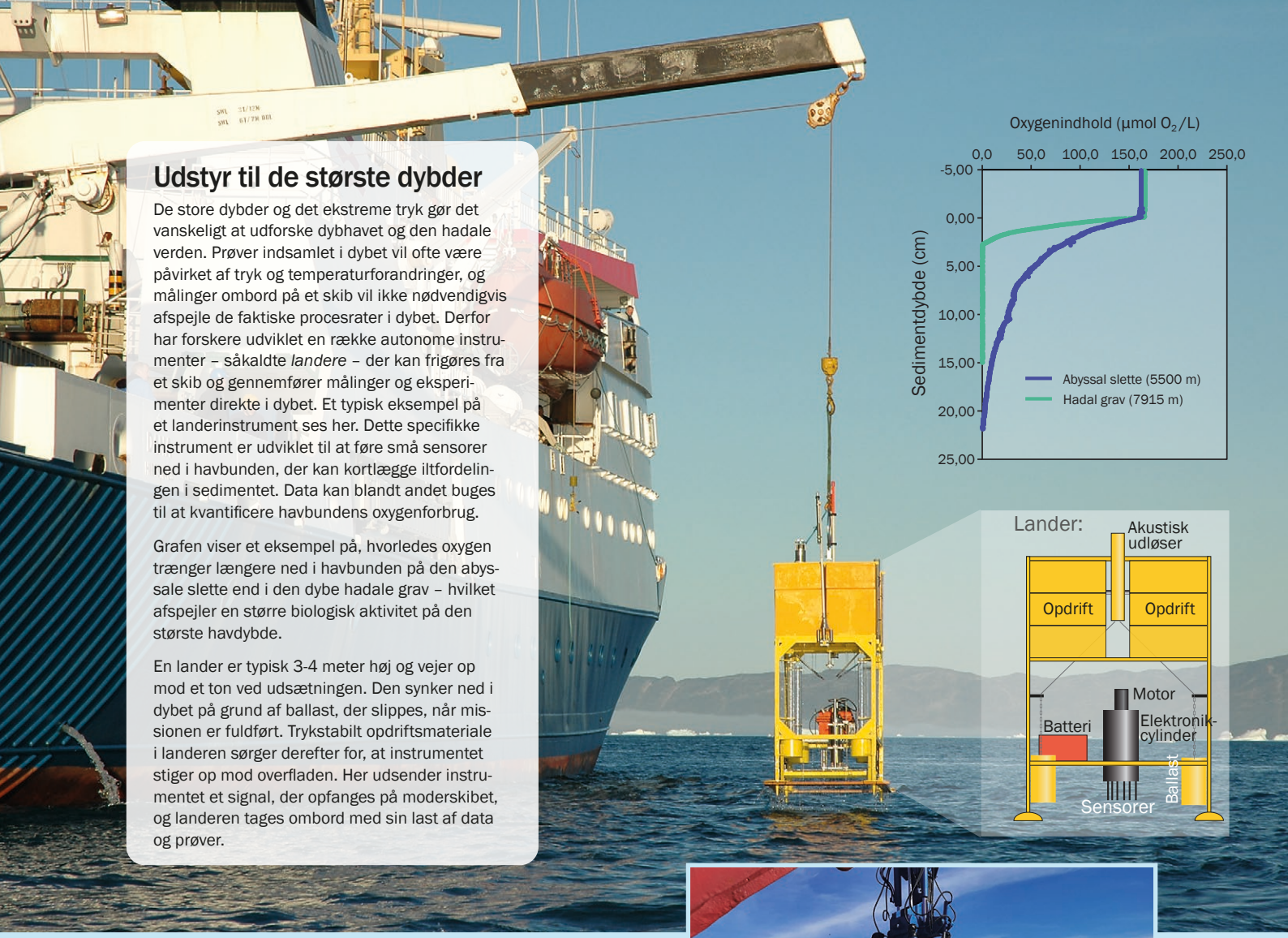


Foto: Søren Rysgaard

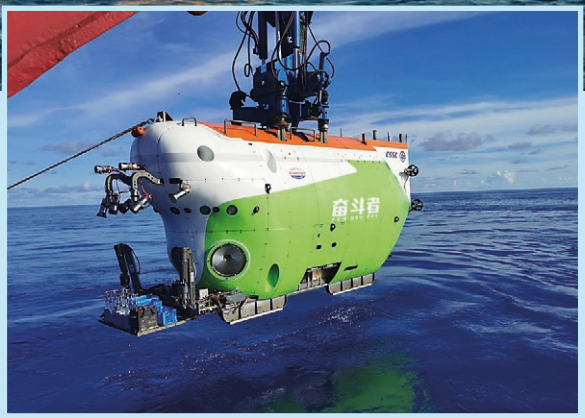


Foto: Global Times

Mere sofistikerede instrumenter som ROV's (Remote Operating Vehicle), der er forbundet med et kabel til moderskibet, samt bemandede ubåde giver andre umuligheder for udforskningen af livet i dybet. Men de er også betydeligt vanskeligere og omkostningsfyldte at udvikle og operere. Der findes pt ingen ROV's og kun to ubåde, der kan operere i de dybeste dele af verdenshavet. På billedet ses en af disse – den kinesiske ubåd *Fendouzhe*.

Den generelt høje biologiske aktivitet i hadale sedimenter gør, at ilten kun trænger få centimeter ned i havbunden, og at størstedelen af det hadale mikrobielle samfund lever i en iltfri verden. Det står i skarp kontrast til forholdene på de store dybhavssletter, hvor ilten trænger langt ned i havbunden, og respiration med ilt er den altdominerende proces for nedbrydning af organisk materiale. Den overraskende tynde iltede zone har stor betydning for redox-forholdene, omsætningen og mobiliteten af vigtige bioelementer som nitrogen, fosfor og spormetaller på de største havdybder. Eksempelvis har det vist sig, at hadale bakterier i det iltfrie sediment fjerner store mængder af biotilgængeligt nitrogen ved en proces kaldet anammox (anaerob ammonium oxidation) – der første gang blev erkendt i "spildevand" i 1990'erne. Om end de biogeokemiske forhold på mange måder er særegne, ligner de mikrobielt medierede nedbrydningsprocesser i de hadale dyb, tilsyneladende forholdene i kystzonen meget mere end i det øvrige dybhav. Dog forløber de mikrobielt medierede processer på hadal dybde under et ekstremt hydrostatisk tryk, der formodentlig kræver, at bakterierne har særligt tilpassede enzymsystemer, membraner, cellevægge og transportsystemer.

De hadale mikrober er distinkt forskellige fra mikrober på lavere vand – men tilsyneladende er de mikrobielle samfund i de respektive hadale grave også meget forskellige. De hadale mikrober udviser også en overraskende stor diversitet. Tilpasning til ekstremt tryk er således ikke en evolutionær

Ådselsædere i dybet

En næringskilde for livet i de hadale grave er ådsler, der synker ned fra overfladeoceanet. Ådselæderne kan studeres ved at nedsænke døde fisk foran et kamera og følge de organismer, der ankommer for at tage for sig af retterne. På abyssale dybder domineres festen af fisk, men kommer vi ned på de hadale dybder, overtages denne niche af krebsdyr som gigantiske tanglopper. Fysiologien hos fisk begrænser deres dybdeudbredelse til cirka 8 km, mens krebsdyr er bedre til at tilpasse sig det ekstreme tryk i den hadale zone.

Fotos: Alan Jamieson

flaskehals for mikrobielt liv. Muligvis spiller en horisontal gentransport mellem bakterier, medieret af bakterie-inficerende virus, en vigtig rolle for effektiv tilpasning til forholdene i dybet? Der er stadig meget at lære om tilpasning og evolution af mikrobielt liv på de store havdybder.

Højere liv i de hadale grave

Repræsentanter fra de fleste faunagrupper har tilpasset sig det ekstreme tryk i de hadale grave. Mange hadale arter er endemiske og findes altså kun i de dybe grave. Det er stadigt uklart, i hvilken udstrækning de biologiske samfund i de respektive grave er genetisk isoleret, eller hvor stort spredningspotentialet er for forskellige faunagrupper. Der er tilsyneladende eksempler på både distinkt isolering og spredning mellem forskellige grave formodentlig via dybe havstrømme, der således dikterer intensiteten og retningen for spredningen af hadale organismer.

Den hadale fauna er imidlertid fattig på visse grupper såsom søpunge og søstjerner, mens andre er stærkt overrepræsenteret som eksempelvis søpølser. En markant observation er manglen på fisk på de allerstørste havbyder. Der findes ganske vist flere hadale fiskearter, alle stammer fra familien *Ringbuge*. Dybdegrænsen for fisk ligger i omegnen af 8 kilometer, da deres fysiologi ikke gør det muligt at leve ved et højere tryk. Den dybeste veldokumenterede observation af en fisk blev gjort på 8336 meters dybde i Izu-Ogasawara-graven af et internationalt forskningshold den 15. august 2022. Kort efter lykkedes det holdet at fange to individer af en anden fiskeart på 8022 meters dybde i Japanergraven.

Krebsdyr er mere resistente mod ekstremt tryk, og de udgør den helt dominerende og mest diverse faunagruppe på de største havdybder. Således har tanglopper (amphipoda) overtaget den biologiske niche som ådselædere af større dyr, der lander i gravene. Tanglopperne er meget succesfulde og kan nå imponerende størrelser på mere end 20 centimeters længde. Livet har således tilpasset sig de ekstreme forhold i dybet – langt fra havoverfladen og kystzonen, og det var derfor også højst overraskende, da man fandt markant forhøjede koncentrationer af miljøfremmede stoffer i den hadale fauna. Eksempelvis viste amphipoder på 10 kilometers dybde meget høje koncentrationer af industrielt produceret PCB (Poly-Chlorineret Biphenyl).

Menneskeskabt forurening på de største havdybder

Det er altså ikke kun organisk carbon, der deponeres, fokuseres og akkumulerer i de hadale grave, miljøfremmede stoffer finder også vej til de fjerneste afkroge på kloden. Således er der fundet stærkt forøgede koncentrationer af kviksølv i både

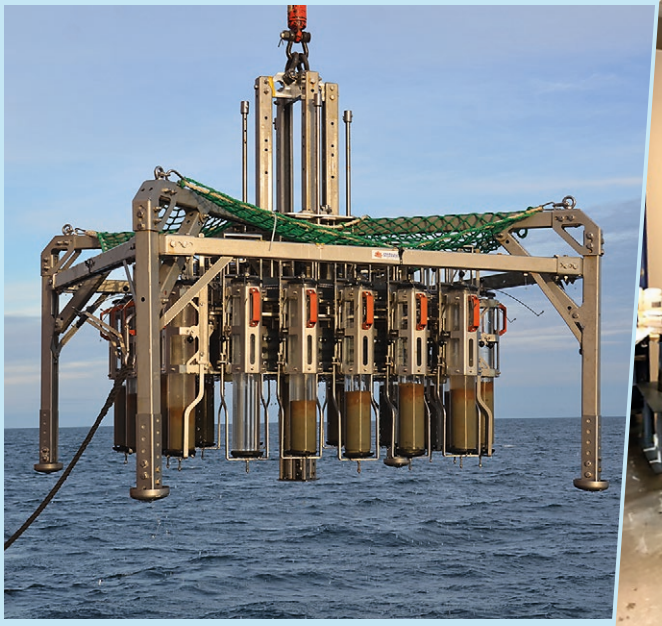


Foto: Thomas Walter

Foto: Anni Glud

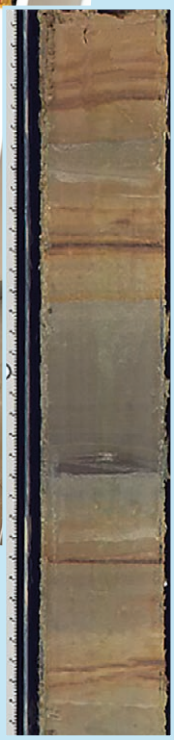


Foto: Matthias Zabel

Sedimentkerner

Relativt uforstyrrede sedimentkerner kan udtages med en såkaldt multiplecorer, som ses på billedet. De lagdelte kerner afspejler blandt andet hændelser som askelag dannet af vulkanudbrud eller sedimentlag dannet af laviner induceret af jordskælv. Opskæringen af prøverne og efterfølgende analyser og sedimentdateringer giver indsigt i mange biogeokemiske processer og afslører for eksempel fordelingen af spormetaller, forurenede stoffer og begravelsesraten af organisk carbon i havbunden.

fauna og sediment i flere hadale grave. Tilsvarende indeholder overfladesedimentet i Atakama- og Kermadecgravene høje koncentrationer af PCB, der blev forbudt i 1970'erne.

I lavvandede havområder er sedimentlag med høje PCB-koncentrationer ofte begravet under sedimentoverfladen, men i de hadale grave findes PCB tæt på sedimentoverfladen. Det afspejler formodentlig, at de svært nedbrydelige miljøfremmede stoffer efter en forsinkelse og langt efter produktionsforbuddet, nu har nået de hadale dybder. De relativt høje koncentrationer af miljøfremmede stoffer i det hadale miljø skyldes formodentlig en bioakkumulering via ådsler som hvaler og store fisk, adsorption til synkende partikler og den før omtalte seismisk inducerede transport af sediment fra lavere dybde. Man kan nok forvente, at koncentrationen af miljøfremmede stoffer i de hadale grave vil stige i de kommende år.

Det er kun indenfor de seneste 5-10-år, at det har været teknisk muligt for bemandede ubåde rutinemæssigt at dykke ned i de hadale grave – og med antallet af dyk øges vores forståelse af den hadale zone, men også antallet af observationer af menneskelig påvirkning. Det er forstemmende at se plastikposer flyde forbi ubådens vinduer på 10 kilometers dybde og finde mikroplastik i den hadale fauna. Sidste år blev dybhavsforskning beriget med en ny term; "Müllspuren" (oversat fra tysk: affaldsspor). Termen er afledt af "Lebensspuren", der dækker over spor efter fauna i havbunden, og som findes i både moderne sedimenter og i fossile aflejringer, hvor de giver et indblik i udviklingen af liv og adfærd gennem geologiske tidsaldre. Lange lige aftryk i de hadale overfladesedimenter havde imidlertid undret forskerne, indtil observationer på 10 kilometers dybde i Filippiner-graven viste, at det skyldtes aftryk fra drivende plastikposer, der blev trukket over havbunden med strømmen. De hadale grave er således ikke isolerede habitater langt fra menneskeskabte påvirkninger, men bærer tydelige præg af den Antropocæne tidsalder.

Mange nye opdagelser venter

De hadale grave er unikke habitater med særegne livsformer, der har udviklet sig under det ekstreme tryk. Men det er også habitater, der tilsyneladende har uforholdsmæssig stor betydning for oceanernes elementkredsløb og ikke kan forstås ved at ekstrapolere vores viden om det øvrige ocean. Gravene er overraskende diverse og dynamiske og tæt koblede til variationer i overfladeoceanet og måske langt mere sårbare overfor menneskeskabte påvirkninger end tidligere antaget. Men udforskning af gravene er kun lige begyndt, og der er stadig mange opdagelser at gøre på de største havdybder. ■

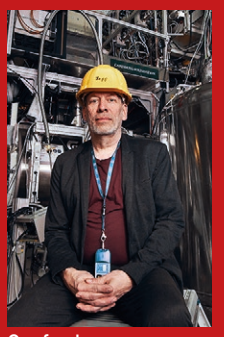
Videre læsning:
Forskningscenteret HADAL:
www.sdu.dk/hadal

Nye målinger afgør sagen:

ANTISTOF FALDER IKKE OPAD

På det fælleseuropæiske center for højenergifysik CERN forsøger fysikerne at besvare det grundlæggende spørgsmål, om antistof opfører sig på samme måde som almindeligt stof. Det seneste forsøg viser, at atomer af antihydrogen (antibrint) og atomer af almindeligt hydrogen opfører sig ens i et tyngdefelt: Begge falder nedad.

Om forfatteren
Af Henrik Bendix, videnskabsjournalist.
bendix@vidmere.dk



Om forskeren
Jeffrey Hangst er professor i eksperimentalfysik ved Aarhus Universitet. Han er grundlægger og talsperson for eksperimentet ALPHA ved CERN, hvor forskerne eksperimenterer med antistof.
Jeffrey.Hangst@cern.ch

Jeffrey Hangst holder den 7. november 2023 foredrag om forskningen i antistof ved CERN i serien offentlige foredrag i Naturvidenskab. Denne artikel knytter an til dette foredrag og er lavet som led i projektet *Brobygning på første række* finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Antistof falder nedad. I forhold til tyngdekraften opfører antiatomer sig som almindelige atomer. Det ved vi nu, efter at det nu er lykkedes en gruppe CERN-forskere med Aarhus-forskeren Jeffrey Hangst i spidsen at måle på antihydrogen i frit fald. Resultatet er det foreløbige højdepunkt i årtiers forskning inden for antistof.

»Vi har lavet den første direkte måling på antistof i et tyngdefelt. Tyngdekraften er den suverænt svageste af de fire naturkræfter, og det er meget svært at måle, hvordan tyngdekraften påvirker antipartikler. Ingen har gjort det før, og det har kun været muligt, fordi vi har målt på antiatomer, der er elektrisk neutrale,« siger Jeffrey Hangst, der ikke lægger skjul på, at han er stolt af bedriften.

Det nye forskningsresultatet er netop publiceret i *Nature*, og det er ikke første gang, CERN-gruppen har fået en videnskabelig artikel i det prestigefyldte tidsskrift. Det er sket adskillige gange i løbet af de seneste par årtier, og antistoffet har været omdrejningspunktet for Jeffrey Hangsts karriere endnu længere.

»Vores styrke er netop, at vi kan danne og indfange antiatomerne. Vi er de eneste i verden, der kan gøre det. Vi har indfanget antihydrogenatomer, sluppet dem løs og målt, hvad der sker. Vores målinger viser, at Jorden tiltrækker antihydrogenatomer, og vi kan udelukke, at antistof falder opad,« fortæller han.

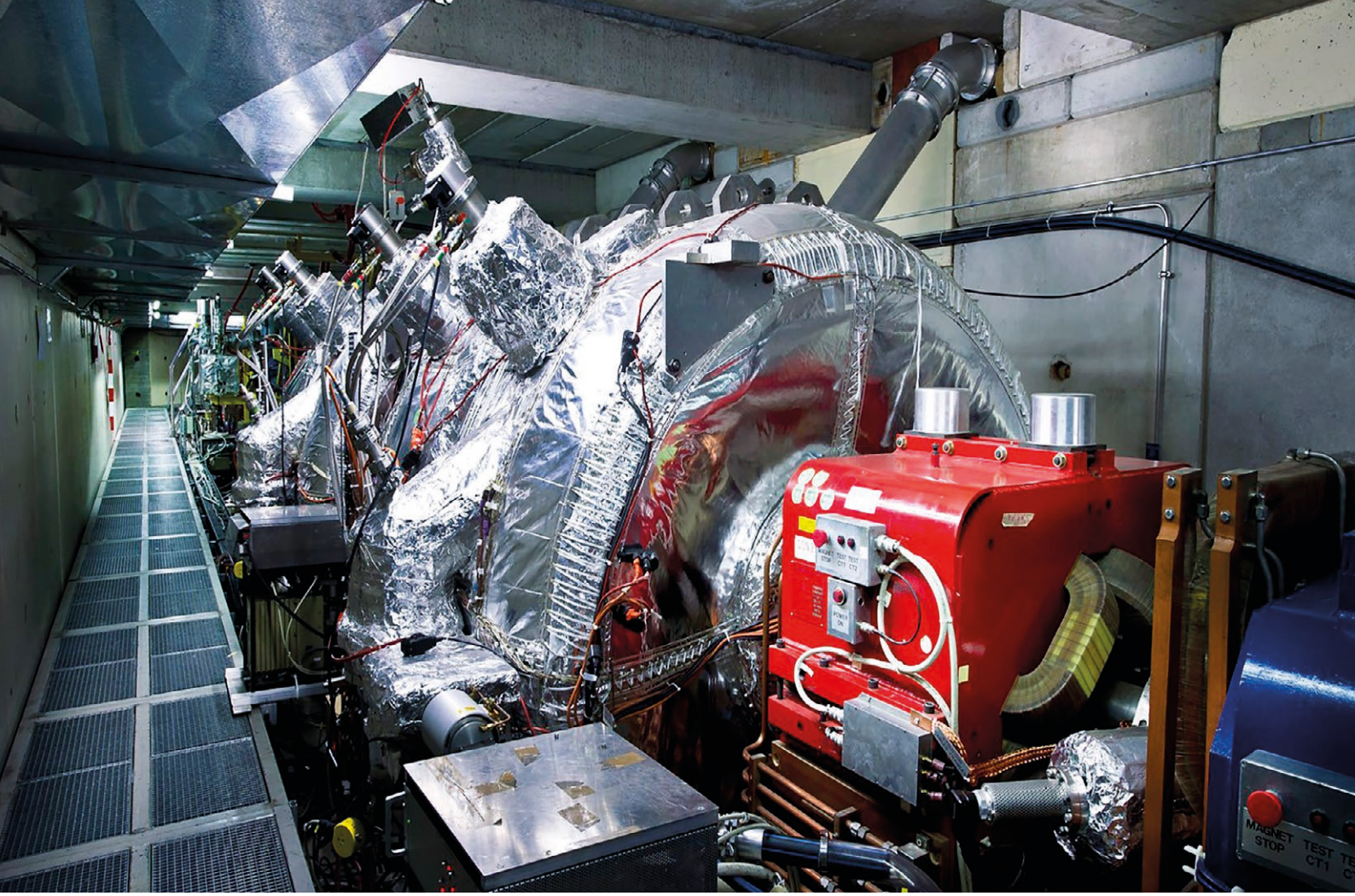
Jeffrey Hangst er professor ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet, men tilbringer det meste af sin tid ved det europæiske forskningscenter CERN i Schweiz. Det er nemlig her, fysikerne har mulighed for at eksperimentere med det ekstremt sjældne og dyrebare antistof. Lige siden 2001 har forskeren med de amerikanske rødder været udstationeret ved CERN, hvor han har udforsket antistoffet i samarbejde med andre forskere fra Aarhus Universitet og en række andre forskningsinstitutioner rundt omkring i verden.

