

# Det store ukendte: mørkt stof

”

Hvis vores modeller er rigtige, bliver hver af os gennemblæst af mellem 10 og 100 milliarder partikler af mørkt stof pr. sekund.

**Mørkt stof ændrer synet på universet**

**Det mørke stof er et eventyr**

**Fra undren til (næsten) viden**



INSPIRATIONS-  
MATERIALER  
**OM NY  
NATURVIDEN-  
SKABELIG  
VIDEN**

TemaMagasinet **IndBlik**

## Et blik ud i det store ukendte

Hvis vi forstår, hvad universet består af, og hvordan det fungerer, så forstår vi også bedre os selv og vores plads i det. Det er et af partikel- og astrofysiker Mads Toudal Frandsens argumenter for, hvorfor det mørke stof er et spændende forskningsfelt med potentiale til at få elever i grundskolen til at spærre øjnene op og lade fantasien udfolde sig.

Dette temamagasin præsenterer Mads Toudal Frandsens forskning, som foregår på Syddansk Universitet og i samarbejde med forskere fra hele verden. Magasinet giver også en introduktion til mørkt stof som et tema, der kan didaktiseres fra 1. til 9. klasse.

Det mørke stof har ifølge Mads Toudal Frandsen både stort samfundspotentiale og er sit eget eventyr. Samtidig er det et stærkt afsæt for naturfagsundervisning, som kan begejstre og oplyse elever i grundskolen – og som sætter spot på, at det er nødvendigt at begå fejl, når man skal blive klogere.

### Hvorfor hedder det mørkt stof?

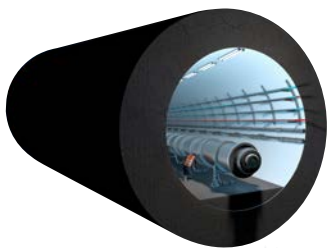
Med undtagelse af neutrinoer vekselvirker alt kendt stof med det elektromagnetiske felt og derfor udsender det kendte stof lys som elektromagnetisk stråling. Det gør mørkt stof ikke – deraf betegnelsen 'mørkt stof'. Men da mørkt stof heller ikke absorberer lys, er det faktisk slet ikke mørkt, men usynligt! Så i virkeligheden vil 'usynligt stof' være et mere passende navn.

### Naturvidenskabens ABC

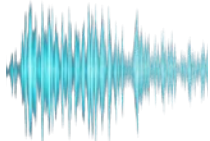
Temaet vedrører grundlæggende naturvidenskabelige erkendelser. Ti sådanne erkendelser er beskrevet i Naturvidenskabens ABC, der er udviklet for Børne- og Undervisningsministeriet. Erkendelser, der er relevante for dette tema, er:

- Alt i universet er opbygget af små partikler (erkendelse 7).
- Fundamentale fysiske naturkræfter virker overalt i universet (erkendelse 8).
- Solsystemet er en meget lille del af en enkelt af milliarder af galakser i universet (erkendelse 10).

Se naturvidenskabens-abc.dk



# 10



## Fra undren til (næsten) viden

Idéen om det mørke stof kommer fra undren og har ført til en erkendelse af, at universet rummer langt mere ukendt end hidtil antaget.

# 16

## Det mørke stof kan tage eleverne med på eventyr

Det mørke stof er over det hele og har potentiale til at begejstre elever i grundskolen.



# 4

## Det mørke stof er et eventyr

Mads Toudal Frandsen jagter svar på universets gåder i sin forskning i partikel- og astrofysik.

# 12

## Mørkt stof ændrer synet på universet

Det mørke stof er overalt, og der er et teknologisk kapløb i gang for at udvikle måder at spore, måle og veje det på.



# 22

## Overblik: Temamagasinet er en del af en samlet videnspakke

Seks inspirationskataloger hjælper undervisning i temaet på vej, film formidler forskningen, og redskaber støtter naturfagsteams.

# Det mørke stof er et eventyr

Mads Toudal Frandsen jagter svar på universets gåder i sin forskning i partikel- og astrofysik. Han er en blandt flere forskere verden over, som nærmer sig et gennembrud i forståelsen af, hvad mørkt stof er, og hvad det betyder for universet.

”

Der er masser af opdagelser at gøre, og jeg tror, at vi lige nu står på tærsklen til det helt store eventyr: Et paradigmeskifte i, hvordan vi forstår universet.

**E**ventyr og udfordringer. Det er de første ord, som falder Mads Toudal Frandsen ind, når han bliver spurgt om, hvorfor han forsker i det mystiske mørke stof, som tilsyneladende findes overalt og holder det kendte univers stabilt:

”Det er en rød klud i ansigtet på mig som forsker, at vi kun forstår en lille bestanddel af universet. Måske helt ned til fem procent. Det tror jeg ikke, nogen ville have sagt i 1800-tallet eller i 1950'erne – da troede man, at vi havde forstået det meste. Nu ved vi, at det, vi har forstået, er det mindste! Der er masser af opdagelser at gøre, og jeg tror, at vi lige nu står på tærsklen til det helt store eventyr: Et paradigmeskifte i, hvordan vi forstår universet.”