Universet foretrækker stof frem for antistof

Med lidt god vilje kan man sige, at antistof er stoffets spejlbillede. Antistof ligner almindeligt stof til forveksling, bortset fra den vigtige forskel, at antistoffet har den modsatte elektriske ladning. Til hver en partikel hører en antipartikel, for eksempel har elektronen en antipartikel, der kaldes positronen.

Mange kender antistof fra bøger som for eksempel Dan Browns *Engle og dæmoner*, hvor forbrydere stjæler antistof fra CERN for at bruge det i en bombe. Antistof optræder også i science fictions, hvor det bliver brugt som raketbrændstof.

I litteratur og film bunder fascinationen af antistof først og fremmest i dets højeksplosive natur. Når antistof kommer i kontakt med almindeligt stof, bliver begge dele



Ved hjælp af Antiproton-deceleratoren, der blev taget i brug ved CERN i år 2000, blev det meget lettere for fysikerne at danne antihydrogenatomer. Foto: CERN

tilintetgjort under udsendelse af energi i form af stråling og/eller nye partikler. Massen omdannes til energi jævnfør Einsteins berømte formel $E = mc^2$, hvor E er energi, m er den samlede masse af partiklen og antipartiklen, og c er lysets hastighed. Der skal blot et halvt gram antistof til at skabe samme mængde energi, som blev frigivet af atombomben over Nagasaki.

Men selvom CERN-forskerne nu kan danne og fastholde tusindvis af antiatomer, er der meget langt til det halve gram, og fysikerne tænker da heller ikke i brændstof eller bomber. For dem er det langt vigtigere, at studiet af antistof måske kan føre os på sporet af løsningen på et af fysikkens største mysterier: Hvorfor foretrækker naturen tilsyneladende stof frem for antistof? Hvorfor lever vi i et univers, hvor der er masser af stof, men næsten ikke noget antistof?

»Der mangler antistof i universet. Vi mener, at der ganske tidligt i universets historie blev dannet lige så meget antistof som stof, men nu er kun stoffet tilbage. Det kan vi simpelthen ikke forklare,« fortæller Jeffrey Hangst.

»Det er ikke sikkert, at studiet af antihydrogen kan opklare mysteriet, men når nu vi har muligheden, ville det være fjollet ikke at forsøge at foretage så præcise målinger som muligt på antistoffet.«

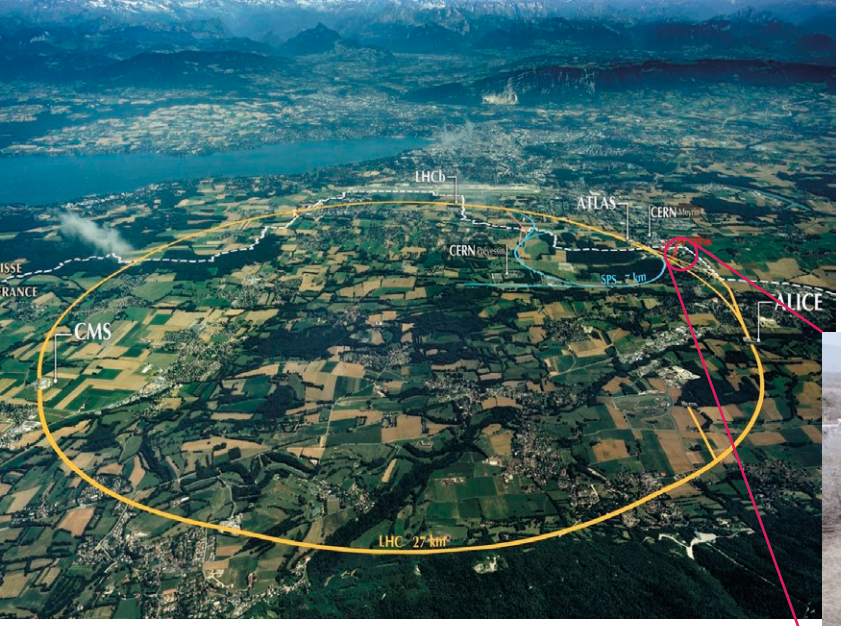
Fysikernes bedste teori for elementarpartikler og deres vekselvirkninger kaldes standardmodellen, og her forudsættes en grundlæggende symmetri mellem stof og antistof. Hvis alt stof i universet blev byttet ud med antistof, universet blev spejlvendt og tiden gik baglæns, ville vi ende med et univers som det, vi bor i.

Men det gælder altså kun, hvis stof og antistof er hinandens spejlbilleder, og antihydrogen opfører sig som hydrogen i de forsøg, som CERN-holdet står bag. Hvis det ikke er tilfældet, må fysikerne revidere teorierne, og så kan universets forkærlighed for stof frem for antistof måske forklares.

Antiatomer slippes fri

Indtil videre ser det ikke ud til, at der er forskel, og de fleste fysikere forventede da også, at antistof blev påvirket af tyngdekraften på præcis samme måde som almindeligt stof. Ifølge Einsteins almene relativitetsteori kan tyngdekraften beskrives som en krumning af rumtiden, og den krumning forårsages af alle former for energi, inklusive masse. Da antistof har masse, burde det ifølge relativitetsteorien opføre sig som almindeligt stof.

Sagt på en anden måde ville det bryde mod Einsteins ækvivalensprincip, der er en grundlæggende antagelse i den almene relativitetsteori, hvis antistof viste sig at falde opad eller blot falde en smule anderledes end almindeligt stof. Ækvivalensprincippet har som konsekvens, at alle objekter falder



Antihydrogenforskningen foregår i en lille del af CERN's enorme acceleratorkompleks, nærmere bestemt i den store antiprotondecelerator-hal, der populært kaldes antistoffabrikken. På oversigtsbilledet er indtegnet de største acceleratorer ved CERN, som er Large Hadron Collider (LHC) og Super Protron Synkroton (SPS). Fotos: CERN

lige hurtigt i et tyngdefelt, og det gælder altså også antistof.

Der findes dog også fysikere, der har leget med tanken om, at stof og antistof i stedet frastøder hinanden. En del modeller for universets udvikling er baseret på den antagelse. Men disse kosmologiske modeller kan ryge i glemmebogen, efter at det nu er lykkedes at få data baseret på eksperimenter.

»Der er mange argumenter for, at tyngdekraft er universelt tiltrækkende. Men ét er at påstå, at antistof falder nedad, noget andet er at måle det. Fysik er en videnskab, hvor observationen er kongen,« siger Jeffrey Hangst.

Eksperimentet hedder ALPHA-g, hvor ALPHA er en forkortelse for Antihydrogen Laser Physics Apparatus, mens det lille g står for tyngdeaccelerationen ved Jordens overflade. Apparatet blev konstrueret i 2018, efter at Carlsbergfondet støttede med en Semper Ardens-bevilling på 15,5 millioner kroner.

Forsøget er nemt at beskrive. Man fanger en flok antiatomer i et magnetfelt, og så lader man dem undslippe igennem én af to udgange: En foroven og en forneden. Hvis antiatomerne falder opad, vil de fleste af dem smutte ud ad døren foroven og omvendt.

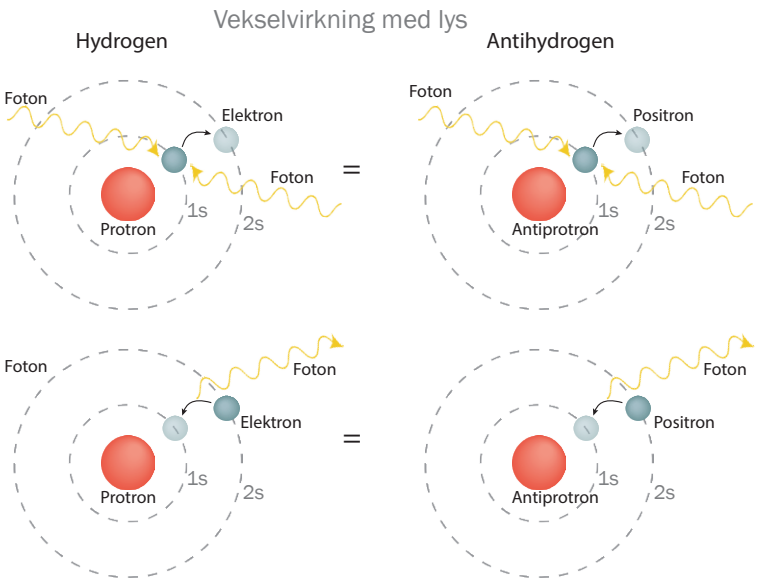
»Når vi slipper antiatomerne løs, er nogle på vej opad, nogle på vej nedad og nogle bevæger sig sidelæns. Men når de påvirkes af tyngdekraften, bevæger flere sig nedad end opad, og det kan vi måle,« siger Jeffrey Hangst.

Men lige så simpelt eksperimentet lyder, lige så svært har det været at udføre det i praksis, og rejsen dertil har været lang. Man kan faktisk sige, at den startede helt tilbage i 1928, hvor antistof blev forudsagt teoretisk, før det blev fundet eksperimentelt.

Først forudsagt, så fundet

Sidst i 1920'erne arbejdede den geniale britiske matematiker og fysiker Paul Dirac med at kombinere kvantemekanikken med den specielle relativitetsteori, og i 1928 kom han frem til en ligning, som kan beskrive en elektron, der bevæger sig med en hastighed nær lysets. Men ligningen, der nu kaldes Dirac-ligningen, tillader også en partikel, der til forveksling ligner en elektron, blot med modsat elektrisk ladning.

Tre år senere konkluderede Dirac, at der til enhver partikel måtte høre en antipartikel, altså en partikel med samme masse, men modsat elektrisk ladning. For eksempel burde der eksistere en antielektron med positiv ladning og en proton med negativ ladning. Det var en påstand, som var svær at tage for gode varer, for sådanne antipartik-



Det kræver præcis samme mængde energi at løfte hydrogen og antihydrogen fra grundtilstanden til første exciterede tilstand – dvs. at få henholdsvis en elektron og en positron til at skifte bane fra 1s til 2s (øverst).

Når elektronerne skifter tilbage til grundtilstanden (nederst), kan forskerne kan måle frekvensen (farven) af lyset ved denne overgang med stor præcision.

ler var aldrig blevet observeret.

Men det ændrede sig i 1932, hvor den amerikanske fysiker Carl Anderson opdagede et spor efter en hidtil ukendt partikel i sit tågekammer. Partiklen havde præcis samme masse som elektronen, men en positiv frem for negativ ladning. Det stod klart, da dens bane blev afbøjet i et magnetfelt nøjagtigt som en elektrons bane ville gøre det, men i den modsatte retning.

Elektronens antipartikel fik navnet positronen. Paul Dirac fik Nobelprisen i fysik i 1933, mens Carl Anderson modtog den tre år senere. Begge var blot 31 år, da de fik den prestigefyldte pris.

Den positron, som Carl Anderson så sporet efter i tågekammeret, stammede fra kosmisk stråling. Når energirige partikler – hovedsageligt protoner – fra det ydre rum rammer atomkerner i atmosfæren, opstår der nye, eksotiske partikler, der hurtigt henfalder. Blandt henfaldsprodukterne finder man positroner.

Det blev hurtigt klart, at positroner også udsendes af visse radioaktive isotoper (grundstofvarianter). For eksempel rummer naturligt forekommende kalium cirka 0,01 procent radioaktivt kalium-40, der primært henfalder ved beta-plus-henfald, hvor der udsendes en positron. Da bananer rummer meget kalium, producerer bananer faktisk ganske små og fuldstændig uskadelige mængder positroner, der hurtigt forsvinder i mødet med elektroner.

Efter opdagelsen af positroner gik jagten på antiprotoner ind, og her fik fysikerne hjælp fra partikelacceleratorer. Små acceleratorer dukkede op i 1930'erne og 1940'erne, men der skulle en stor accelerator til, før antiprotoner kunne produceres.

Først i 1955 lykkedes det amerikanske forskere ved Lawrence Berkeley National Laboratory at frembringe antiprotoner. De brugte den nye, store accelerator Bevatron til at accelerere protoner op til meget høje energier (over 6 GeV) og lade dem kollidere med et metalmål, hvorved et væld af nye partikler – herunder ind imellem en antiproton – opstod. Den eksperimentelle påvisning af antiprotoner kastede også et par Nobelpriser af sig.

Billedet viser ALPHA-g kryostaten, der indeholder alle superledende magneter og partikelfælder (Penning) til ALPHA-g-eksperimentet. Foto: CERN

Antiprotoner skal bremses

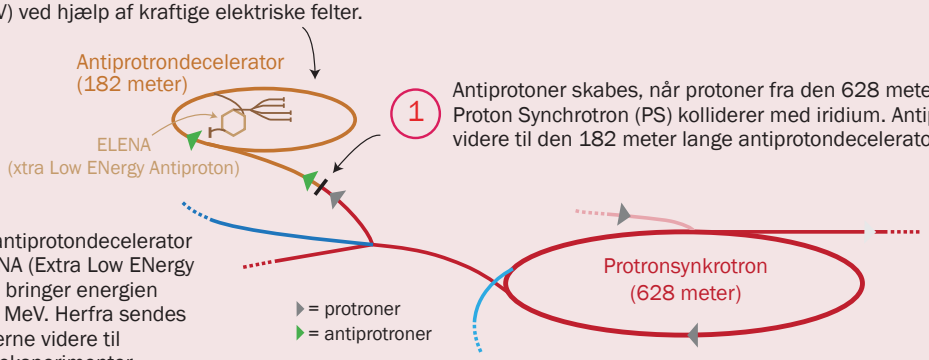
Med antiprotoner og positroner har man ingredienserne til at fremstille antiatomer i form af antihydrogen. Men det er nemmere sagt end gjort, for de nyskabte antipartikler har godt med fart på, så de er svære at holde styr på. Det bliver ikke nemmere af, at det er bydende nødvendigt at holde antistof isoleret fra almindeligt stof, så begge dele ikke forsvinder i et glimt af elektromagnetisk stråling.

I 1995 lykkedes det forskere fra CERN at fremstille ni antiatomer ved at bombardere xenongas med milliarder af antiprotoner igennem tre uger. Antiatomerne holdt kun i 40 milliardtedele af et sekund, før de forsvandt ved sammenstødet med almindeligt stof.

Sådan målte fysikerne tyngdekraftens påvirkning af antistof

CERN rummer et enormt kompleks af acceleratorer beregnet til eksperimenter med højenergifysik. Grafikken viser øverst det udsnit af det samlede kompleks, som er relevant for antistofforskningen (de stiplede linjer viser, at protronsynkrotonen er forbundet til en række andre acceleratorer og eksperimenter på CERN). Nederst i grafikken zoomes ind på selve eksperimentet, hvor fysikerne målte tyngdekraftens påvirkning af antistof. Bemærk, at i højenergifysikken måles partiklers energi i elektronvolt (eV), hvor en elektronvolt svarer til $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule.

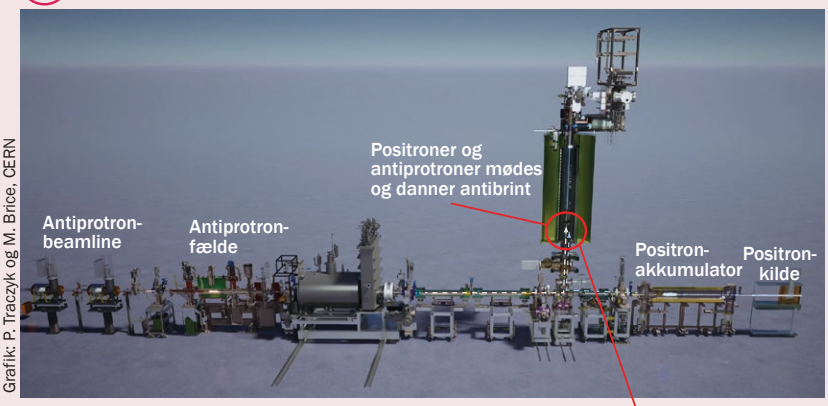
2 I antiprotrondecelleratoren bliver antiprotonerne bremset ned til en energi på 5,3 megaelektronvolt (MeV) ved hjælp af kraftige elektriske felter.



1 Antiprotoner skabes, når protoner fra den 628 meter lange accelerator Proton Synchrotron (PS) kolliderer med iridium. Antiprotonerne sendes videre til den 182 meter lange antiprotondecelerator (AD).

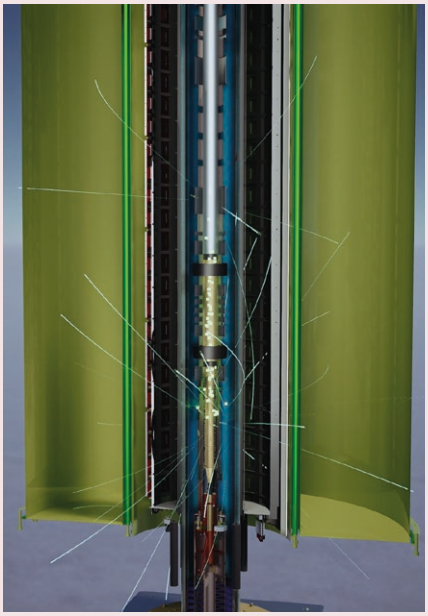
3 En ekstra antiprotondecelerator kaldet ELENA (Extra Low ENergy Antiproton) bringer energien ned på 0,1 MeV. Herfra sendes antiprotonerne videre til forskellige eksperimenter.

4



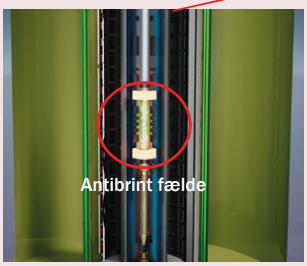
Grafik: P. Traczyk og M. Brice, CERN

Antiprotonerne fra ELENA fanges i elektriske og magnetiske felter i en såkaldt Penning-fælde og afkøles, før de sendes ind i ALPHA-g. Her møder de positroner opsamlet fra radioaktivt natrium, så der dannes antihydrogenatomer. Det er helt afgørende, at antihydrogenatomer dannes ultrakoldt – med en temperatur under 0,5 K, for at de kan fanges.



Grafik: P. Traczyk og M. Brice, CERN

5 Antihydrogenatomerne har ingen elektrisk ladning, men de har et magnetisk dipolmoment, der gør det muligt at opbevare dem i et kraftigt magnetfelt. Cirka 100 antiatomer opsamles, før de frigives, så de enten forlader fælden foroven eller forneden.



6 Når et antiatom kolliderer med væggen i ALPHA-g, tilintetgøres det, og der dannes herved nye partikler (pioner), som forskerne kan detektere. På den måde kan forskerne tælle sig frem til, at langt de fleste antihydrogen-atomer falder mod bunden af fælden, før de forlader den, og antistof derfor falder nedad.

Se også en animation på YouTube:

Hvis fysikerne skulle gøre sig håb om at fastholde og måle på antiatomer, var det afgørende at bremse antiprotonerne ned, før de blev kombineret med positroner. Jeffrey Hangst var medvirkende til, at CERN besluttede at bygge The Antiproton Decelerator, der stod klar i 2000. Med de nedbremsede antiprotoner blev det meget lettere at danne antihydrogenatomer.

»Vi har brug for antihydrogen, for det er perfekt til at undersøge, hvordan antistof opfører sig. Lige siden Niels Bohrs dage har vi kendt almindeligt hydrogen rigtig godt, og vi har foretaget ekstremt præcise målinger på det. Når vi kan danne og indfange antihydrogenatomer, kan vi måle på dem og sammenligne med hydrogenatomer,« siger Jeffrey Hangst.

Han stod i spidsen for eksperimentet Athena, hvor antiprotoner fra decelleratoren blev bremset yderligere ned og kombineret med positroner fra radioaktivt natrium-22. I 2002 kunne forskerne vise, at Athena frembragte tusindvis af antihydrogenatomer.

Men det krævede en ny og forbedret forsøgsopstilling med en antihydrogenfælde i form af et kraftigt magnetfelt med en særlig udformning at opbevare antistoffet længe nok til, at der kunne måles på det. Den fik navnet ALPHA, og i 2010 lykkedes det at fange 38 antihydrogenatomer i 172 millisekunder. Året efter kunne holdet bag ALPHA meddele, at de nu kunne opbevare hundredvis af antiatomer i 1000 sekunder, altså godt 16 minutter.

Antihydrogen udsender samme lys som hydrogen

Endelig var vejen banet for at måle antihydrogens egenskaber. Så fysikerne satte sig for at finde ud af, om antihydrogen vekselvirker med lys – fotoner – på samme måde som almindeligt hydrogen. Tilbage i 1913 fandt Niels Bohr ud af, hvorfor hydrogenatomer absorberer og udsender lys med ganske bestemte bølgelængder, og nu ville Jeffrey Hangst finde ud af, om antihydrogenatomer udsender lys ved præcis samme bølgelængder.

ALPHA blev opgraderet til ALPHA-2, som blev forsynet med et vindue i antiatomfælden, så laserstråler kunne bringe antihydrogenatomerne i en højere energitilstand. I 2016 kunne fysikerne lave de første målinger på antiatomer, der vekselvirker med laserlys.

To år senere var målingerne 100 gange mere præcise, så forskerne nu kan sige, at antihydrogen opfører sig præcist som hydrogen, når det gælder vekselvirkningen med lys. Der skal samme energi til at løfte hydrogen og antihydrogen fra grundtilstanden til første exciterede tilstand.

Med det resultat i hus kastede forskerne sig over tyngdekraftmålingerne med ALPHA-g, fortæller Jeffrey Hangst:

Indsættelse af ALPHA-g annihilationsdetektoren, der måler positionen af antihydrogen-annihileringerne, når atomerne slipper ud. Foto: CERN

»Der var rigtig meget, vi skulle lave om, for hvor ALPHA-2 ligger vandret, skulle vi bruge en lodret antihydrogenfælde for at måle tyngdekraftens virkning. Vi skulle dreje hele apparatet 90 grader, og det er meget krævende at få antiprotonerne til at skifte retning.«

ALPHA-g er da også et enormt apparat, der fylder flere etager, selv om selve atomfælden blot er 25,6 cm høj og 4,4 cm i diameter. Det var fra denne fælde, antihydrogenatomerne kunne slippe væk gennem åbninger foroven og forneden. Da de fleste faldt mod bunden af fælden, kan CERN-fysikerne nu sige, at antistof falder mod Jorden på samme måde som almindeligt stof.

Måleusikkerhederne er betydelige, så fysikerne kan ikke fuldstændig afvise, at der er forskel på, hvor hurtigt stof og antistof falder i et tyngdefelt. Men de kan sige, at antistof i hvert fald ikke falder opad.

Næste skridt er at forfine målingerne og gøre usikkerhederne mindre, men det kræver en ny og bedre udgave af ALPHA-g. Specielt skal antiatomerne køles ned, så de bevæger sig langsommere.

»I dag har de antihydrogenatomer, vi fanger, en temperatur på 0,5 grader over det absolutte nulpunkt ved -273,15 °C. Men med laserkøling kan vi få temperaturen helt ned på 10 millikelvin, altså 50 gange koldere. Det svarer til, at antiatomerne bevæger sig syv gange langsommere, og så kan vi lave langt bedre målinger,« fortæller Jeffrey Hangst og fortsætter:

»I år satser vi på at forbedre vores spektroskopiske målinger af antihydrogen, så de bliver lige så præcise som for hydrogen. Og i løbet af 2024 vil vi foretage mere præcise målinger af tyngdekraftens påvirkning på antihydrogen.«

Fysikerne ved CERN's antistoffabrik har fast arbejde i nogle år endnu. ■

Videre læsning:

Artiklen i *Nature*: Anderson, E.K., Baker, C.J., Bertsche, W. et al. Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter. Nature 621, 716–722 (2023). https://doi.org/10.1038/s41586-023-06527-1

Animation på YouTube: https://youtu.be/zpQQ43nrCp4?si=-h2jwktsKFvmOdCHY Kredit: P. Traczyk og M. Brice, CERN

Se mere om ALPHA: alpha.web.cern.ch

Læs mere om antipartikler og antihydrogen i Aktuel Naturvidenskab: Niels Madsen: Greb om antibrint – virkelighedens Engle og dæmoner. Aktuel Naturvidenskab nr. 2/2006

Helge Knudsen og Ulrik Uggerhøj: Antipartikler. Aktuel Naturvidenskab nr. 6/2001

Fotos: Shutterstock og Colourbox

JAGTEN PÅ HUNDENS OPRINDELSE

De enorme mængder genetiske, arkæologiske og morfologiske data, som forskere i dag har til rådighed, gør det muligt at komme med det indtil dato mest kvalificerede bud på, hvornår mennesker domesticerede ulven og gjorde den til vores bedste ven – hunden.

Om forfatteren
Af Kristian Sjøgren, 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 Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på www.dff.dk

Der kan være mange grunde til, at vi mennesker kalder hunden for vores bedste ven. Måske skyldes det deres ubenægtelige loyalitet, deres intelligens, eller måske skyldes det, at hunden var det første dyr, som vi mennesker domesticerede. Hunden har med andre ord levet blandt os i længere tid end *heste, grise, køer og får*, som de synger i "Jeg en gård mig bygge vil". Det betyder også, at allerede mens vi levede som jæger-samlere, havde vi måske en trofast ven med logrende hale siddende ved vores fødder, når vi tændte op i aftenbålet for at holde nattens farer på afstand.

Fordi hunden er så vigtig en del af vores samtid og vores fortid, har både lægmand og forskere i århundreder jagtet svaret på spørgsmålet: hvornår ulven egentlig blev til hund. Skete det for 15.000 år siden, eller var det tættere på 40.000 år siden? Skete det kun én gang, eller er det sket flere gange? Svaret på disse spørgsmål kan ikke alene gøre os klogere på, hvordan et mægtigt og frygtet rovdyr som ulven blev til en lavstammet gravhund, men også gøre os klogere på, hvordan vi mennesker har tæmmet naturen til vores egen gevinst. Vores egen udvikling er uløseligt sammenflettet med hundens, og ved at forstå, hvornår (og måske hvordan) vi gjorde ulven til hund, kan vi også bedre forstå vores egen forhistorie og de skridt, som har bragt os fra fortidens overlevelse til i dag at være verdens herskere. Netop svaret på disse spørgsmål har forskere fra Danmark kastet sig over.

»Det var et definerende øjeblik i vores forhistorie, da vi domesticerede et af de store rovdyr. Derfor har forskere og lægmand også interesseret sig for emnet i så lang tid, som de har, selvom vi i dag faktisk ikke har opnået konsensus om, præcis hvornår (og hvor) i forhistorien at ulven blev domesticeret. Men med nye teknologier er det indenfor de seneste år blevet muligt at opnå ny viden, som vi nu vil integrere til at komme tættere på et endegyldigt svar,« fortæller lektor Christy Hipsley fra Biologisk Institut ved Københavns Universitet.

Christy Hipsley har modtaget en bevilling på næsten tre millioner kroner fra Det Frie Forskningsråd til

én gang for alle at finde ud af, hvornår ulv blev til hund, og hvordan det skete.

Hvem gjorde ulve til hunde?

Der er mange måder at gå til opgaven at kortlægge hundens forhistorie. Det kan man gøre arkæologisk ved for eksempel at datere grave, hvori hunde er begravet med mennesker. Den ældste af disse grave er 14.200 år gammel og fra Oberkassel i Tyskland, hvor en mand i fyrrerne og en kvinde i tyverne blev begravet med det, som formentlig var parrets kæledyr. Hunden, der blev begravet i Oberkassel, havde karakteristiske hundetræk med et bredere hoved og en kortere snude end en ulv, hvilket tyder på, at hundens oprindelse skal findes mindst før dette tidspunkt i historien.

En anden måde at gå til opgaven på er ved at studere bevarede skeletdele (især kranier) og ændringer i deres form, størrelse mv. mellem ulve, hunde, protohunde og alt ind i mellem for at finde tegn på den proces, der over tusinder af år har forvandlet ulv til hund. Blandt andet har man fundet kranier med hundelignende morfologi dateret tilbage til for mellem 35.000 og 40.000 år siden, hvilket har givet forskere inden for området grå hår i hovedet, da der er markant forskel på de mennesker, som muligvis domesticerede ulven for 40.000 år siden, og de mennesker, som muligvis domesticerede ulven for 15.000 år siden. For 40.000 år siden var hele Europa dækket af en tyk iskappe under den seneste istid, mens isen var så godt som trukket tilbage for 15.000 år siden. Det satte sig ikke bare spor i geografien, men også i de livsvilkår som vores forfædre levede og skulle overleve under.

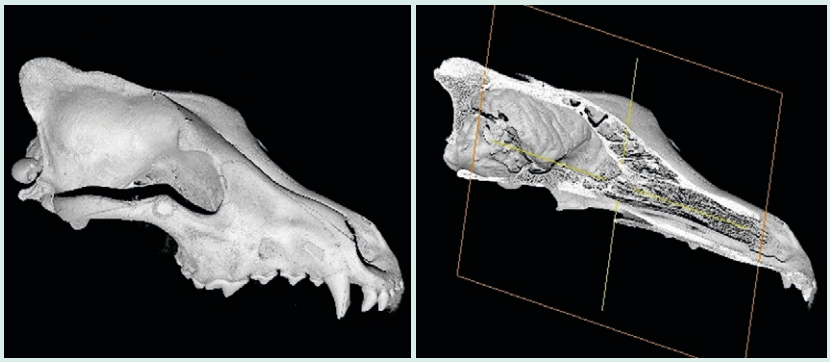
Moderne røntgen-CT-skannere har gjort det muligt at lave ekstremt præcise kortlægninger af kranier i høj opløsning, og derfor er det i dag muligt at lave meget præcise kortlægninger af de små forandringer i kraniestrukturen på rejsen fra fortiden til nutiden. Det gør, at forskere i dag har meget bedre muligheder

Det indtil nu ældst daterede fund, der beviser menneskets omgang med hunde, stammer fra Oberkassel i Tyskland og er 14.200 år gammelt. Her er en mand i fyrrerne og en kvinde i tyverne er blevet begravet sammen med en hund (skeletresterne øverst til højre), som formentlig har været parrets kæledyr.
Foto: Don Hitchcock, donsmaps.com

Foto: AAP Image/Joe Castro

Om Christy Hipsley

Christy Hipsley er oprindeligt fra USA. Hun tog sin kandidatuddannelse på Lunds Universitet i Sverige, og lavede derefter sin ph.d. på Berlins Naturhistoriske Museum i Tyskland, hvor hun studerede blandt andet fuglesang og krybdyrs evolution. Hun blev interesseret i hundens slægtskab med ulve efter at have arbejdet med den tasmanske pungulv i Australien. Hendes ekspertiseområde er hvirveldyrs evolution, og hun arbejder specifikt med at kvantificere og sammenligne komplekse morfologier i tre dimensioner ved hjælp af røntgen-CT.



Ved hjælp af røntgen-CT (CT står for Computer Tomografi) kan forskere som Christy Hipsley visualisere de interne strukturer i ulve- og hundekranier uden at ødelægge de undersøgte kranier. Den slags "ikke invasive" metoder er af stor værdi i forskningen.

Hunderacernes oprindelse

I dag er der flere end 400 hunderacer at vælge mellem, når vi skal finde et nyt familiemedlem. Men sådan var det ikke for bare få hundrede år siden, hvor hunde stadig udelukkende blev betragtet som nyttedyr, for eksempel jagthunde eller vagthunde. Først i begyndelsen af 1800-tallet begyndte folk i overklassen systematisk at avle hunde mod bestemte størrelser, farver, hårlængder, udseender og temperamenter. I 1800-tallet opstod også kennelklubber og hundeshows, hvor hunde ikke blev bedømt ud fra, hvad de kunne, men i højere grad ud fra deres udseende.

Med den systematiske avl opstod hunderacer med træk, der er meget forskellige fra deres ulveforfader. En ulv kan som eksempel veje op til 80 kilo, mens en chihuahua ikke vejer mere end tre. En ungarsk fårehund (komondor) ligner mere en gulvmoppe end en ulv, men den enorme og abnorme pels hjælper den med at klare selv de mest barske klimaer. En shar-pei er fremavlet til at have "for meget hud", som hænger i folder i ansigtet og over hele kroppen. Engelske mastiffer kan veje et godt stykke over 100 kilo med eksempler på nogle hunde med en vægt på op imod 150 kilo. Flere hunderacer er avlet til at være ekstremt aggressive og benyttes i hundeslagsmål.

Det er ikke utænkeligt, at mennesker tilbage for tusinder af år siden også ubevidst påvirkede udseende på de hunde, som levede blandt os dengang. Man kan for eksempel forestille sig, at hundens bredere hoved og kortere snude sammenlignet med ulvens er resultatet af selektiv avl, hvor mennesker ud af kuld af hundehvalpe har udvalgt sig dem, som havde netop disse træk og derved adskilte sig en smule fra ulvene. Mennesker har formentlig også udvalgt sig hunde med træk, der var mere forenelige med et liv blandt mennesker, for eksempel mindre aggressiv adfærd og større loyalitet.

Den voldsomme indavl for at skabe moderne hunderacer har dog ikke været uden omkostninger. Blandt andet er det tydeligt, at den genetiske diversitet i moderne hunderacer er mindre end hos hunde for tusinder af år siden. Denne lavere genetiske diversitet og udprægede indavl har ledt til, at nogle hunderacer har voldsomme indavlsproblemer, der går ud over deres livskvalitet. Det er som eksempel ikke sjældent, at schæferhunde har hoftedysplasi, og pekingesere har problemer med at trække vejret. Cavalier king Charles spanieler har ofte cyster i rygmarven, hvilket kan lede til problemer med både det sympatiske og parasympatiske nervesystem.

Et interessante aspekt er også, at alt den diversitet, som vi i dag finder i de mange hunderacer, har eksisteret i ulvene. Ellers kunne det slet ikke fremavles. Spørgsmålet er så, om denne enorme diversitet er unik for ulve, eller om den også findes i andre af de dyr, man kunne have forestillet sig, at mennesker kunne have gjort til vores bedste ven. Hvis mennesker havde valgt at gøre ræve til en del af vores familie, ville vi så i dag have over 400 ræveracer som kæledyr, eller indeholder rævene slet ikke den diversitet, som har gjort det muligt?

Tjekkoslovakisk ulvehund
Flere hunderacer ligner ulve rigtig meget, og det giver ofte anledning til forvekslinger.

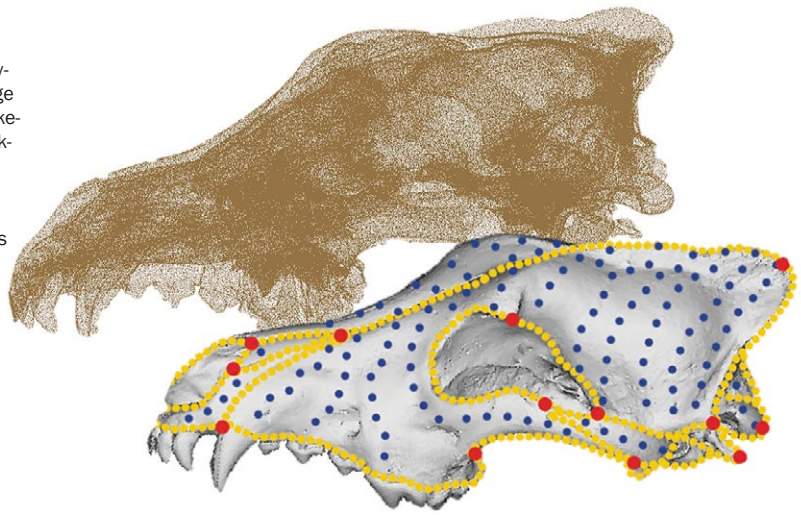
Chihuahua

Komondor

Shar-pei

Mastif

Fotos: Colourbox og Shutterstock



Digitale 3D-modeller af ulvekranier kan analyseres og sammenlignes ved brug af forskellige metoder. På det forreste kranium er der markeret "landemærker" i form af anatomiske punkter (rød), knogle-suturer (gul) og knogle-overflader (blå). I baggrunden er kranie-modellen konverteret til en sky af punkter, der består af millioner af punkter med samme indbyrdes afstand repræsenterende den overordnede form af kraniet.

for at afgøre, om et kranium har tilhørt en hund eller ulv, og hvor det passer ind i den kraniemorfologiske udvikling.

Så er der i dag selvfølgelig også den mulighed, at man kan bruge avancerede genetiske metoder til at kortlægge de genetiske ændringer i ulvens/hundens arvemateriale over tid. Helgenomsekventering har gjort det muligt at kortlægge alle de individuelle byggesten i arvematerialet, hvorved det i dag er muligt at se, hvad der genetisk er forandret i arvematerialet fra ulv til hund og under alle de små skridt ind imellem. Det kræver dog, at man har adgang til genetisk materiale at lave sine analyser på, og det har man ikke altid, når vi snakker om fortidshunde/-ulve, som levede for tusinder af år siden.

Hver metode giver hvert sit svar på, hvor og hvornår hunden så dagens lys, men i Christy Hipsleys forskningsprojekt kombinerer hun data fra alle kilderne for på den måde at komme med det mest kvalificerede bud til dato. Hun har selv lavet CT-skanninger af hundredvis af kranier, ligesom nogle af hendes kollegaer på universitetet har lavet genetiske kortlægninger af flere tusinde moderne hunde, hunde fra fortiden og ulve fra både nutid og fortid.

»Det er ikke sådan, at hunden den ene dag var en ulv og dagen efter var en hund. Ændringerne skete over lang tid, og ved at integrere data fra alle kilderne kan vi identificere signaturen i processen hen over hele hundens historie og forhistorie. Kigger man kun på data fra én af kilderne, ser man måske ikke hele billedet. Man kan have haft ulve, som opførte sig som hunde, og hunde, som opførte sig som ulve. Små forandringer over tid har gjort hunden til det, som den er i dag, og det er disse små forandringer, som vi kun kan finde ved at kigge i et bredt datamateriale,« forklarer Christy Hipsley.

Genetiske ændringer gjorde ulve til hunde

Faktisk består hovedparten af det forskningsarbejde, som Christy Hipsley står i spidsen for, ikke af at grave efter protohundeknogler i gamle grave på tværs af Europa eller tunge DNA-analyser i laboratoriet, men derimod af avanceret bioinformatik, der er nutidens guldgraveri indenfor avanceret forskning. Bioinformatikere er nutidens guldgravere, som ud fra enorme datasæt og med komplekse computermodeller trækker information, som ellers er gemt for øjet, ud af data. Blandt andet kan forskere på den måde identificere gener, der er unikke for hunde og dermed tydelige tegn på, at knogler fra tilbage i tiden stammer fra en hund og ikke en ulv.

Der findes blandt andet et gen for at kunne fordøje komplekse kulhydrater. Ulve har to kopier af genet for det stivelsesspaltende enzym amylase, men ved den mutationstype der hedder genduplikation har hunde fået 30 udgaver af det gen, hvilket medfører en kraftigt øget evne til at fordøje stivelse.

Årsagen er meget simpelt den, at ulve næsten udelukkende spiser kød, mens hunde kva deres tætte omgang med mennesker har haft fordel af at kunne leve af en mere varieret kost. Hunde kan på den måde fordøje en stivelsesrig kost. Et interessant faktum er, at grønlandske slædehunde faktisk ikke udviklede evnen til at fordøje komplekse kulhydrater, fordi deres kost udelukkende består af kød og fedt svarende til kostvanerne hos de mennesker, som de sameksisterer med. For hunde har livet sammen med mennesker altså betydet tilpasninger, der kan aflæses direkte i deres gener.

»Nogle evolutionære ændringer bliver så vigtige, at det ikke længere bliver muligt at avle hunde med ulve, og det baner vejen for adskillelsen af de to arter. De to arter kan godt få afkom sammen, men de såkaldte hybrider er ikke stærke. I gensekventeringerne har vi da heller ikke set nye bidrag fra ulv hos den grønlandske slædehund.« siger Christy Hipsley.

Kombinerer man de genetiske fund med morfologiske kendetegn, for eksempel den kortere snude og det bredere ansigt, får man et mere klart billede af, hvor et givent fund passer ind i forhistorien, og hvor meget ulv, protohund eller hund dyret var. Så er spørgsmålet blot at sætte alder på fundet.

Ulve domesticerede sig selv?

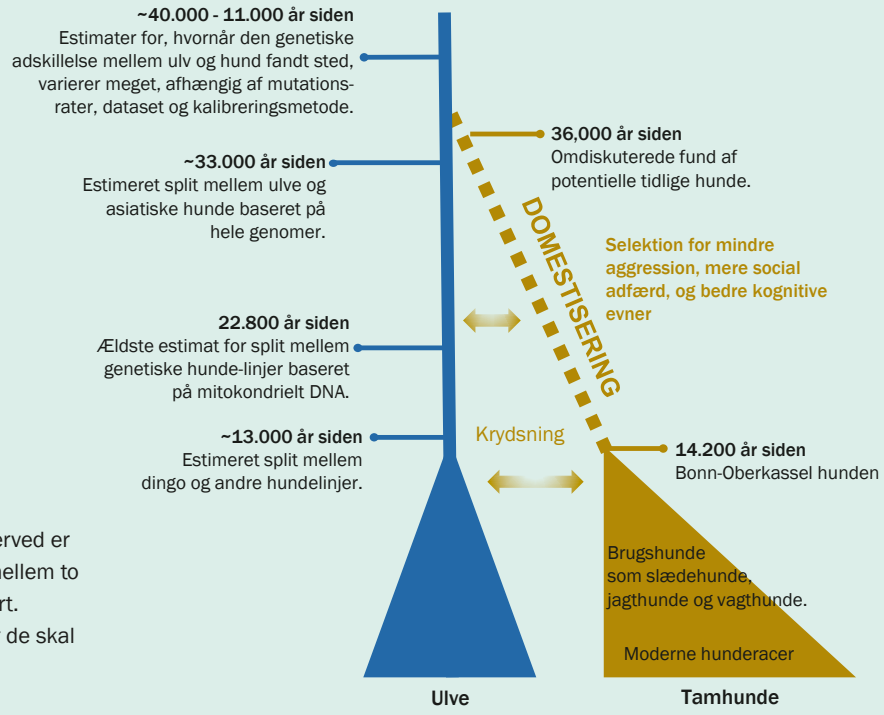
Men hvorfor og hvordan gik det egentlig til, at vores forfædre gjorde store kødædende rovdyr til en del af

DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Sådan kan forskere gå tilbage i genernes fortid

Når forskere skal blive klogere på udviklingen af en given art, benytter de ofte det såkaldte molekylære ur til at finde ud af, hvornår to arter havde en fælles forfader. Det kan være en fælles forfader mellem en hund og en ulv, mellem et menneske og en chimpanse eller for den sags skyld mellem et menneske og en ulv.