### **Kaster lys over det mørke stof**

Mads Toudal Frandsen er 39 år og lektor i partikel- og astrofysik på Syddansk Universitet. Derudover er han forskningsleder på projektet 'The Origin of Mass and the Particle Nature of Dark Matter' under Det Frie Forskningsråd. Det er særligt i rammerne af det projekt, at han bidrager til at kaste lys over det mørke stof:

”Projektet handler om at forstå mørkt stof på elementarpartikelniveau. Det er vigtigt, fordi mørkt stof tilsynelad-



Vi står på tærsklen til et paradigmeskifte, en helt ny indsigt i universitets opbygning, som kan få konsekvenser, vi ikke kan forestille os. Elever i grundskolen kan tage del i eventyret gennem undervisning, der inviterer nysgerrighed og æggende undren indenfor, mener Mads Toudal Frandsen.

ende er over det hele – både i universet og iblandt os. Hvis vores modeller er rigtige, bliver hver af os gennemblæst af mellem 10 og 100 milliarder partikler af mørkt stof pr. sekund, når vi sammen med Jorden roterer med ca. 200 km i sekundet gennem Mælkevejen. Men vi mærker det ikke, fordi det mørke stof kun vekselvirker meget svagt med os – i øvrigt ligesom de kendte neutrino-partikler fra Solen, der også strømmer gennem os”, forklarer han.

### **Interessen kom fra universet**

Det er et paradoks, der i sig selv kan ægge forskernes interesse, at vi konstant færdes i en sky af mørkt stof, uden at nogen tager notits af det.

Men forskernes interesse kommer oprindeligt et helt andet sted fra, nemlig fra universet:

”I 2006 registrerede man for første gang to galaksehobe passere gennem hinanden i den såkaldte ‘Bullet Cluster Collision’. Galaksernes stjerner og planeter gled forbi hinanden i stor afstand, mens store mængder af gas kolliderede og efterlod en chokfront, som man kunne iagttage fra Jorden. Gaskollisionen betød, at galakserne tabte en stor del af deres masse – nemlig gassen – men alligevel bevarede de en meget større masse, end man kunne forklare alene med stjernerne og planeterne i galaksen. Det kan man regne ud, fordi lyset fra andre galakser

blev bøjet af disse galakser i en grad, som forudsætter en større masse.”

Ifølge Mads Toudal Frandsen er det i dag anerkendt, at den manglende masse faktisk ikke manglede, men at den bestod af mørkt stof, som hverken dengang eller i dag kan observeres direkte.

### **Forskningen driver teknologien**

Mange ser ‘Bullet Cluster Collision’ som det endegyldige bevis for, at det mørke stof findes. Mads Toudal Frandsen vil dog ikke gå så vidt:

”Vi har masser af indicier for mørkt stof. Men indicierne kommer alle sammen fra den indirekte effekt, som

mørkt stof har på det lysende stof, og som vi kender via tyngdekraften. Beviset eller den rygende pistol ville være, hvis vi kunne detekttere eller producere partiklen af mørkt stof i et laboratorium, ligesom vi kan med de kendte partikler og grundstoffer. Men der er vi ikke endnu, selv om flere forsøg gennem de seneste årtier så ud til at komme tæt på.”

### Forskningen krabber sig frem

Forskning på feltet er med Mads Toudal Frandsens ord som at pille flig for flig af noget stort og ukendt. Hver flig giver et lille stykke ny viden, og så krabber forskerne sig fremad derfra. Det er på én gang frustrerende og fascinerede:

”Det mørke stof vekselvirker så svagt med andre partikler, at forskningsfeltets eksisterende måleredskaber ikke slår til. De er baseret på elektromagnetisme og kan måle lys og friktion, men meget tyder på, at det mørke stof spiller efter helt andre regler, og at vi skal opfinde nye måder at detekttere det på. Det betyder samtidig, at der er et stort behov for forskere, der med kreativitet og fantasi kan bidrage til tankespring a la Bohrs, da han beskrev kvantemekanikken, eller Ørstedes, da han opdagede elektromagnetismen.”

Mads Toudal Frandsen peger på, at samfundet kan få gavn af netop denne bestræbelse på at finde nye måder at måle, veje og beskrive det mørke stof på:

”Forskningen presser den teknologiske udvikling til at komme op med noget nyt, ligesom det skete, efter Bohr opdagede kvantemekanikken. Det førte for det første til en fuldstændig fundamental ændring af vores forståelse af verden og derefter for det andet til, at den teknologiske udvikling eksploderede med halvledere, transistorer og senere computere. Det samme er også sket i jagten på Higgs-partiklen og andre partikler ved LHC-eksperimentet på CERN.”



Beviset eller den rygende pistol ville være, hvis vi kunne detekttere eller producere partiklen af mørkt stof i et laboratorium, ligesom vi kan med de kendte partikler og grundstoffer. Men der er vi ikke endnu.