Tilgangen er baseret på molekylær genetik og udnytter mutationer i gener over tid til at estimere slægtskabsforhold mellem arter og beregne tidspunkterne for deres opsplitning i evolutionær historie. Det molekylære ur bygger på den grundlæggende antagelse, at mutationer skaber ændringer i organismers gener, og at disse ændringer sker med nogenlunde konstant hastighed. Derved er det muligt at tælle de opståede mutationer mellem to arter og bestemme, hvornår de sidst var én art. Forskere benytter ofte mitokondrielt DNA, når de skal bestemme slægtskabet mellem arter.



For at benytte det molekylære ur, skal det dog først kalibreres, og til det formål skal forskere have DNA fra dyr, som er tidsbestemt med relativ stor nøjagtighed. Ved at koble antallet af mutationer til disse kendte tidspunkter kan forskerne skabe en tidsskala for evolutionære begivenheder.

Når det molekylære ur er kalibreret, kan forskerne analysere DNA-sekvenserne i forskellige organismer og beregne, hvornår de delte en fælles forfader. Jo flere mutationer der er akkumuleret i to arter, desto længere tid er der gået, siden deres sidste fælles forfader levede. Brugen af det molekylære ur har dog nogle udfordringer, herunder variabilitet i mutationsrater og kompleksiteten i organismers evolutionære historie.

Det molekylære ur har alligevel bidraget til vores forståelse af arternes oprindelse, udbredelse og diversitet. Tilgangen bruges også til at studere migrationsmønstre, biogeografi og evolutionære tilpasninger i forskellige økosystemer. Sammenfattende giver det molekylære ur forskere værdifuld indsigt i evolutionære processer og sammenhængen mellem forskellige arter gennem tid. Denne tilgang har revolutioneret forståelsen af biodiversitetens udvikling og givet et dybere indblik i vores planets biologiske historie.

vores familie? En af de fremherskende teorier er, at vi faktisk slet ikke domesticerede ulvene, men at de domesticerede sig selv. Det kan ifølge nogle forskere være sket, i takt med at vi mennesker blev mere fastboende. Måske begyndte de mere "venlige" eller "tamme" ulve at hænge ud i nærheden af mennesker, fordi der ofte var rester, som de kunne spise. Med tiden kan det have ledt til et tættere og tættere forhold, indtil ulvene flyttede helt ind i vores hjem og blev til hunde og en del af vores familie.

Det er selvfølgelige også en mulighed, at vores forfædre har fundet/taget ulveunger fra deres moder og opfostret dem selv med det formål at have dem til beskyttelse eller jagt – eller begge dele. Et stort rovdyr i midten af en bosættelse har med garanti været effektivt til at holde andre dyr og måske også mennesker væk eller i hvert fald advare om, at de kommer. Måske har vi i den sammenhæng udvalgt ulve/hunde med mere runde ører, kortere snuder, større øjne og bredere hoveder – fordi de ser mere nuttede ud og ikke i samme grad ligner den frygtede ulv. Forskere kalder da også disse træk for pædomorfe træk, altså "barnlige" træk.

Forskere fra Københavns Universitet har også fremlagt den teori, at deling af tarmbakterier kan have spillet en stor rolle i domesticeringen af ulven. Tanken er den, at i takt med at ulvene spiste den samme mad som os, ændrede det deres tarmmikrobiom, hvilket kan have ledt til ændringer i adfærd og fremmet domesticeringsprocessen.

»Hvad der skete dengang for mange tusinder af år siden, er et stort åbent spørgsmål, som vi ikke har kunnet svare på endnu. Men det er klart, at når vi får et bedre overblik over tidspunktet i historien, kan vi

DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

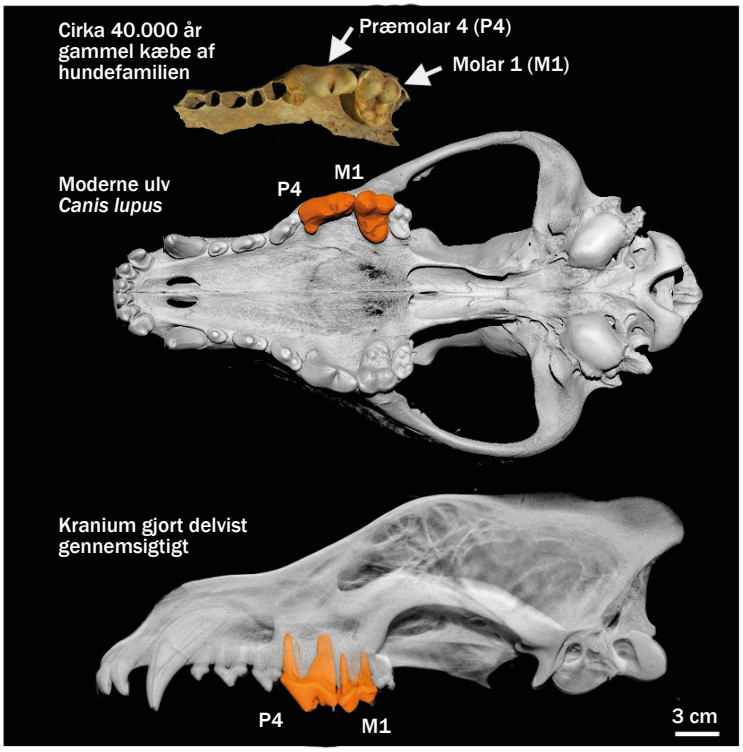
komme nærmere et svar. Viser det sig, at ulven blev domesticeret for 40.000 år siden, er scenariet et andet, end hvis ulven blev domesticeret for 15.000 år siden. For 15.000 år siden var de første permanente bopladser grundlagt, mens vi for 40.000 år siden stadig levede som jæger-samlere,« forklarer Christy Hipsley.

Hjernen sladrer om adfærd

I forskningsarbejdet har Christy Hipsley indhentet hundredvis af CT-skanninger af bevarede kranier fra hunde, protohunde og ulve i høj opløsning. Kranier er heldigvis nemme at arbejde med, fordi de ofte er meget robuste og derved ikke går i stykker, men bevarer formen over tusinder af år. Mange af de kranier, som Christy Hipsley allerede har skannet, indeholder endda også DNA, så det i tillæg har været muligt at lave den genetiske kortlægning og koble genetik til morfologi på individuelt plan. Ydermere er det veldokumenteret, hvor de forskellige kranier er fundet.

Alt sammen betyder, at forskerne kan se, hvordan genetiske ændringer bliver afspejlet i morfologien, og sammenholde det med findestedet og den historiske kontekst. Skanningerne af kranierne kan forskerne også bruge til at bestemme størrelsen og formen på hjernen og blandt andet se, om nogle områder af hjernen med særlig rolle for eksempelvis lugtesansen har ændret sig over tid.

»Vi kender allerede rigtig meget hundes adfærd og dens udspring i hjernen. For eksempel lyser bestemte områder af hjernen op på en skanning, når man viser en hund et billede af sin ejer eller et blodigt stykke kød. Vi kan ved at CT-skanne kranierne se, hvilke områder af hjernen der har ændret sig i forhold til specifik adfærd. Vi kan i generne også se, om de hunde, som levede for tusinder af år siden, har haft eller manglet gener for specifik adfærd, som vi kender fra hunde eller ulve i dag,« siger Christy Hipsley.



Øverst ses en cirka 40.000 år gammel kæbestump fra et eksemplar af hundefamilien. Med en digital tilgang kan individuelle elementer som de to bevarede kindtænder i kæbestumpen virtuelt udtrækkes fra et CT-scan af hele kranier af moderne ulve og analyseres separat. Det kan hjælpe med at afgøre, hvor nøjagtigt netop disse elementer afspejler slægtskabet.

Vil lave ét stort stamtræ over alle hunde

Selvom hovedformålet med forskningsarbejdet er at blive klogere på hundens oprindelse, kan projektet kaste meget mere af sig, fortæller Christy Hipsley. Som eksempel har ulve igen fundet vej til Danmark og har bosat sig her i landet for første gang i mere end 200 år. Et af de nærliggende spørgsmål er derfor, om ulvene rent faktisk tilhører de samme ulve, som levede i Danmark, inden vi jagede dem til udryddelse, eller om de stammer fra et helt andet sted. Svaret på dette spørgsmål kan spille ind i debatten om, hvorvidt ulvene hører til her eller skal betragtes som en invasiv art. Faktisk viser forskning fra Københavns Universitet, at de ulve, som i dag lever i dele af Jylland, ikke har meget til fælles med de ulve, som blev udryddet i Danmark for mere end 200 år siden. De ulve, som er kommet til landet i dag, er beslægtet med ulve, der lever i Polen.

Noget andet, som Christy Hipsley gerne vil have ud af forskningsarbejdet, er en interaktiv database, hvori folk kan blive klogere på deres hunds stamtræ. Tanken er den, at det skal være muligt med databasen at se, hvordan de enkelte racer er forbundet i stamtræet, og hvordan de har udviklet sig gennem menneskets historie. Det er også tanken, at folk selv skal kunne få gensekventeret deres hunds DNA og derved bidrage til databasen med genetisk information.

»Hvis vi kobler det til for eksempel adfærdsundersøgelser, kan vi komme tættere på at forstå, hvordan hundes morfologi og genetik er relateret til deres adfærd. Derved vil det også blive muligt at få en dybere indsigt i, hvordan hunde opførte sig for tusinder af år siden. Det vil gøre os klogere på, hvilken funktion de tjente i samfundet og som menneskets bedste ven,« siger Christy Hipsley. ■

Videre læsning:
Pontus Skoglund, Erik Ersmark, Eleftheria Palkopoulou & Love Dalén: *Ancient Wolf Genome Reveals an Early Divergence of Domestic Dog Ancestors and Admixture into High-Latitude Breeds.* Current Biology: Volume 25, Issue 11, 1 June 2015, Pages 1515-1519.
Open acces: www.cell.com/fulltext/S0960-9822(15)00432-7.

DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

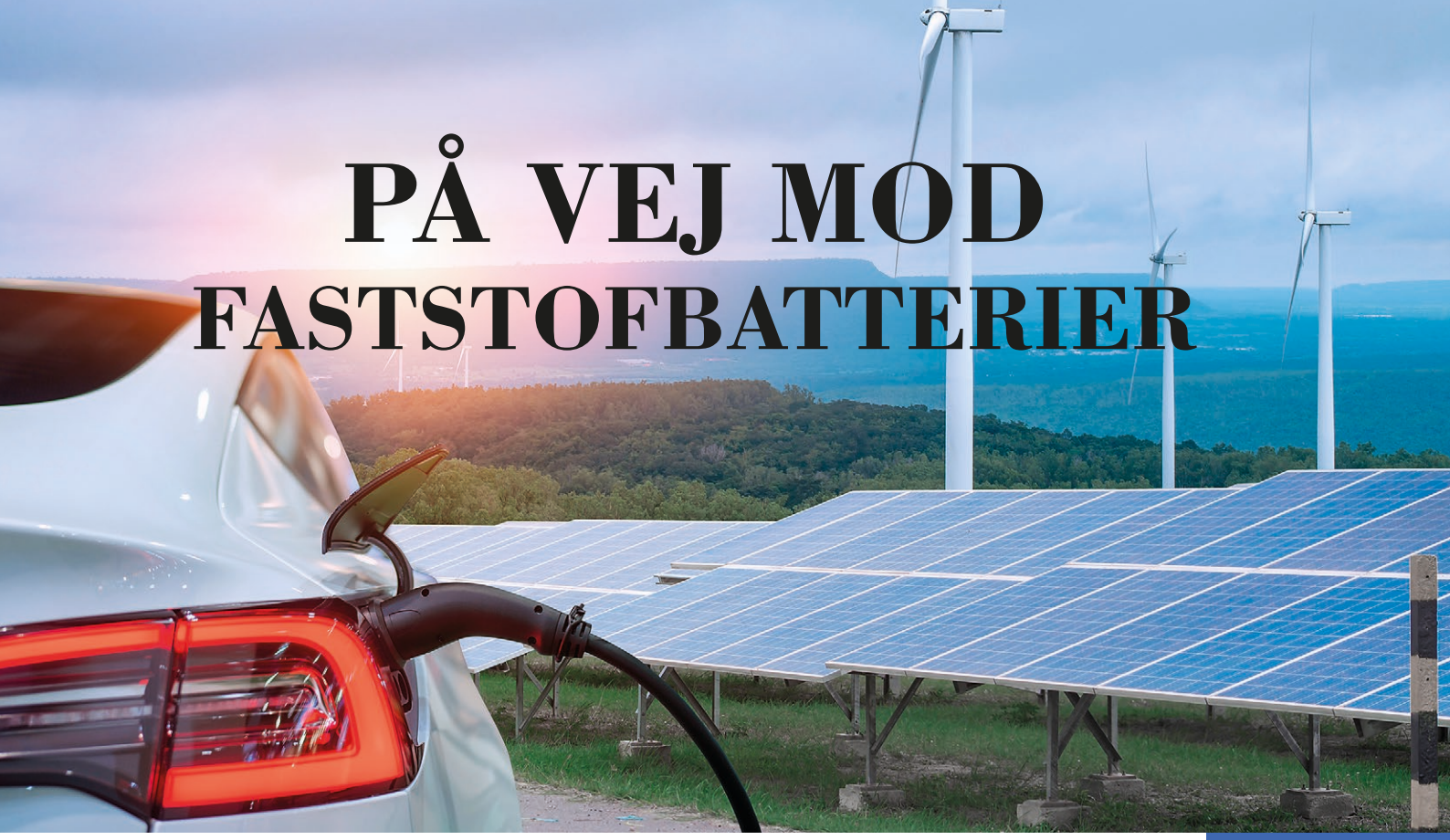
HAR DU ELEVER, DER SKAL UDFORDRES?

De kan lave deres SRP- eller SOP-forsøg ved Aarhus Universitet

Læs mere om mulighederne på
nat.au.dk/SRP og
agro.au.dk/SRP

AARHUS UNIVERSITET

SOLIDUM PETIT IN PROFUNDIS · UNIVERSITAS ARHUSIENSIS



PÅ VEJ MOD FASTSTOFBATTERIER

I fremtidens grønne energisystem bliver der brug for nye typer af batterier, der kan imødegå begrænsningerne i det traditionelle litium-ion-batteri. Et lovende bud er faststofbatterier, og opdagelsen af nye mekanismer, der skaber god ledningsevne i uorganiske stoffer, kan hjælpe udviklingen på vej.

I den grønne omstilling spiller batterier en væsentlig rolle, fordi de tilbyder en mulighed for at lagre og udnytte den elektriske strøm, der bliver produceret af solceller og vindmøller, til mange forskellige formål – ikke mindst i elbiler. Mange mener, at det litium-ion-batteri, vi kender i dag, er tæt på fuldt optimeret, og at energiindhold, effekt osv. næppe kan forbedres væsentligt. Derfor forskes der intenst i at udvikle helt nye typer af batterier. En lovende type er faststofbatterier, der er opbygget udelukkende af faste, uorganiske materialer og gerne baseret på divalente metaller som magnesium og calcium.

Fordele ved faststofbatterier

Et faststofbatteri består i lighed med et traditionelt litium-ion-batteri af to elektroder (kaldet anode og katode) samt en elektrolyt. Elektroderne kan forbindes med en ledning, så man kan udnytte den strøm, der dannes. Et faststofbatteri adskiller sig fra litium-ion-batterier ved, at elektrolytten er et fast stof. Elektrolytten tillader kun kationer såsom litium (Li^+), natrium (Na^+) eller magnesium (Mg^{2+}) at trænge igennem, mens elektroner ikke kan passere. Elektrolytten er altså en elektrisk isolator.

I et litium-ion-batteri består elektrolytten af organisk væske eller polymer samt et litiumsalt, typisk $LiPF_6$. De organiske opløsningsmidler udgør en risiko, da de er brandfarlige. I et faststofbatteri fungerer elektrolytten desuden som en fysisk separator mellem elektroderne, så batteriet ikke kortslutter, mens man i et litium-ion-batteri skal indsætte en semipermeabel plastikmembran for at undgå dette. En elektrolyt af uorganisk faststof kan ofte fungere stabilt i et større temperaturområde end en organisk væske.

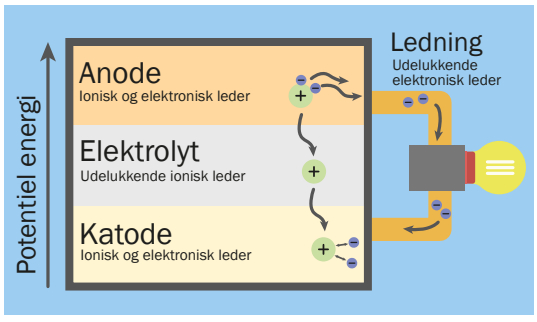


Illustration: Lasse G. Kristensen

Et batteri består af en anode og en katode, som ikke er i elektrisk kontakt med hinanden. Der sker oxidation ved anoden og reduktion ved katoden under afladning.

Om forfatterne:
Mads B. Amdisen er postdoc og forsker i detaljeret undersøgelse af struktur og egenskaber med neutronstråling.

Ph.d.-studerende Therese S. S. Kjær og Lasse G. Kristensen udvikler nye materialer til calciumbatterier.

Jakob B. Grinderslev er postdoc og ekspert i syntese og strukturundersøgelse af nye borholdige forbindelser.

Lasse N. Skov er postdoc og ekspert i elektrokemi og udvikling af nye faststofbattericeller.

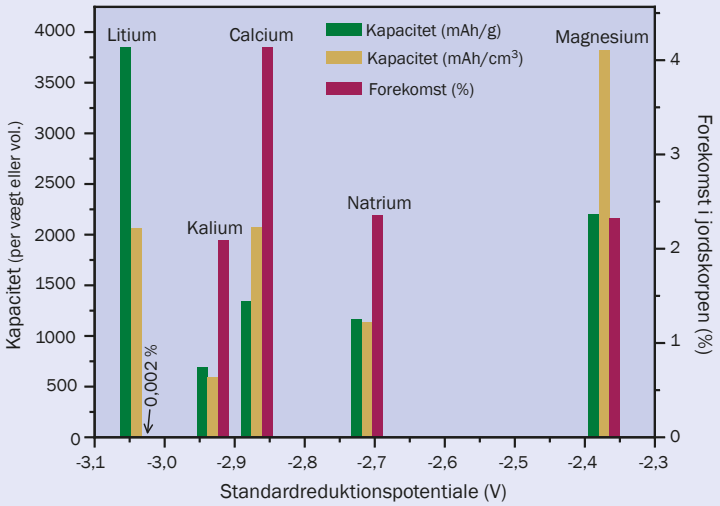
Torben R. Jensen er professor og leder forskningsgruppen. Han fokuserer på forskning i nye metalhydrider og har tidligere skrevet en doktorafhandling om nanomaterialer til hydrogenopbevaring.

Alle arbejder ved Institut for Kemi og det Interdisciplinære Nanoscience Center (iNANO) ved Aarhus Universitet.

Forskningen beskrevet i artiklen er støttet med bevillinger fra VILLUM FONDEN, Uddannelses- og Forskningsministeriet (igennem SMART Lighthouse) samt Danmarks Frie Forskningsfond.

Metaller og energiindhold

Figuren viser energikapaciteten per vægt (grøn søjle) og per rumfang (gul søjle) af forskellige metaller samt, hvor stor andel disse udgør i vægtprocent af jordskorpen (rød søjle). Litium forekommer i økonomisk interessante mængder få steder på jorden, hvorimod natrium (Na), magnesium (Mg) og calcium (Ca) findes nærmest overalt. Metallerne er ordnet på 1.-aksen efter deres standardreduktionspotentialer. Jo mere negativt, det er, jo større kan energiindholdet i batteriet blive. Bemærk også, at Mg og Ca bærer to elektroner og Li og Na kun én.



Årsagen til den forskningsmæssige interesse i faststofbatterier er, at man forventer, at de i forhold til traditionelle litium-ion-batterier kan være mere sikre (dvs. mindre brandfarlige), have en længere levetid samt højere energitæthed, da en faststofelektrolyt kan tillade brugen af en metalanode. En elektrolyt af organisk væske er ikke kompatibel med en litium-metalanode, fordi der kan dannes nåleformede litiumkrystaller, som kan kortslutte batteriet. Derfor bruges grafit som anode i litium-ion-batterier. Det giver batteriet stor stabilitet, men lille energiindhold.

Nye opdagelser baner vejen for nye elektrolytter

I processen med at udvikle nye typer af batterier er det væsentligt, at disse bliver baseret på råstoffer, der er let tilgængelige, samt at tænke i genanvendelse. En fordel ved det velkendte blybatteri er, at det er let at skille ad og genbruge komponenterne. Det forholder sig lige modsat med Li-ion-batteriet, der er meget vanskeligt at genbruge. Hvis nye typer batterier skal være mere bæredygtige er det derfor meget vigtigt at de har lukkede materialekredsløb, hvor alt kan genbruges.

I forhold til tilgængeligheden af råstoffer, så findes der langt mindre tilgængeligt litium i jordskorpen end for eksempel natrium, magnesium eller calcium, som også geografisk er meget mere velfordelt (se boks). Litium udvindes primært i Kina, Chile og Australien, og det er en udfordring i forhold til de politisk-strategiske ambitioner om "lokal" batteriproduktion i Norden og i Europa.

En af de største udfordringer ved at udvikle helt nye faststofbatterier har længe været at designe og fremstille nye kemiske stoffer til elektrolytter med høj ionledningsevne ved stuetemperatur, som samtidig er en isolator for elektrisk strøm. Denne opgave er overkommelig for monovalente kationer som Li^+ og Na^+, men ekstremt vanskeligt for divalente kationer som Mg^{2+} og Ca^{2+}, fordi de binder sig stærkere til omgivelserne.

I vores forskningsgruppe ved Institut for Kemi og iNANO, Aarhus Universitet har vi knækket koden ved at opdage nye strukturelle og fysiske fænomener, der skaber høj ionledningsevne. Det har vi udnyttet til at designe adskillige nye kemiske forbindelser, der leder kationer med en ny mekanisme, der ikke tidligere er beskrevet, og som virker både på det atomare niveau og på nanometer-skala. Med disse nye stoffer har vi sat nye standarder og flere verdensrekorder for di- og trivalente kationer og skabt basis for en metodik til rationelt design af elektrolytter til brug i faststofbatterier.

Fleksibel struktur giver høj ledningsevne

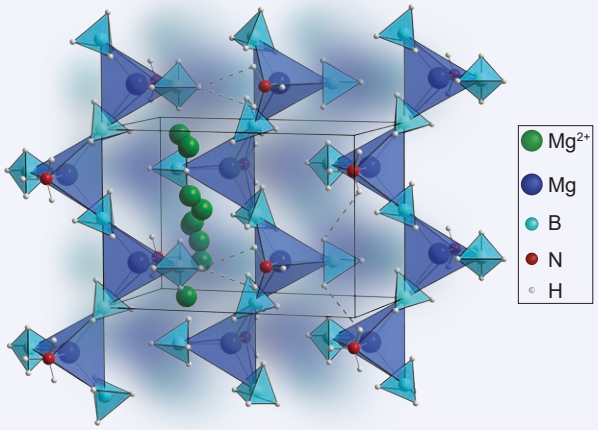
Vores opdagelse tager udgangspunkt i et nyt uorganisk stof, vi har lavet, som har den kemiske sammensætning $Mg(BH_4)_2 \cdot NH_3$. Det er et fast, krystallinsk stof med en lagdelt, fleksibel struktur. Den fleksible struktur skyldes, at strukturen er holdt sammen af svage di-hydrogen-bindinger imellem ammoniak-molekyler (NH_3) med delvist positivt ladede hydrogenatomer og borhydrid-komplekser (BH_4^-) med delvist negativt ladede hydrogenatomer.

Dette uorganiske, krystallinske stof har vist sig at have en meget høj ledningsevne for magnesiumioner. Det skyldes en hidtil ukendt mekanisme, hvor neutrale molekyler (her NH_3) hjælper Mg^{2+} igennem det faste stof. Det skyldes også, at strukturen er fleksibel, fordi den er holdt sammen af svage dihydrogenbindinger. Der er således tale om en generel mekanisme, der virker i en lang række stoffer med en tilsvarende struktur.

Den næste interessante opdagelse er, at vi kan øge kationledningsevnen betydeligt (ofte mere end 100 gange), når vi laver blandinger (kompositter) af to næsten ens udgaver af denne type uorganiske, krystallinske forbindelser. Det gælder for eksempel $Mg(BH_4)_2 \cdot NH_3$ og $Mg(BH_4)_2 \cdot 2NH_3$, hvor forskellen altså er et ekstra ammoniakmole-

Struktur af nye stoffer med høj ionledningsevne

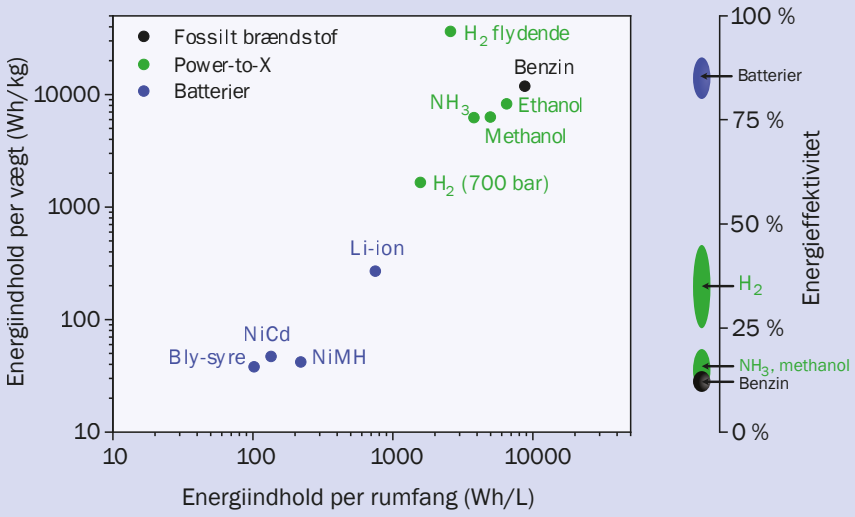
Figuren viser strukturen af den nye uorganiske forbindelse $Mg(BH_4)_2 \cdot NH_3$ (den indtegnede kasse viser "enhedscellen" dvs. den grundstruktur, der gentages i det krystallinske materiale). Denne forbindelse leder kationer med en ny mekanisme, der ikke tidligere er beskrevet, hvor neutrale molekyler (her NH_3) hjælper med at føre Mg^{2+} igennem det faste stof. Forbindelsen har en lagdelt struktur, idet de enkelte kæder i strukturen holdes sammen af svage dihydrogenbindinger, der opstår fordi delvist positivt ladede hydrogenatomer på ammoniakmolekyler (NH_3) binder sig til delvist negativt ladede hydrogenatomer på borhydrid-komplekser (BH_4^-). Der er vist nogle eksempler på sådanne dihydrogenbindinger som stiplede linjer på figuren. De svage dihydrogenbindinger gør strukturen meget fleksibel, hvilket gør det muligt for kationer (Mg^{2+}) at trænge igennem, og de er vist som grønne kugler på figuren. Dihydrogenbindingerne har i øvrigt samme bindingslængde (cirka 0,2 nm) og bindingsstyrke (cirka 20 kJ/mol) som de svage hydrogenbindinger, der findes i alt biologisk materiale som proteiner og membraner, og som er med til at give en fleksibel struktur. Ved Institut for Kemi og iNANO, Aarhus Universitet har vi lavet en række andre lignende nye kemiske forbindelser med meget høj kationledningsevne. De har det tilfælles, at man kan lave blandinger af dem, som har lave smeltepunkter. Disse blandinger kan stabiliseres med ikke-reaktive og elektrisk isolerende nanopartikler såsom MgO eller Al_2O_3.



$Mg(BH_4)_2 \cdot NH_3$

Energiindhold og energieffektivitet

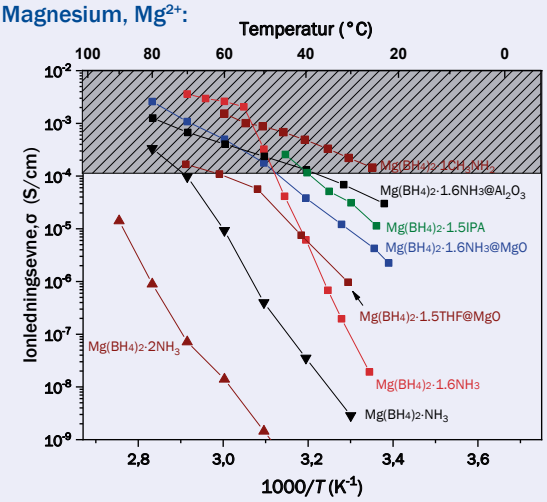
Fossilt brændstof i form af kul, olie og naturgas er et enormt effektivt energilager, som er nemt at opbevare og transportere og har ekstremt højt energiindhold. Desuden får vi fossilt brændstof foræret fra naturen, og kun en mindre del af det samlede energiindhold forbruges til at grave eller pumpe det op af undergrunden og til raffinering til benzin, diesel, flybrændstof osv. Disse favorable egenskaber ved fossile brændsler gør det til en stor udfordring at erstatte det carbon-baserede energisystem med et "grønt" energisystem baseret på for eksempel sol- og vindenergi. Figuren viser energiindholdet per vægt som funktion af energiindholdet per rumfang for fossilt brændstof, batterier og kemikalier dannet ved Power-to-X-teknologi. Læg mærke til, at akserne er på logaritmisk skala, så batterier har næsten 100 gange mindre energiindhold end benzin. På aksen til højre er energieffektiviteten for de forskellige typer af energilagre estimeret. Fx er energieffektiviteten for benzin lav, fordi vi bruger en forbrændingsmotor. Den er højere for hydrogen, fordi man kan bruge en brændselscelle. Energieffektiviteten for power-to-X er estimeret.



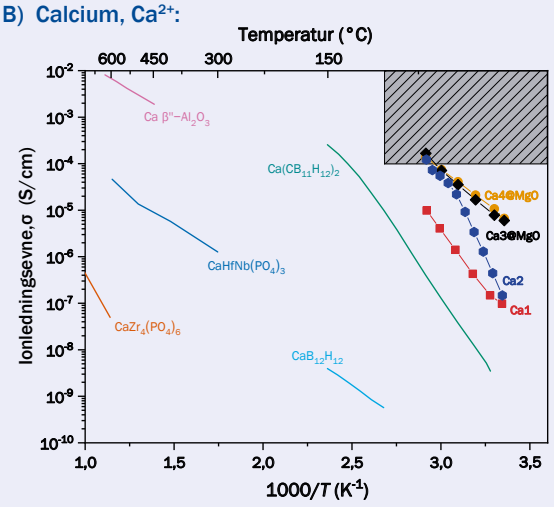
kyle på den ene forbindelse.

Ulempen ved sådanne blandinger i forhold til at anvende dem i batterier er, at kompositter ofte har et lavere smeltepunkt end de rene stoffer. Det er også tilfældet her, idet en 1:1-blanding af de to nævnte stoffer smelter ved 55 °C, mens de rene stoffer smelter ved cirka 100 °C, hvilket ikke er ideelt i forhold til anvendelse i batterier. Men den udfordring har vi også fundet en løsning på: Nemlig at tilsætte nano-partikler (af for eksempel magnesiumoxid) med stort overfladeareal til blandingen. Dette giver mekanisk stabilisering af materialet.

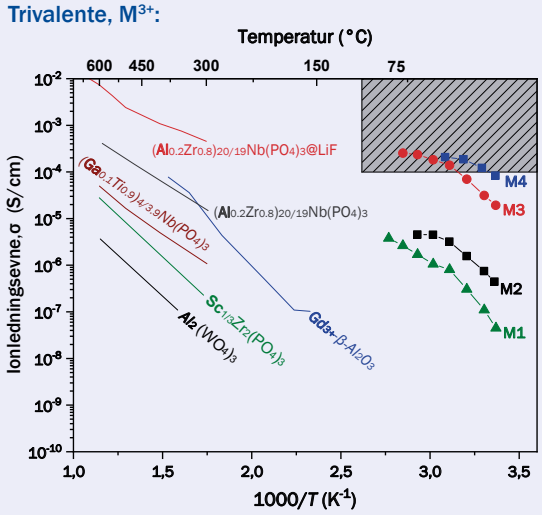
A) Magnesium, Mg^{2+}:



B) Calcium, Ca^{2+}:



C) Trivalente, M^{3+}:



De tre figurer viser kationledningsevnen for nye (**A**) magnesium (Mg^{2+}), (**B**) calcium (Ca^{2+}) og (**C**) trivalente (M^{3+}) kationledere som funktion af temperaturen. De grå skraverede områder angiver ledningsevne og temperaturområde, hvor det er realistisk at lave et faststofbatteri, der kan anvendes ved moderat temperatur.

Bemærk, at ledningsevne, σ, som regel angives med en logaritmisk 2.-akse og som funktion af reciprok temperatur ($1/T$). Hvis det bliver en ret linje, så følger ledningsevnen Arrhenius lov, $\ln(\sigma) = \ln A - E_A / RT$, og det betyder ofte, at der kun er én mekanisme for kationledningen i dette temperaturområde. Hældningen af linjen angiver aktiveringenergien, E_A, for processen. Man kan ikke tage logaritmen til en fysisk enhed, så ln(σ) er enhedsløs, og hældningen af linjen, E_A, får enheden J/mol, da gaskonstanten R har enheden J/(mol·K). Jo mindre aktiveringsenergien er, jo mere vandret er linjen, og det giver højere kationledningsevne ved lavere temperaturer. Det kan gøre det muligt at lave en nye type batteri, der både virker ved stuetemperatur og i frostvejr på en vinterdag. På 2.-aksen står S for den afledte SI-enhed siemens, som er det samme som $S = \text{ohm}^{-1} = \Omega^{-1}$.

Data angivet som punkter er målt på Institut for Kemi og iNANO i tre igangværende forskningsprojekter, og data angivet som streger er fundet i den kemiske litteratur. Særligt ledningsevnen for calcium og trivalente ioner (M^{3+}) adskiller sig ved at være ekstremt høj ved meget lavere temperaturer sammenlignet med alle andre kendte forbindelser. Figur (A) og (B) indeholder også data for nye nano-kompositter, som indeholder nanopartikler af magnesiumoxid (MgO) eller aluminiumoxid (Al_2O_3). Læg mærke til, at de nye kemiske forbindelser udviklet i Aarhus har langt højere kationledningsevne i et relevant temperaturområde end andre kendte stoffer, og de er også elektrisk isolerende.

Rationelt design af nye elektrolytter

Med disse tre trin: 1) design af en uorganisk, krystallinsk forbindelse med god ledningsevne, 2) dannelse af kompositter ud fra disse og 3) stabilisering af kompositterne ved hjælp af nanopartikler har vi nu en systematisk metodik til at udvikle nye interessante materialer til brug i faststofbatterier.

Fordelene ved vores nye nano-komposit-materialer er, at de har ekstremt høj kationledningsevne ved moderat temperatur, meget høj mekanisk stabilitet og forbedret termisk stabilitet i forhold til de rene stoffer.

Det er også lykkedes os at lave et nyt magnesiumbatteri med en af de nye nano-kompositter. I dette batteri består elektrolytten af en komposit, der er en blanding af de to kemiske forbindelser $Mg(BH_4)_2$ og NH_3 i forholdet 1:1,6 og stabiliseret med nanopartikler af magnesiumoxid (MgO). Batteriets anode består af metallisk magnesium, mens katoden består af $Mg_{0,2}TiS_2$, hvor mængden af Mg^{2+} ændres ved opladning og afladning. Batteriets spænding er på 1,2 V, og det kan oplades og aflades 60 gange. Vi forventer, at vi med yderligere optimering – for eksempel af grænsefladen mellem elektrolytten og anode/katode – kan forbedre batteriets energiindhold og levetid betydeligt.

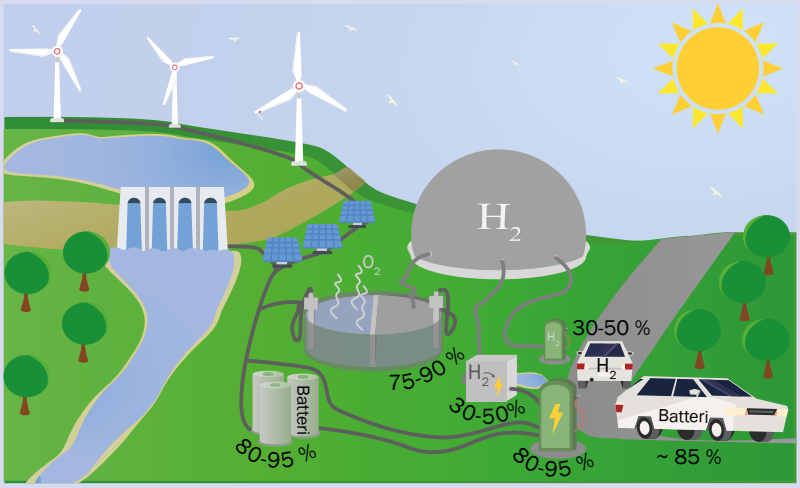
Faststof-magnesium-batterier lavet af uorganiske stoffer findes der meget få af i verden, og vores forskning viser således, at det ud fra grundlæggende kemisk forståelse er muligt at designe helt nye funktionelle materialer, som kan danne grundlag for helt nye faststofbatterier.

Batterier og energieffektivitet

Interessen i nye batterityper er som allerede antydet drevet af behovet for at erstatte vores afhængighed af fossile brændstoffer med noget mere bæredygtigt. Fossilt brændstof har så højt energiindhold, at

Opbevaring af vedvarende energi og energitab

Figuren illustrerer, hvordan "grøn" strøm fra sol- og vindenergi samt vandkraft kan udnyttes på forskellig vis, og hvor effektivt det kan gøres med dagens teknologi.



En af de mest grundlæggende naturlove, *termodynamikkens anden hovedsætning*, indebærer, at hver gang vi omdanner energi fra en form til en anden, så mister vi noget energi i form af varme. Det forklarer, at vi ikke kan lave en evighedsmaskine, fordi der aldrig er noget, der er 100 % effektivt. Alene ved genopladning af et litium-ion-bilbatteri mister man således 5-20 % af den tilførte strøm, som omdannes til varme. Når man kører mistes også energi i form af varme ved frigivelse af strøm fra batteriet og omdannelse til mekanisk energi via en elmotor. Hvis vi i stedet ser på energiforbrug per kørt kilometer, og antager, at en elbils og en benzinbils energiforbrug er hhv. 160 Wh/km og 20 km/l benzin, så er elbilen ca. 2,5 gange mere energieffektiv end benzinbilen.

En bil kan også køre på dihydrogen (H_2), som man kan producere ved elektrolyse, hvor man spalter vand til hydrogen og oxygen med en effektivitet på 75 til 90 %. Hydrogen kan så efterfølgende omdannes til strøm i en brændselscelle med en effektivitet på 30 til 50 %. Den resterende energi bliver til varme, som kan bruges til opvarmning af bilen om vinteren.

Spaltning af vand til hydrogen og oxygen er udgangspunktet for såkaldt Power-to-X, idet den fremstillede dihydrogen kan anvendes til produktion af ammoniak (NH_3), methanol (CH_3OH) eller metan (CH_4). De ekstra procestrin medfører yderligere energitab, hvorfor det er mindre energieffektivt at producere disse end ren hydrogen. Ydermere har udnyttelsen af disse kemikalier også lav effektivitet, hvis de forbrændes i en forbrændingsmotor eller spaltes tilbage til hydrogen, som så kan bruges i en brændselscelle.

vi har tilladt os at behandle det på en ineffektiv måde. Vi brænder det bare af og omdanner det herved til varme, som er kendt som den ringeste af alle energiformer. Sagt på en anden måde forsvinder varme let "ud mellem fingrene" på os, og den er vanskelig at opbevare og omdanne på en effektiv måde til energiformer af højere kvalitet, såsom strøm. Et kraftværk omdanner således kemisk energi i fossilt brændsel til varme og videre til strøm via en dampturbine med en effektivitet på 30-40 %. Et dansk kraftvarmeværk udnytter overskudsvarme fra processen til fjernvarme, så energieffektiviteten måske kommer op på ca. 90 %.

Hvis man sammenligner energiindholdet i kendte batterier med for eksempel benzin, så er det cirka 100 gange mindre. Det er også meget mindre end i kemiske stoffer, man vil lave med "power-to-X"- teknologi, dvs. ammoniak (NH_3), methanol (CH_3OH) og hydrogen (H_2). Fordelen ved power-to-X-kemikalier er, at der kan transporteres og langtidsopbevares langt større energimængder som kemisk energi sammenlignet med strøm i et batteri, som også kan gå tabt over tid ved selvafladning.

Hvis man i stedet ser på energieffektiviteten ved forskellige udnyttelser af "grøn" vedvarende strøm fra vind eller sol, så har batterier en markant højere energieffektivitet end alle andre måder at udnytte strøm på. Hydrogen kan fremstilles med en effektivitet på 75–90 %, men det er kun 30–50 % af den kemiske energi, der kan omdannes tilbage til strøm i en brændselscelle. Andre power-to-X-kemikalier kan fremstilles fra hydrogen, men der er flere trin i disse processer, og derfor også større energitab. Brænder man dem efterfølgende af i en forbrændingsmotor, er der lille energieffektivitet, dvs. en stor del af den kemiske energi går tabt som varme. Man kan spalte ammoniak tilbage til hydrogen, men det koster også energi.

Batterier i fremtidens energiforsyning

Konklusionen af disse energiovervejelser er nok, at vi aldrig finder én løsning, der kan erstatte benzin, diesel og andet fossilt brændstof, men at vi skal vænne os til en række forskellige løsninger, der hver især har fordele og ulemper. Vi skal også gøre os klart, at vi ikke har uendelige mængder af vedvarende energi fra sol og vind til rådighed, og at disse energistrømme varierer meget, både over året og på døgnbasis. Derfor er det vigtigt at undersøge både energieffektiviteten og energiindholdet af nye energisystemer og at udvikle nye metoder til energiopbevaring til både kort og lang tid. Nye typer af faststofbatterier kan blive en vigtig komponent i fremtidens langt mere komplekse energisystemer, netop fordi batterier har den allerstørste energieffektivitet. ■

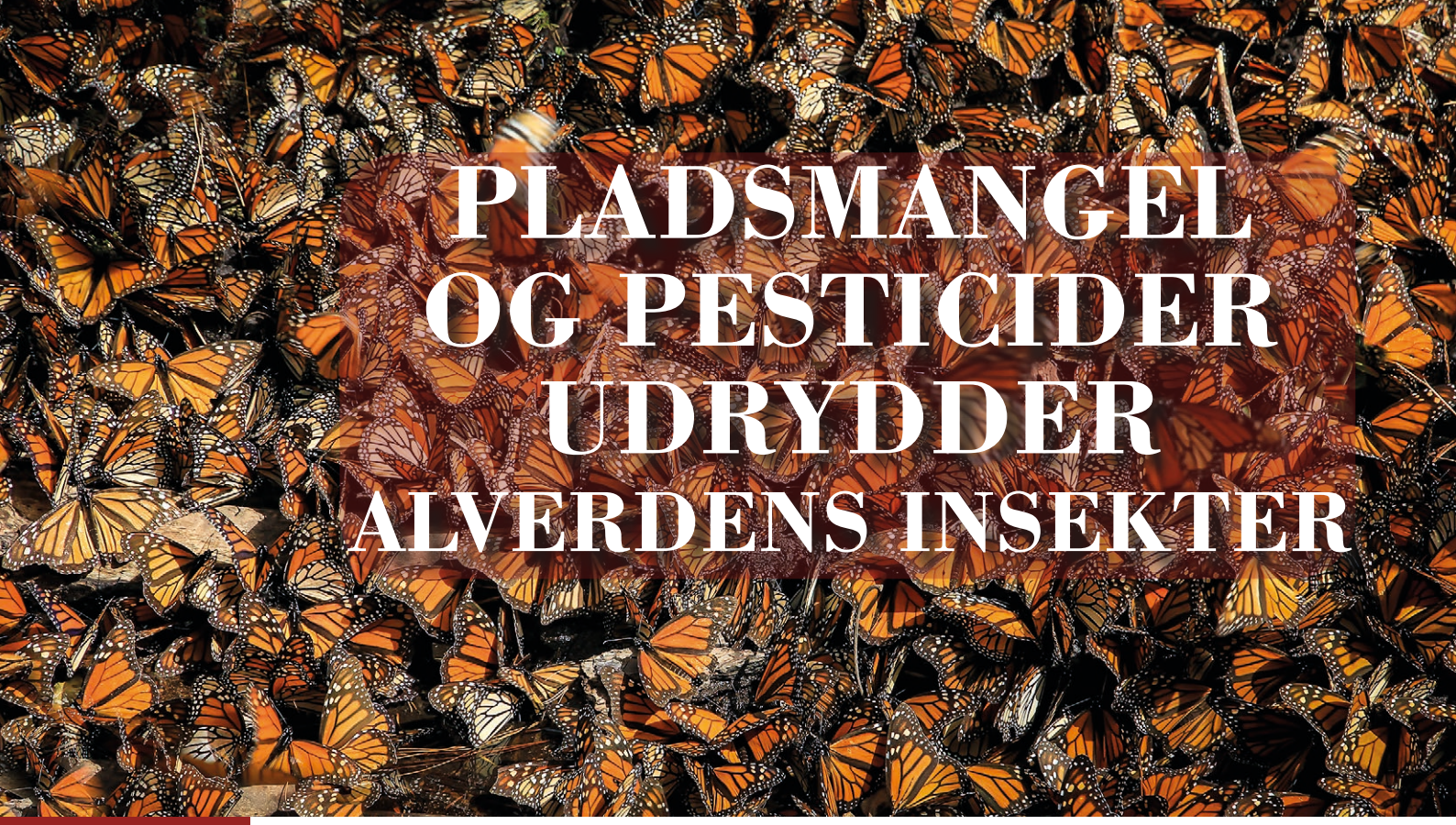
Videre læsning

Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes, for batteries, T. Famprikis, P. Canepa, J. A. Dawson, M. S. Islam, C. Masquelier, *Nature Materials*, 2019, 18, 1278–1291.

Towards Solid-State Magnesium Batteries: Ligand-Assisted Superionic Conductivity, Lasse N. Skov, Jakob B. Grinderslev, Asger Rosenkranz, Young-Su Lee, and Torben R. Jensen, *Batteries & Supercaps* 2022, 5(9), e202200163 (1 of 9). doi.org/10.1002/batt.202200163

Layered Titanium Sulfide Cathode for All-Solid-State Magnesium Batteries, Lasse N. Skov, Jakob B. Grinderslev, Torben R. Jensen, *Batteries & Supercaps*, 2023, e202300185 (1 of 7), doi.org/10.1002/batt.202300185

Methylamine Lithium Borohydride as Electrolyte for All-Solid-State Batteries, Jakob B. Grinderslev et al, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, e202203484 (1 of 7). doi.org/10.1002/anie.202203484.



PLADSMANGEL OG PESTICIDER UDRYDDER ALVERDENS INSEKTER

Talrige undersøgelser viser, at verdens insekter over en bred kam er i tilbagegang på grund af menneskets behov for plads og anvendelse af pesticider. At ændre denne udvikling kræver dybtgående forandring, mener den bogaktuelle britiske biologiprofessor Dave Goulson.

Om forfatteren

Kjeld Hansen er journalist, forfatter, foredragsholder og miljødebattør. Han holder en ringmærket unge af en vandrefalk.
kjeld@baeredygtighed.dk

Den 19. september 2023 holdt Kjeld Hansen sammen med Dave Goulson foredrag om insekternes tilbagegang, og hvad vi kan gøre for at vende udviklingen, i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab. Denne artikel er skrevet i den anledning som del af projektet *Brobygning på første række*, finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Verden over forsvinder insekterne, og det går stærkt. I de seneste 50 år er de gået tilbage med 75 procent eller mere end 1 procent om året. Om nogen har den 58-årige britiske biologiprofessor Dave Goulson set skriften på væggen, og han har samlet sin viden i bogen *Silent Earth*. Jeg har haft den ære at oversætte og forsyne bogen med danske eksempler under titlen *Den tavse klode*. Den udkom i maj måned i år på Gads Forlag.

Som forsker har Goulson altid haft en forkærlighed for humlebier, men han var også fødselshjælper for den tyske Krefeld-undersøgelse, der for alvor hejste alarmsignalerne om insekternes nedtur i oktober 2017. Det var også ham og hans studerende, som på rekordtid overbeviste Europa-Parlamentet i 2013 om et begrænset forbud og i 2018 om et totalforbud mod landbrugets nye supergifte, de såkaldte neonikotinoider. Læg dertil mere end 300 videnskabelige arbejder og et omfattende populærvidenskabeligt forfatterskab på mange sprog om insekternes store betydning.

Goulson er godt klar over, at megen videnskabelig forskning kun bliver læst af andre videnskabsmænd, og at der er behov for at engagere den bredere offentlighed. Eller med hans egne ord:

»Du kan publicere eksperimenter i højkvalitetstidsskrifter igen og igen, men de bliver kun læst af et par dusin videnskabsmænd, som arbejder inden for dit felt. Det opnår lidt eller intet i den virkelige verden.«

Når Dave Goulson skriver, at snart er det sidste udkald, hvis alverdens insekter ikke skal gå tabt, så er der al mulig grund til at gribe til handling. Den videnskabelige dokumentation vokser sig stærkere for hvert år i takt med, at flere undersøgelser publiceres, som beskriver sammenbruddet i de tidligere enorme bestande af Monark-sommerfugle i Nordamerika, decimeringen af insekterne i tyske naturreservater, og den ubønhørlige indskrænkning af insekternes levesteder overalt i verden. Alene i Danmark er der siden 1960'erne forsvundet 12 arter af dagsommerfugle svarende til omkring 10 procent af det samlede antal.

I bogens forord skriver Goulson:
»Insekternes tilbagegang er frygtelig trist for alle os, der holder af disse små skabninger og værdsætter dem for, hvad de er i sig selv, men den truer også menneskehedens livsbetingelser, fordi vi har brug for insekterne til at bestøve vores afgrøder, til at omsætte gødning, blade og døde dyr, sikre dyrkningsjordens sundhed, bekæmpe skadedyr og meget, meget mere. Mange større dyr som fugle, fisk og frøer er afhængige af insekter som føde. Vilde blomster er afhængige af dem

← Monarksommerfuglen i Nordamerika nærmer sig hastigt et vendepunkt, hvor den tidligere millionstore bestand falder under en kritisk værdi for derefter uundgåeligt at kollapse og blive udryddet. På samme måde som vandreduen kan dette engang så almindelige insekt forsvinde for altid. Årsagerne er pladsmangel, pesticider og klimaændringer.
Foto: Alex Guillaume/Unsplash.

Dave Goulsons seneste bog *Silent Earth* udkom på dansk med titlen *Den tavse klode* i maj 2023. Bogen er oversat af miljøjournalisten Kjeld Hansen og udgivet på Gads Forlag.

Dave Goulson er en ægte naturhistoriker, der lige fra barnsben har været dybt fascineret af alverdens insekter. I dag er han professor i biologi ved University of Sussex med speciale i biernes økologi. Han har publiceret mere end 300 videnskabelige artikler om økologi og bevaring af humlebier og andre insekter. Goulson grundlagde Bumblebee Conservation Trust i 2006, en nonprofitorganisation, som er vokset til 12.000 medlemmer og mere end 50 ansatte. I 2015 blev han kåret som nummer 8 på BBC Wildlife Magazines liste over de 50 mest indflydelsesrige personer indenfor naturbevaring. Pressefoto.

til bestøvning. I takt med at insekterne bliver færre, vil vores verden langsomt gå i stå, for vi kan ikke fungere uden dem. Som Rachel Carson formulerede det allerede i 1962: Mennesket er en del af naturen, og vores krig mod naturen er uundgåeligt en krig mod os selv.«

Rachel Carson var den første biolog, der advarede mod landbrugsindustriens ødelæggende sprøjtegifte med bogen *Silent Spring*, som udkom på dansk med titlen *Det tavse forår* i 1963.

I denne artikel vil jeg koncentrere mig om tre af Dave Goulsons mest alarmerende eksempler på masseudryddelsen af insekter.

Monarken i frit fald

Monarken (*Danaus plexippus*) er en betagende smuk og ikonisk sommerfugl, der findes på tværs af USA og i det sydlige Canada, men den er på vej mod udryddelse. Årsagerne til Monarksommerfuglens katastrofale tilbagegang er stort set de samme, som hærger insektbestandene over det meste af verden: Pladsmangel og pesticider.

Monarken er berømt for sine lange vandringer. Når efteråret sætter ind, flyver de østlige bestande knap 5.000 kilometer fra Canada til overvintringslokaliteter i Mexicos Sierra Madre-bjerge, mens de vestlige flyver knapt så langt til Californien, hvor der optaltes omkring 1,2 millioner overvintrende monarker i 1997, men i 2018 og 2019 var der færre end 30.000, et fald på omkring 97 procent. Den østlige bestand har klaret sig en smule bedre, men i løbet af de ti år frem til 2016 faldt antallet, der når frem til Mexico, med 80 procent.

Hvorfor? Den bratte nedgang for dette fantastiske insekt har givet ophav til en mangfoldighed af videnskabelige undersøgelser i forsøget på at udpege årsagen. Dave Goulson skriver: *»En hovedmistænkt er den stigende anvendelse af herbiciderne glyphosat og dicamba, som er muliggjort efter udviklingen af genetisk manipulerede, herbicidresistente sorter af majs og sojabønner.«*

»Skulle hele menneskeheden forsvinde, ville verden regenerere tilbage til den rige tilstand af ligevægt, der eksisterede for 10.000 år siden. Skulle insekterne forsvinde, ville miljøet kollapse i kaos.«
E.O. Wilson, amerikansk biolog. Citat fra Den Tavse Klode.

En landmand, der dyrker normale afgrøder, har ikke nemt ved at kontrollere ukrudtsplanter ved hjælp af herbicider, fordi han risikerer også at dræbe sine afgrøder. I kontrast hertil kan en landmand, der dyrker GMO-afgrøder, som er gjort resistente over for herbicidet, tæppesprøjte herbicidet direkte på afgrøderne og aflive alt ukrudt, men uden at skade afgrøderne. På den måde er det pludselig blevet muligt at dyrke afgrøder på marker, der er næsten fuldstændig fri for ukrudt.

Monarkens larver lever udelukkende på silkeplanter (*Asclepias spp.*) – på engelsk milkweeds – der tidligere var almindeligt udbredte ukrudtsplanter i landbruget. Imidlertid er forekomsten af silkeplanter i det amerikanske Midtvesten faldet med 58 procent på bare 11 år fra 1999 til 2010. Det betragtes, som den mest sandsynlige årsag til tilbagegangen for monarksommerfuglen.

Pres fra flere sider

Imidlertid antyder ny forskning fra Stanford University, at der er mere på spil. Silkeplanter forsvarer sig selv mod planteædere ved at

Over hele verden bruges der enorme mængder af pesticider hvert eneste år, og de rammer uundgåeligt insektfaunaen over en bred kam.
Foto: Peter Wiberg-Larsen.

Pesticidernes ødelæggende effekt på flora og fauna demonstreres med stor tydelighed i en konventionel dansk kartoffelmark, når denne er blevet kemisk nedvisnet som her på Falster. Intet liv anes så langt øjet rækker, og det siger sig selv, at denne form for agrovirksomhed er dybt fjendtlig overfor den generelle biodiversitet.
Foto: Kjeld Hansen.

producere giftige cardenolider – en slags steroider – der gennemvæder deres blade og saft. Monarkens larver har udviklet en tolerance over for disse kemikalier og lagrer dem selv i egen krop for at gøre sig uspiselige for rovdyr.

Cardenoliderne i larverne tjener også et andet formål, idet de hjælper med at bekæmpe en encellet parasit med det umulige navn *Ophryocystis elektroscirrha*. Uden denne hjælp ville parasitten beskadige larvens tarm og enten dræbe den, eller påvirke den så den bliver til en voksen sommerfugl med deforme vinger med kun små chancer for at overleve. Imidlertid producerer silkeplanter, der vokser i et miljø med forhøjet CO_2-niveau, mindre effektive cardenolider mod parasitten. Hertil kommer, at den mest almindeligt dyrkede silkeplanteart *Asclepias curassavica* – blodblomst, der også kan dyrkes som sommerfugleplante under danske forhold – har et højere indhold af cardenolider end de vildtvoksende nordamerikanske silkeplanter. Indholdet ligger på den øvre grænse for, hvad larverne kan tolerere, og når silkeplanten dyrkes ved en lettere forhøjet temperatur, produceres der endnu mere cardenolid, og planten bliver uspiselig selv for monarker.

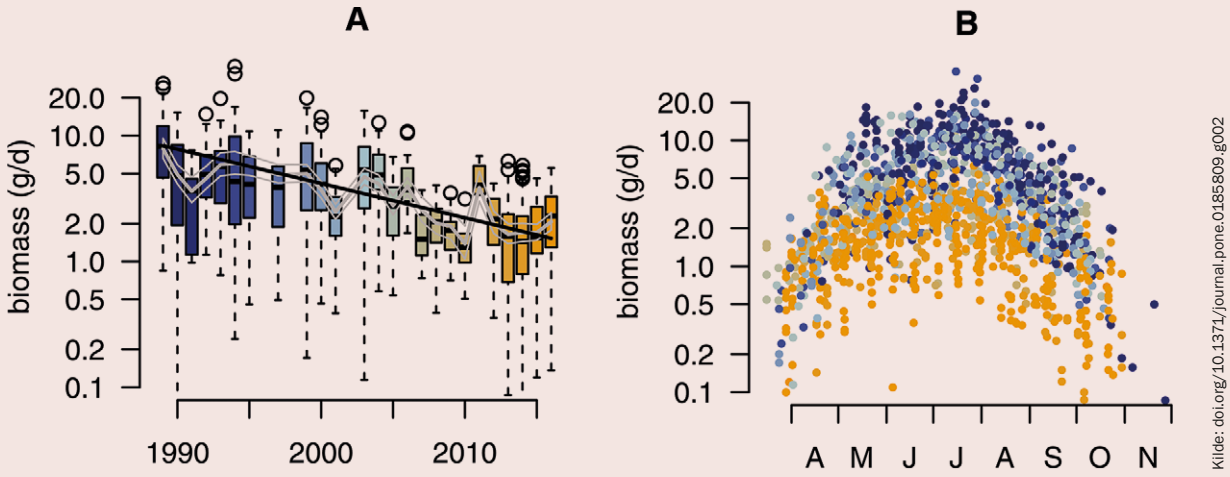
Klimaændringerne får også sommerfuglene til at sprede sig længere nordpå i Canada, og på den måde udøves der sandsynligvis en subtil indvirkning på monarken både gennem ændringer af kvaliteten af foderplanter og ved at forlænge det årlige træk. Læg dertil, at i deres overvintringsområder er alt heller ikke i orden. I Californien er tyve af monarkens overvintringspladser blevet ødelagt af menneskelige aktiviteter over bare de seneste fem år. I Sierra Madre bjergene i Mexico er overvintringsområderne nu truet af skovfældning og minedrift.

Dave Goulson konkluderer om pladsmangel, pesticider og klimaændringer, at *»det er denne kombination af faktorer, nogle åbenlyse og andre mere subtile, der driver monarkens nedtur. Adfærdsforskere, der studerer sommerfuglen, mener, at den nærmer sig et vendepunkt, hvor bestanden falder under en kritisk størrelse for derefter uundgåeligt at kollapse og blive udryddet. På samme måde som vandreduen kan dette engang så almindelige insekt forsvinde for altid.«*

Alarmerende tyske resultater

I 2015 blev Dave Goulson kontaktet af medlemmer fra Entomologischer Verein Krefeld, som er en blandet gruppe af tyske amatører og professionelle entomologer, der siden de sene 1980'ere har fanget flyvende insekter på naturreservater spredt ud over Tyskland. Gruppen havde samlet insekter i næsten 17.000 fangstdage på 63 naturlokaliteter og i 27 år med en samlet fangst på 53 kilo insekter.

Dave Goulson skriver:
»De sendte mig deres data og bad om hjælp til at få styr på dem og forberede materialet til offentliggørelse i et videnskabeligt tidsskrift. Efter at have set på tallene og plottet nogle simple grafer blev jeg i stigende grad fascineret og bekymret. Over de 27 år fra 1989 til 2016 faldt den samlede biomasse (vægten) af insekter fra deres



Kilde: doi.org/10.1371/journal.pone.0185809.g002

Medlemmerne fra Entomologischer Verein Krefeld har siden de sene 1980'ere fanget flyvende insekter i naturreservater spredt ud over Tyskland. Gruppen bad i 2015 Dave Goulson om hjælp til at forberede materialet til offentliggørelse i et videnskabeligt tidsskrift. Tallene gav anledning til stor bekymring: Over de 27 år fra 1989 til 2016 faldt den samlede biomasse (vægten) af insekter fra deres fælder med 76 procent. Omkring midsommer topper insekternes aktivitet, men her var tilbagegangen endnu mere markant med hele 82 procent.

Boxplots (A) viser fordelingen af insektbiomasse (gram pr. dag) samlet over alle fælder og fangster i hvert år (n = 1503). Den grå linje viser den tilpassede middelværdi under hensyntagen til vejr-, landskabs- og habitateffekter. Den sorte linje viser den gennemsnitlige tendens som estimeret med den grundlæggende model.
Til højre (B) ses sæsonfordelingen af insektbiomassen, hvor fangsterne midt på sommeren viser de største fald. Farvegradient i begge paneler spænder fra 1989 (blå) til 2016 (orange).

fælder med 76 procent. Omkring midsommer topper insekternes aktivitet, men her var tilbagegangen endnu mere markant med hele 82 procent. Jeg tænkte i begyndelsen, at der måtte være en eller anden fejl, fordi nedgangen var alt for dramatisk til at være troværdig.«

Men det var ingen fejl. Tre fjerdedele af flyvende insekter i de tyske naturreservater var forsvundet på bare 27 år, og det antydede en hastighed og skala for nedgangen, som ingen tidligere havde forestillet sig. Entomologerne fik skrevet en afhandling med Goulsons hjælp og forsøgte at publicere den i de mest prestigefyldte videnskabelige tidsskrifter, *Nature* og *Science*, men redaktørerne fandt ikke emnet tilstrækkelig interessant. Efter lidt shoppen omkring fik de endelig udgivet artiklen i tidsskriftet *PloS ONE*. Heldigvis blev undersøgelsen omtalt over hele verden, og den er blevet citeret flittigt lige siden.

Er de tyske resultater udtryk for en generel tendens?

Efter offentliggørelsen af Krefeld-undersøgelsen sidst på året i 2017 fulgte en anden tysk undersøgelse i oktober 2019. Tyske videnskabsfolk fra det tekniske Universitet i München havde over en tiårs periode fra 2008 til 2017 undersøgt insekterne på 150 lokaliteter med græs og 140 med skov. De havde ressourcer nok til at tælle de mere end en million insekter, der blev fanget (samt ikke-insekter som edderkopper og mejere), og til at identificere omkring 2.700 arter. I lyset af den korte tidsperiode – blot ti år – var undersøgelsens resultater dybt bekymrende, for tilbagegangen fra år til år var endnu større end i datasættet fra Krefeld.

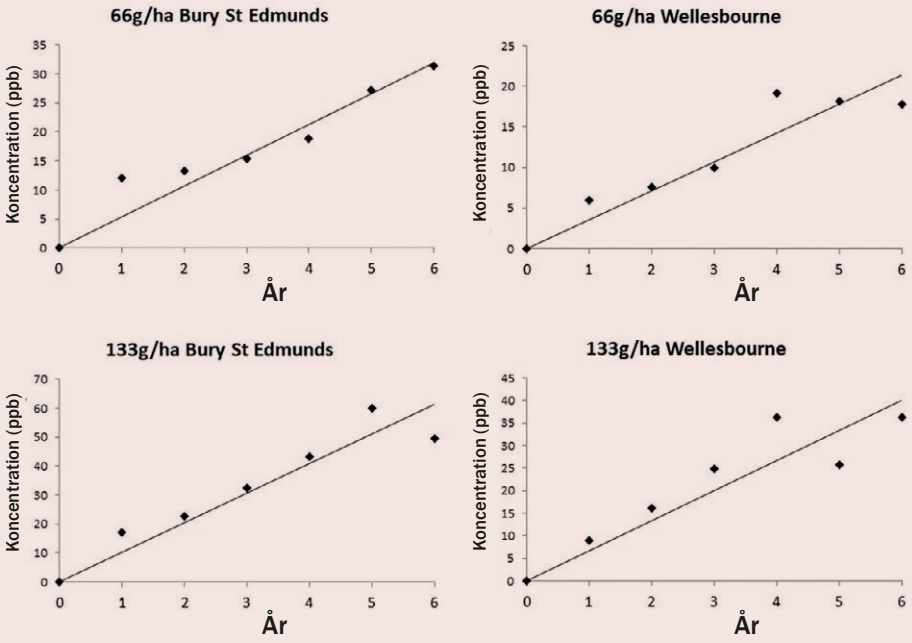
På græsland så det værst ud med et gennemsnitligt tab på to tredjedele af biomassen af leddyr (insekter, edderkopper, bænkebidere og flere andre), og med tab af en tredjedel af arterne og fire femtedele af den totale mængde. I skovene faldt biomassen med 40 procent, antallet af arter faldt med mere end en tredjedel, og den samlede hyppighed af leddyr faldt med 17 procent.

Hvad med andre steder i verden? Er det noget særlig mærkværdigt, der foregår i Tyskland? Det virkede meget usandsynligt. Dave Goulson skriver:

»Tysk arealanvendelse og landbrugspraksis er stort set den samme som i nabolandene og er i vid udstrækning reguleret af de samme love og regler, der er fælles for det meste af EU. Landbrugslandet ligner meget det i for eksempel Frankrig, og de samme pesticider er lovlige som alle andre steder. Så vidt jeg kan se, er den eneste forskel mellem Tyskland og resten af os, at tyskerne var fremsynede nok til at begynde at overvåge deres insekter, hvad vi andre ikke har gjort med undtagelse af nogle få populære insektgrupper. Derfor mangler der i stort omfang datasæt fra andre lande."

Bidød og neonikotinoider

Det tredje eksempel fra bogen handler om de supergiftige neonikotinoider, der blev markedsført fra midt i 1990'erne til brug i industrilandbrug over hele verden. Insektmidlet imidacloprid var det første produkt i den nye familie af kemikalier, der blev kaldt neonikotinoider – et navn, der ikke sagde de fleste noget dengang, men som skulle blive berygtet for dets forbindelse til især biernes nedtur. Som DDT og organofosfaterne er neonikotinoiderne nervegifte, der



Disse plots dokumenterer ophobningen over tid af neonikotinoid-insektgiften imidacloprid i markjord, hvor behandlet såsæd af vinterhvede blev udsået hvert efterår (1991-96). De to undersøgte lokaliteter ligger begge i England. Såsæden var bejdset med 66 gram eller 133 gram imidacloprid/ha undtagen i det første år, hvor der anvendtes 56 gram i Bury St Edmunds, og 112 gram i Wellesbourne.

Data er fra *EU Draft Assessment Rapport for Imidacloprid 006* og påviser ud over enhver tvivl, at niveauerne af kemikaliet ophobes over tid. Alligevel lykkedes det på en eller anden måde for rapporten ud fra disse data at konkludere, at "midlet ikke har potentiale for ophobning i jord", hvilket illustrerer de store vanskeligheder, der mødte Dave Goulson og hans studerende i deres arbejde med at beskytte insektfaunaen. Det kræver kun en meget lille mængde af et neonikotinoid for direkte at dræbe en bi. Toksiciteten, dvs. giftigheden, ligger på en LD_{50} for de fleste neonikotinoider på omkring fire milliarddele (ppb) af et gram per honningbi, hvilket ikke er meget efter nogen som helst målestok. Illustration fra Den tavse klode side 110.

fugtige jord, når såsæden er sået (kemikalierne er vandopløselige), og at såsæden, når den så spirer, vil opsuge giften, som derefter spredes overalt i planten og beskytter den mod skadelige insekter. Det lyder temmelig smart – landmanden køber sin såsæd med coating, og derefter skal han intet gøre for at beskytte sine afgrøder. Hvad der burde have været indlysende, men ikke synes at have bekymret nogen, da disse nye kemikalier blev introduceret, er, at hvad som helst der spreder sig til alle dele af planten, også vil spredes til pollen og nektar. Og afgrøder som raps og solsikker kræver selvfølgelig bestøvning og er populære blandt mange typer af bier, som alle får sig en dosis insektgift, når afgrøderne blomstrer.

Forskning førte til forbud

Dave Goulson og hans biologistuderende gennemført en stribe grundige arbejder, der blev publiceret sammen med en undersøgelse fra en fransk forskergruppe. De leverede klare beviser på, at såsæd med neonikotinoider faktisk kunne skade honningbierne og derfor også vilde bier og alle andre insekter. Læg dertil, at neonikotinoiderne ophobedes år efter år i dyrkningsjorden.

Resultaterne blev rapporteret over hele verden og overbeviste på rekordtid Europa-Parlamentet i 2013 om nødvendigheden af et begrænset forbud og i 2018 om et totalforbud mod landbrugets nye supergiftige sprøjtemidler.

Imidlertid løber der en rød tråd gennem disse og andre feltstudier. De viser, at vilde bier som humlebier og murerbier ser ud til at være hårdere ramt end honningbier. Hvorfor er ikke til at sige med sikkerhed, men en teori går ud på, at de meget større kolonier af honningbier med op til 50.000 arbejdere bedre kan klare at miste nogle individer til pesticiderne. Derimod rummer humlebiernes kolonier højst et par hundrede arbejdere, mens hos murerbier passer hunnen på egen hånd sin rede, så hvis noget tilstøder hende, er det sket med reden.

angriber hjernen på insektet, men de er langt mere potente end deres forgængere: Den dosis DDT, der skal til for at dræbe en honningbi, er 7.000 gange højere end blot en enkelt dosis imidacloprid.

De franske biavlere var de første til at slå alarm, men de blev stort set ignoreret, selvom de foranstaltede en protestmarch mod de nye sprøjtegifte i komplet biavlerdress i Paris. Et tiår senere begyndte honningbier at dø i stort antal i Nordamerika som et fænomen, der blev døbt "colony collapse disorder". Statistikken var chokerende: 800.000 honningbifamilier, der repræsenterede næsten en tredjedel af alle honningbifamilier i Nordamerika, gik tabt i løbet af vinteren 2006/7, og næsten lige så mange året efter. Det skabte en mediestorm og vilde spekulationer om, at bierne måske var ved at uddø.

Og det var ikke kun Frankrig og Amerika, der oplevede krisen. I foråret 2008 døde tusinder af honningbifamilier i Tyskland. Disse dødsfald faldt nøje sammen med det tidspunkt, hvor landmændene sådede majsfrø, der stort set alle var bejdset (overfladebehandlet) med et neonikotinoid. På dette tidspunkt blev såsæden til stort set alle markafgrøder i Europa (også i Danmark) og Nordamerika bejdset med neonikotinoid, så forskere som Dave Goulson begyndte at overveje, om de der franske biavlere havde haft ret hele tiden?

Neonikotinoider er systemiske, hvilket betyder, at de spredes til alle dele af planten. Når de anvendes som bejdse til såsæd, er det hensigten, at bejdsen opløses i den

Videre læsning:
Dave Goulson: Den tavse klode. Oversat af Kjeld Hansen. Gads Forlag 2023

Habel, J. C. et al. 2022: Breakpoints in butterfly decline in Central Europe over the last century. *Science of the Total Environment* 851.

Møller, P. A. 2019: Parallel declines in abundance of insects and insectivorous birds in Denmark over 22 years. *Ecology and Evolution* 9: 6581–6587.

Møller, P. A. 2020: Quantifying rapidly declining abundance of insects in Europe using a paired experimental design. *Ecology and Evolution* 10: 2446–2451.

Den danske rødliste: https://ecos.au.dk/forskningraadgivning/temasider/redlistframe/

Kampen mod neonikotinoiderne gav Dave Goulson en bitter forsmag på visse kemikoncerners ryggesløse omgang med videnskabelige data. Han skriver:

»Den dag i dag fastholder producenterne af neonikotinoiderne, at deres insekticider er effektive til at dræbe skadedyr, men helt uskadelige for bier og andre nyttige insekter, på trods af bjergene af beviser på det modsatte. Deres holdning minder mig mere end noget andet om "dobbelttænkning", dvs. evnen til samtidigt at acceptere to modstridende overbevisninger, som vi kender det fra George Orwells "1984", hvor det er en evne, der forventes af alle loyale partimedlemmer.«

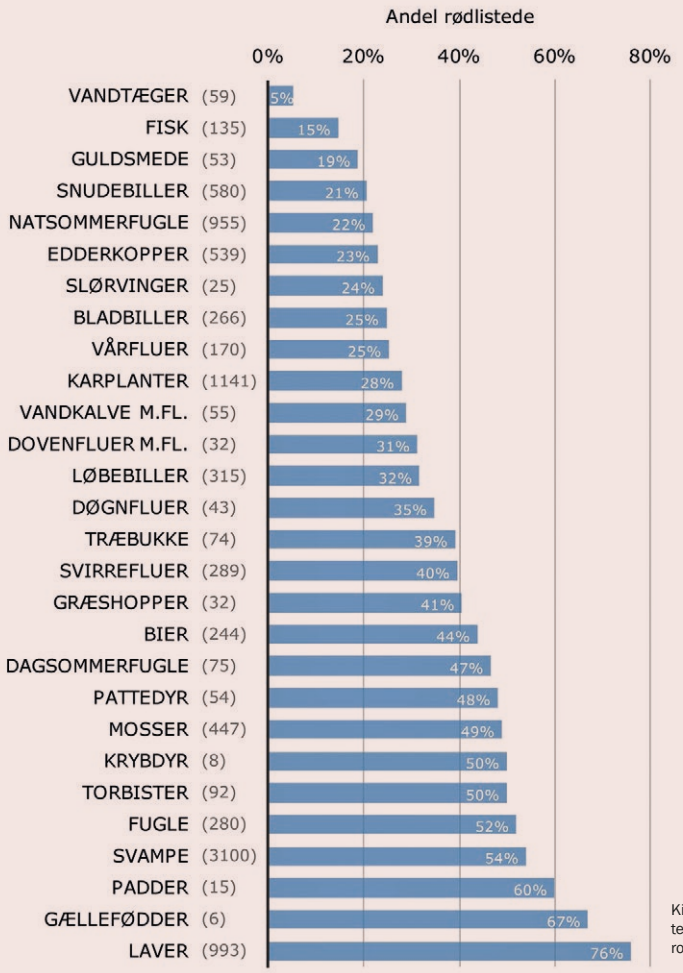
Hvad kan der gøres?

Bogen slutter med Goulsons bud på, hvad der bør gøres for at afværge insekternes undergang:

»Jeg vil hævde, at der er brug for dybtgående forandring. Vi har brug for radikale ændringer af de sammenbrudte fødekæder, samtidig med at madspildet begrænses, og kødforbruget skæres ned, så vi kan afsætte store landområder af mindre produktiv karakter til natur. Vi skal udvikle ægte, bæredygtige landbrugssystemer, der fokuserer på at arbejde med naturen for at producere mad, der er sund for os, i stedet for at dyrke afgrøder i store, golde monokulturer, der søles ind i pesticider og gødningsstoffer.

Vi bør invitere flere insekter ind i vores haver og parker og omdanne byområderne med vejkanter, jernbaneskråninger og rundkørsler til et netværk af korridorer med blomstrende, sprøjtefrie levesteder. Alle kan bidrage til at skabe disse forandringer på mange forskellige måder: Køb og spis lokale, sæsonbestemte økologisk producerede grøntsager og frugt; dyrk dine egne madvarer; stem på politikere, der tager miljøet alvorligt; opdrag dine børn til at forstå det påtrængende behov for at passe bedre på planeten.« ■

↑ I 1800-tallet var Eghjorten udbredt i store dele af landet, men er siden uddød. I 2013 gjorde arten dog comeback i den danske natur, da 112 voksne eghjorte og 180 eghjorte-larver blev udsat på fem lokaliteter i Jægersborg Dyrehave og Gribskov. Det var Miljøministeriet, der stod bag den millionondyre investering, der resulterede i en succes, da zoologer i juni 2023 konstaterede nogle voksne biller i dyrehaven.
Foto: Kathrine Hammer.



Kilde: ecos.au.dk/forskningraadgivning/temasider/redlistframe/roedliste-2019/roedlistestatus/fordeling-paa-artsgrupper

Oversigt over rødlistede arter for de 28 artsgrupper, der er repræsenteret i den danske Rødliste 2019. For hver artsgruppe er det samlede antal rødlistevurderede arter vist i parentes.

Andelen er særlig høj for laver, padder, svampe, fugle, torbister, krybdyr, mosser, pattedyr, dagsommerfugle og bier. Tilsvarende er der relativt få rødlistede arter af vandtæger, fisk, guldsmede, snudebiller og natsommerfugle. Indenfor Danmarks grænser er der hidtil blevet identificeret 292 forskellige biarter, og det kan umiddelbart lyde som mange forskellige slags, men af de 244 arter, man indtil videre har gjort status på, er 44 % nu rødlistede. Hele 19 er i dag uddøde og 56 truede, og heraf er 18 kritisk truede.

INSEKTOVERVÅGNING FOR ALLE

Ved hjælp af mere end 400 frivillige borgere, et specieldesignet net til biler og DNA-teknologi har forskere udviklet en ny metode til overvågning af insekter på national skala: *Insektmobilen*. Forskerne bag fortæller her om projektets historie, og hvilke resultater der er kommet ud af det indtil nu.

Hvis snakken falder på biodiversitetskrise og insekter kan forbavsende mange mennesker erindre forruden på deres bil overstrøget med døde insekter efter en køretur i det danske sommerlandskab. Det står i skærende kontrast til den bilrude, man oplever efter en køretur i nutidens sommerland. Meget tyder på, at der er sket en betragtelig nedgang i insektbestande, og det er et globalt fænomen (se også artiklen *Pladsmangel og pesticider udrydder alverdens insekter* i dette nummer). Måske vi er blevet fartblinde på grund af den, for os mennesker, lange tidshorisont, så vi ikke lægger mærke til, at insekterne år for år er blevet færre i antal?

Det var netop de manglende insekter på bilruden, som gav os ideen til et projekt, vi senere døbte Insektmobilen. Det var ambitionen, at undersøge insektdiversiteten i Danmark og udvikle en metode til overvågning af insektfaunaen på stor skala. Baggrunden var både biodiversitetskrisen og det faktum, at vi har yderst begrænset viden om tilstanden af Danmarks insektfauna. Der foregår meget lidt insektovervågning i Danmark, og den der udføres, er enten fokuseret på enkelte artsgrupper eller på et lille geografisk område.

Derfor ville vi nytænke den traditionelle insektovervågning, så vi kunne undersøge store geografiske områder på kort tid. Et oplagt hjælpemiddel til at dække store afstande er personbiler, og dem er der mange af i Danmark. Nu begyndte ideen at tage form: Vi skal på en eller anden måde have de mange bilejere til at hjælpe med at undersøge insektfaunaen, imens de kører rundt i landet. Og løsningen var et stort insektnet, som sættes på taget af bilerne. Men et sådant insektnet var der ikke lige nogen, som havde udviklet og masseproduceret.

Insektmobilen bliver til

Vores første opgave var derfor at designe et net, som både er stærkt og sikkert at have siddende på taget af en bil, mens den kører, og det gik vi i gang med da projektet begyndte i starten af 2017. Nettet skulle være effektivt, stærkt, nemt at samle og samtidig passe til alle biltyper. Efter et års tid og adskillige prototyper senere stod vi med et net, som levede op til alle vores krav. Nu var vi meget spændte på,

Om forfatterne

Anders P. Tøttrup er lektor og sektionsleder for Science & Society på Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet. Han driver en række forskningsprojekter indenfor biologi, geologi og arkæologi, som inddrager befolkningen. aptottrup@snm.ku.dk

Cecilie Skræp Svenningsen er tidligere ph.d.-studerende og post doc ved Statens Naturhistoriske Museum og nu dataadministrator ved GBIF: The Global Biodiversity Information Facility.

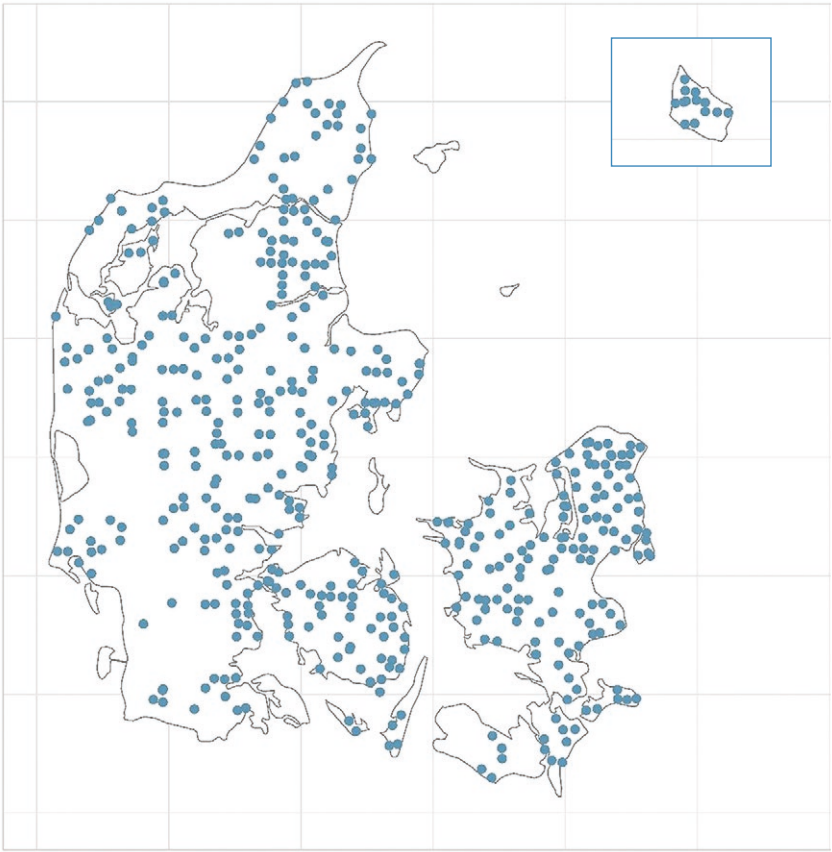
Jonas Colling Larsen er biolog og projektleder for blandt andet Insektmobilen ved Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet. jlarsen@snm.ku.dk

om vi kunne få 200 frivillige fra alle egne af landet til at køre rundt med nettene, hvilket var projektets oprindelige mål.

Til vores held ramte lanceringen af Insektmobilen den helt rigtige bølge, som var sat i gang af et tysk studie, der viste en nedgang i insektfaunaen på næsten 80 % i et område i Tyskland. Det gav os omtale i flere medier, og over en weekend i starten af 2018 fik vi mange flere tilmeldte, end vi havde kapacitet til.

Frivillige "Insektmobil-piloter" i gang med at indsamle insekter i 2020. Foto: Jan Skriver.

Med de frivillig ombord blev de mange "Insektmobilsæt" sendt afsted til alle egne af landet. I hver sæt var der udover selve insektnettet remedier, som de frivillige skulle bruge til at indsamle og konservere insekterne, og til sidst sende det hele retur til os, samt instruktioner om, hvornår og hvilke ruter den enkelte skulle køre. Vi fokuserede ruterne på fem forskellige landskabstyper: skov, åben natur, våd natur, agerland og by. Alle frivillige blev bedt om at køre to forskellige ruter á 10 km og gentage hver rute på to forskellige tidspunkter. Så i alt fire køreture i løbet af juni måned og kun på dage med godt vejr (ingen regn eller blæst). Vi bad altså de frivillige om en stor indsats, og vi var spændte på, hvor mange det ville lykkedes at gennemføre det hele. Her oplevede vi projektets næste store succes: Mere end 90 % af de frivillige sendte nemlig det hele retur og med korrekt udført indsamling. Det var langt flere, end vi havde turde håbe på.

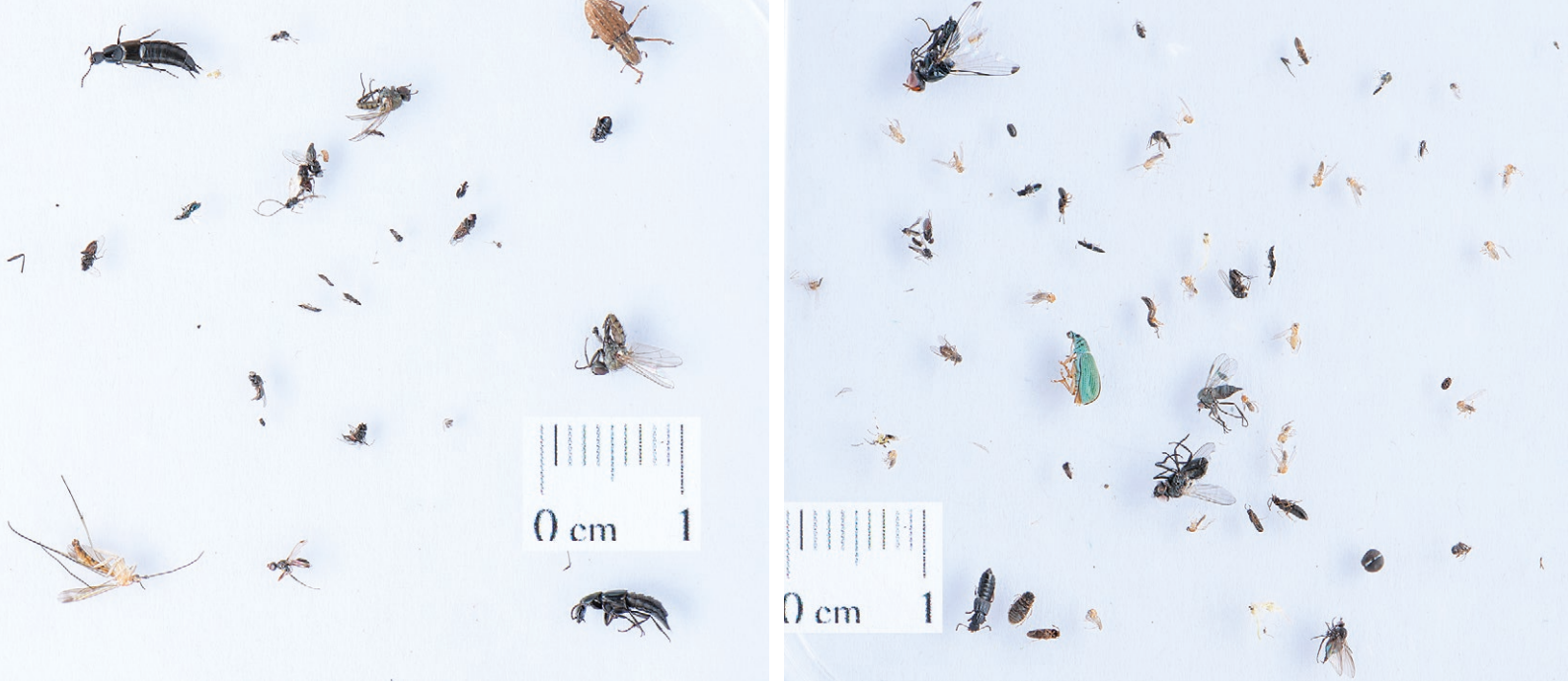


Rutekort for Insektmobilen hvor hver blå prik markerer steder, hvor de frivillige Insektmobil-piloter har indsamlet insekter i 2018, 2019 og 2020.

Vi gentog derfor insektindsamlingerne de to følgende år, og efter tre års indsamling havde vi tre store kummefrysere med mere end 1.500 indsamlede insektprøver i sprit. Første skridt i analysearbejdet var at tørre og veje hver enkelt prøve, så vi fik et mål for selve biomassen af insekter, der var blevet indsamlet på hver rute. Dernæst blev insekterne i hver prøve sorteret efter størrelse (over eller under 0,5 cm). Efterfølgende brugte vi en ny metode, som trækker DNA ud af insekterne uden at ødelægge dem. Og til sidst blev DNA'en analyseret, for at finde ud af hvilke insektarter, der var i de forskellige prøver.

Byerne er insektfattige

Resultaterne viste, at byområder er den landskabstype, hvor biomassen af flyvende insekter er tydeligt lavest i forhold til de andre landskabstyper, vi undersøgte. Derudover viste resultaterne, at der er en positiv sammenhæng mellem biomassen af flyvende insekter og det samlede areal af grønne områder i den by, hvor insekterne blev indsamlet. Med andre ord: Mængden af insekter er lav i byerne, men højere jo flere grønne områder en by har.



Billederne viser eksempler på insektfangst fra to forskellige ruter, der gik gennem henholdsvis by og bebyggelse (tv) og åben natur (th). Antallet af individer og arter varierede meget fra prøve til prøve, men generelt var der meget få store insekter (>1 cm) i de tre år, hvor der blev indsamlet insekter (2018, 2019 og 2020). Alle prøver blev DNA-analyseret hver for sig, så vi kunne finde ud af, hvilke arter der var i blevet fanget. DNA-analysen var ikke-destruktiv og trak blot DNA ud af insekterne. På den måde har vi bevaret alle insekterne, så de kan indgå i Statens Naturhistoriske Museums samlinger. Fotos: UFZ Huang & Nayan.

Yderligere læsning:
Svenningsen, C.S. et al (2022). Flying insect biomass is negatively associated with urban cover in surrounding landscapes. Diversity and Distributions, 00, 1– 13. Diversity and Distributions. http://doi.org/10.1111/ddi.13532

Richter, A., Comay, O., Svenningsen, C.S., Larsen, J.C., Hecker, S., Tøttrup, A.P., Pe'er, G., Dunn, R.R., Bonn, A. and Marselle, M. (2021) Motivation and support in citizen science insect monitoring: a cross-country study. Biological Conservation 263: 109325. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109325

Svenningsen, C.S., Frøslev, T.G., Bladt, J., Pedersen, L.B., Larsen, J.C., Ejrnæs, R., Fløjgaard, C., Hansen, A.J., Clausen, J.H., Dunn, R.R., Tøttrup, A.P. (2021). Detecting flying insects using car nets and DNA metabarcoding. Biology Letters 17: 20200833. https://doi.org/10.1098/rsbl.2020.0833

van Klink, R. et al (2022): Emerging technologies revolutionise insect ecology and monitoring. Trends in Ecology & Evolution 7:S0169-5347(22)00134-3. https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.06.001

Dernæst analyserede vi selve biodiversiteten af insekterne (antallet af arter). Her viste resultaterne, at biodiversitet af de flyvende insekter, noget overraskende, også er markant lavest i byområder, mens for eksempel agerlandet har forbavsende høj biodiversitet. Det er overraskende, at vores resultater så tydeligt viser, at der både er lavere biomasse og -diversitet af flyvende insekter i byerne i forhold til de andre landskabstyper. Noget tyder altså på, at vi er blevet så gode til at kontrollere vores haver og parker, ved for eksempel at vand ledes væk, dødt og gammelt ved fjernes og hjemmehørende arter af blomstrende urter luges væk eller fravælges til fordel for mere eksotiske arter. Samlet set betyder det, at insekterne har svært ved at finde levesteder i vores byer.

Næste skridt bliver at undersøge, hvor i landet de forskellige insektarter blev fanget, og på den måde blive klogere på hvilke specifikke arter der trives i de fem landskabstyper, som vi har undersøgt.

Mange nye arter

Samlet set fandt vi 1.829 forskellige insektarter i de frivilliges prøver. Blandt dem fandt vi mange – i alt 319 insektarter – som ikke tidligere er registreret i Danmark. Og 17 af disse arter er heller ikke tidligere registreret i vores nabolande. Et sådant resultat viser, hvor mangfoldig insektfaunaen i Danmark er, og det siger også, at vi stadig ved meget lidt om, hvilke insektarter vi huser i landet.

Analyser af DNA fra prøverne viste, at der blev fanget en hel del arter, der hidtil ikke har været registreret i Danmark. Heriblandt arten på billedet, *Parasyrphus vockerothi*, som er en art af svirrefluer (blomsterfluer). Foto: Scott King/ CC BY-NC 4.0

Indtil videre har vi udgivet fem videnskabelige artikler med resultater fra projektet, og endnu en artikel er på vej i trykken. Med de hidtidige resultater fra projektet har vi udviklet og dokumenteret en ny metode med et enormt potentiale indenfor overvågning og analyse af flyvende insekter. Det gælder både i forhold til den måde, vi har inddraget frivillige i projektet, for udvikling og funktionen af bilnettet samt en ny fremgangsmåde for analysearbejdet i laboratoriet.

Stort engagement er forudsætning for succes

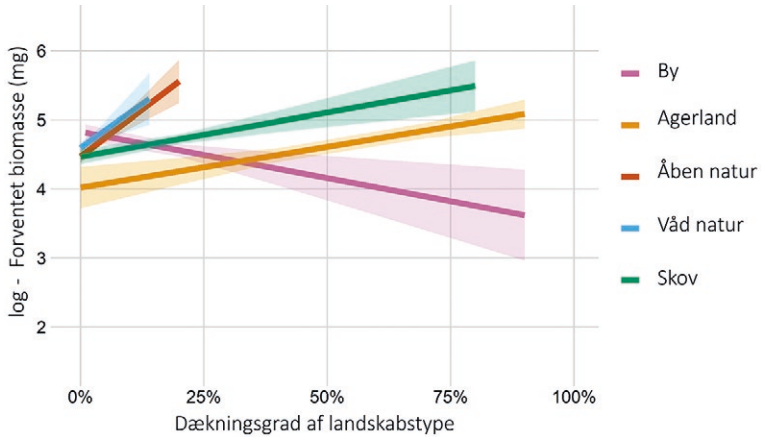
Projektet var fra start velsignet med stor interesse fra befolkningen for at deltage i projektet. Baseret på en spørgeskemaundersøgelse kan vi se, at dette skyldes god dækning i medierne, og at Dansk Ornitologisk Forening valgte at bringe en historie om projektet i deres medlemsblad forud for tilmeldingen. Vores

tilmeldingsside blev lagt ned over en weekend, og vi måtte desværre skuffe mere end 100 personer, da vi simpelthen ikke havde flere net.

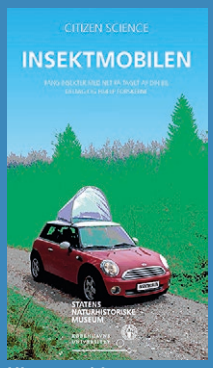
Vi gjorde meget ud af at designe projektet, så det var så nemt som muligt at deltage. Desuden oprettede vi Facebook-grupper, hvor de frivillige "Insektmobil-piloter" kunne dele erfaringer og oplevelser med hinanden. Det viste sig at være en rigtig god idé af flere grunde. Grupperne blev hurtigt et sted, hvor de frivillige hjalp hinanden, for eksempel med, hvordan de skulle bruge udstyret, og vi sørgede for, at det var et trygt sted at stille spørgsmål. Desuden kunne vi i grupperne følge med i, hvordan indsamlingen gik, og hvor der opstod problemer. Facebook-grupperne blev selvfølgelig også et sted, hvor deltagerne kunne dele deres store glæde og entusiasme med hinanden og os igennem billeder og videoer fra deres indsamlingsture.

I skrivende stund er projektet afsluttet i sin nuværende form, men de frivillige Insektmobil-piloter fra tidligere år udtrykker stadig stor interesse for projektet og for at få endnu en chance for at køre med Insektmobilen.

Projektet får også stadig stor opmærksomhed fra medier i både ind- og udland. Senest har vi haft besøg af et produktionsselskab fra USA, som ville høre mere om projektet og vores resultater, og projektet bliver på den måde en del af en storstilet, international programserie om insekter. Det bekræfter endnu en gang, at Insektmobilen har været en stor succes, og at det fortsat er højaktuelt. Vi håber derfor på, at vi får mulighed for at gentage projektet i fremtiden. ■



Biomassen (mængden) af insekter sat op imod, hvor stor andel de fem landskabstyper udgjorde af ruten, hvor insekterne blev indsamlet. Jo mere bymæssig bebyggelse langs ruten, jo færre insekter blev der fanget (lyserød nedadgående linje). Fra ruter i våd natur, åben natur og skov blev der fanget flest insekter relativt til agerlandet og byerne. Figuren er fra Svenningsen et al 2022 publiceret i *Diversity and Distributions*.



Hjemmeside:
insektmobilen.snm.ku.dk

Projektet med Insektmobilen er støttet økonomisk af Aage V. Jensen Naturfond.

Roskilde Universitet

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft."

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor

Foto: Ture Andersen

RUC

DIT STUDIEVALG KRÆVER TID – OG LIDT HJÆLP

Vil du uddanne dig inden for naturvidenskab, har du mange valgmuligheder. På KU kan du få hjælp til dit studievalg på flere måder.

Du kan blandt andet:

- Tage et Uddannelsestjek
- Få vejledning hos KU Studentercenter
- Gå i studiepraktik
- Blive studerende for en dag
- Se film om uddannelserne

Læs mere om vores naturvidenskabelige uddannelser og dine muligheder på

studier.ku.dk/science

KØBENHAVNS UNIVERSITET

Undervisningsmaterialer

Du kan finde ekstramateriale på aktuelnaturvidenskab.dk, som er beregnet på undervisningen i gymnasieskolen.

Arbejdsark om stjerneudvikling

Arbejdsarket tager udgangspunkt i artiklen *Stjernernes sang røber deres indre* fra Aktuel Naturvidenskab nr. 3/2023. Det knytter også an til foredraget "Stjernernes vilde liv", som professor Hans Kjeldsen fra Aarhus Universitet holdt i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab i foråret 2023. Artiklen og arbejdsarket kan anvendes i forbindelse med et forløb omkring stjerner eller i forbindelse med kernestof omkring grundstoffernes dannelse og fusion.

Målgruppe: Fysik B-niveau

Forudsætninger: Kendskab til begreberne periode og frekvens samt evt. stående bølger.

Arbejdsark om antipartikler til kræftbehandling

Dette arbejdsark er undervisningsmateriale til artiklen "Antipartikler mod kræft" fra Aktuel Naturvidenskab nr. 6/2006. Det er også relevant i forbindelse med foredraget "Antistof og antiverden" ved leder af ALPHA-eksperimentet på CERN Jeffrey Hangst i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 7. november 2023 (se ofn.au.dk/abstract/144). Materialet kan anvendes i forbindelse med et forløb omkring kernefysik/hospitalsfysik, hvor det kan inddrages som perspektiverende stof.

Materialet er udarbejdet af projektgruppen på Viborg Katedralskole for Aktuel Naturvidenskab i forbindelse med projektet *Brobygning på første række* finansieret af Novo Nordisk Fonden.

ABONNEMENTS-SERVICE

Har du fået ny adresse eller ønsker du at bestille et abonnement på bladet?

Kontakt os på telefon:
3036 0662 / 8715 2094
E-mail: **abo@aktuelnaturvidenskab.dk**

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: **aktuelnaturvidenskab.dk**

Husk at melde flytning til ny adresse.
Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

Til nye abonnenter:
Bestil en intropakke med otte helt nye numre plus abonnement i et år (6 numre) for kun 354,- kr. inkl. porto & ekspedition.

OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

Styregruppe

- **Astrid C. Johansen**, kommunikationskonsulent Roskilde Universitet
- **Birgitte Lyhne Broksø**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Mikkel Linnemann Johansson**, teamleder, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **David Lundbek Egholm**, professor, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet

Redaktionsgruppe

- **Astrid C. Johansen**, Roskilde Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjaer**, Aktuel Naturvidenskab
- **Jørgen Dahlgaard**, Aktuel Naturvidenskab
- **Michael Skov Jensen**, Københavns Universitet

Eftertryk kun efter aftale. Citat kun med tydelig kildeangivelse. Synspunkter, der fremføres i bladet, kan ikke generelt tages som udtryk for redaktionens holdning.

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

ISSN: 1399-2309 (papirudgaven), 1602-3544 (web)

Oplag: 4.500

NORDISK MILJØMÆRKNING
Svanemærket tryksag 5041-0601

Redaktion:

Telefon: 3036 0660 (Carsten) / 3036 0662 (Jørgen)

E-mail: red@aktuelnaturvidenskab.dk

Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk

Postadresse:
Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 120, Bygning 1520,
DK-8000 Aarhus C

Omslagsfoto:
Foto af en gråulv.
Foto: Shutterstock.

POST
PP DANMARK
SORTERET MAGASINPOST
ID-nr. 46144
Al henvendelse til:
Aktuel Naturvidenskab,
Ny Munkegade 120, 8000 Aarhus C
E: abo@aktuelnaturvidenskab.dk
T: 87152094

Fysik på den helt korte tidsskala

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Samme år som Aktuel Naturvidenskab udkom første gang – i 1999 – blev der uddelt en Nobelpris i kemi indenfor området "femtosekund-spektroskopi". Det gik ud på at bruge ultrakorte laserpulser – et femtosekund er 10^{-15} sekunder (eller en billiardtedel sekund) – til at undersøge kemiske reaktioner.

At tiden går og grænserne for den tekniske formåen i forskningen rykker sig, får vi et meget anskueligt eksempel på med årets Nobelpris i fysik. For nu handler det ikke om femtosekunder, men om attosekunder. Forskerne kan med andre ord nu frembringe lyspulser, der er så korte, at de skal måles i attosekunder – dvs. 10^{-18} eller en trilliontedel af et sekund.

Faktisk anså man længe femtosekund-lyspulser som en hård grænse for, hvor korte lyspulser, det teknisk er muligt at producere. Det skyldtes meget simpelt, at den kortest tænkelige lyspuls svarer til en enkelt periode i en lysbølge – altså den cyklus, hvor lysbølgen svinger op til et toppunkt, ned i en bølgedal og tilbage til udgangspunktet. Med de bølgelængder, som lasersystemer i 1980'erne opererede ved, var det umuligt at komme under femtosekundgrænsen.

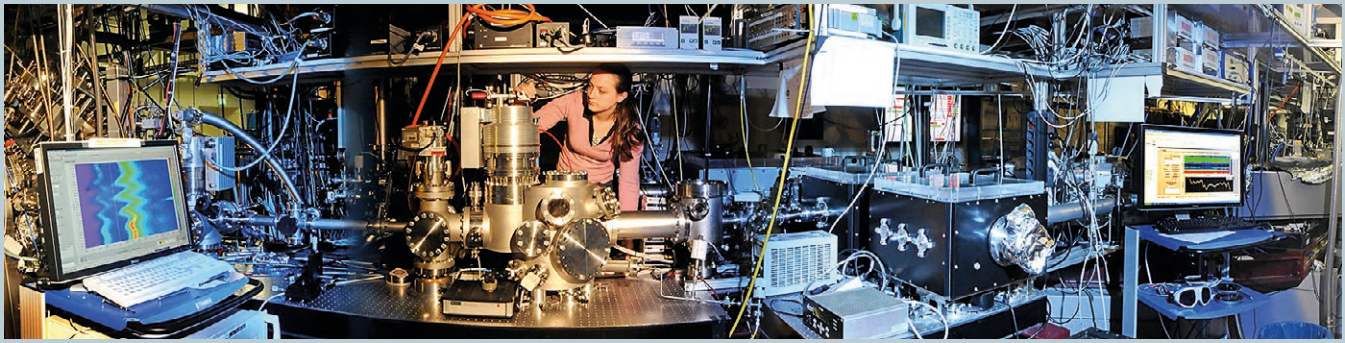
Matematikken til at beskrive bølger fortæller os imidlertid, at man principielt kan frembringe en vilkårlig bølgeform ved at kombinere tilstrækkelig mange bølger af den rette størrelse, bølgelængde og amplitude. Tricket til at opnå attosekund-pulser er således at kombinere flere og kortere bølgelængder. Men det kræver mere end blot en laser. Gennembruddet stod den fransk-svenske fysiker Anne L'Huillier for i 1987. Ved at sende lyset fra en infrarød laser gennem en ædelgas kunne hun demonstrere, at vekselvirkningen mellem laserlyset og atomerne i gassen skabte overtoner – dvs. lysbølger, der fuldfører et antal cykler indenfor hver cyklus af den originale bølge.

I 2001 lykkedes det den franske fysiker Pierre Agostini at producere og undersøge en serie af fortløbende lyspulser, hvor hver puls havde en varighed på kun 250 attosekunder. Nogenlunde samtidig lykkedes det ved hjælp af en anden type eksperiment den tredje af årets nobelpristagere, den østrig-ungarske fysiker Ferenc Krausz, at isolere en enkelt lyspuls på 650 attosekunder.

På baggrund af de tre pionerers arbejde har forskerne således i dag et værktøj til at undersøge fundamentale fænomener som, hvordan elektroner bevæger sig eller ændrer energi i atomer og molekyler. Det gør forskerne i stand til bedre at "styre" elektronerne, hvilket eksempelvis kan lede til mere kontrol over molekylære processer og udvikling af endnu hurtigere elektronik.

I øvrigt er zepto – dvs. 10^{-21} (en trilliardtedel) – næste step på fysikernes målepind for ultrakorte tidsskalaer. Og det er skam allerede lykkedes forskere at lave målinger på zeptosekund-skalaen – nemlig den tid, det tager lys at passere et dihydrogen-molekyle (247 zeptosekunder). Så hvem ved – måske ser vi om en 25 års tid en nobelpris til zeptosekund-forskning.

Kilde: www.nobel.se ■



Indtryk af attosekund-forskningen på Max-Planck-Institut für Quanten-optik, hvor Ferenc Krausz er professor.

Foto: © Thorsten Naeser.