### Kvantemekanikken – et fortilfælde

Jagten på svar, der forklarer det mørke stof, har ifølge Mads Toudal Frandsen en bemærkelsesværdig analogi, som antyder den potentielle rækkevidde af et forestående forskningsgennembrud:

”For hundrede år siden fik partikelfysikere grå hår i hovedet af at prøve at forklare, hvorfor atomerne – og dermed det synlige univers – forblev stabile og ikke kollapsede. Det store spørgsmål var, hvordan elektronerne kunne opretholde den stabile rotation om atomkernen, og hvorfor vægten af et atom ikke var det samme som vægten af dets bestanddele. Ingen teori eller model kunne forklare det.”

”Ud fra den viden, som Ørsted var med til at grundlægge, burde elektronerne tabe energi via elektromagnetisk stråling og falde ind på kernen i den såkaldte annihilationskatastrofe. Gennembruddet i forståelsen af, hvorfor det ikke skete, kom med kvantemekanikken og Einsteins specielle relativitetsteori.”

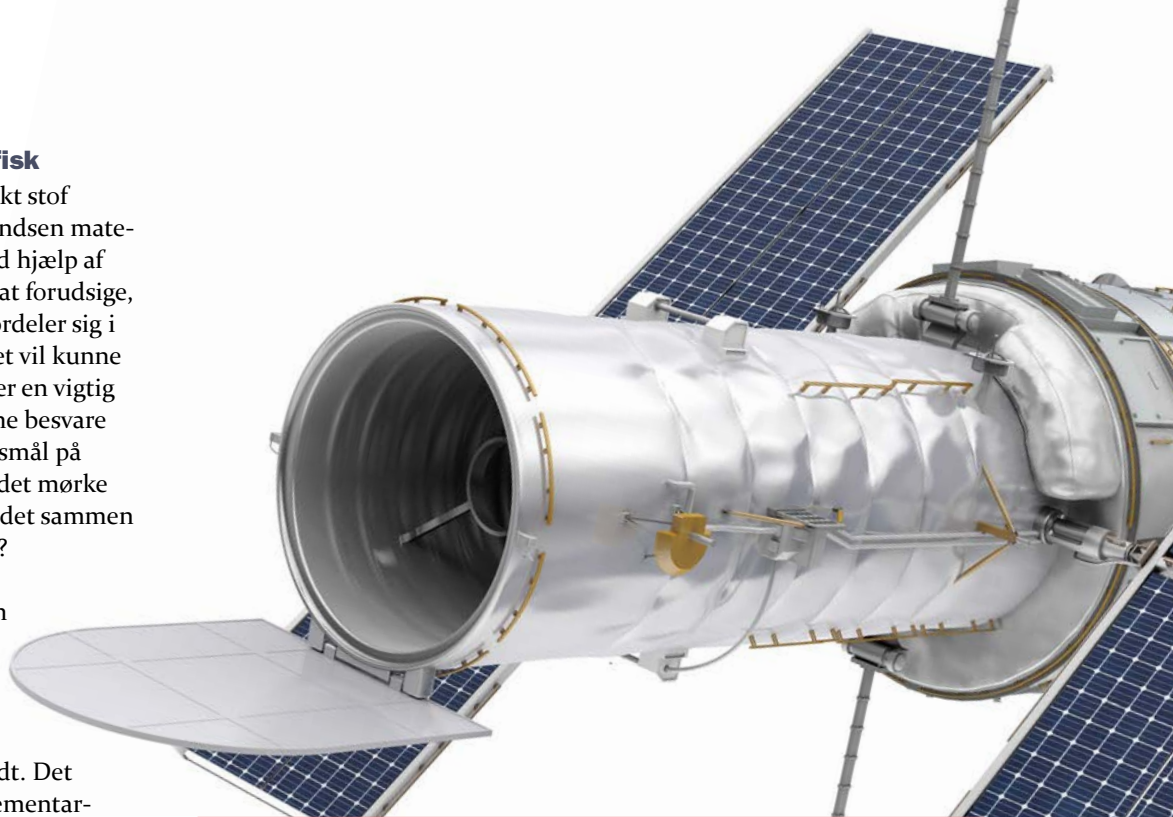
”På samme måde står vi i dag over for et problem med masse og stabilitet af galakser: Vi forstår ikke til fulde, hvorfor de hænger sammen og ikke bliver slynget itu. Planeter, stjerner og galakser roterer med så stor fart om hinanden, at den samlede tyngdekraft fra deres synlige stof ikke er nok til at holde dem sammen. Det mørke stof kan få ligningen til at gå op. Nu mangler vi så gennembruddet, der forklarer, hvad det mørke stof er, og præcis hvordan det vekselvirker med os og med synligt stof”, forklarer Mads Toudal Frandsen.

## Fysikken bliver filosofisk

I sin egen forskning i mørkt stof udvikler Mads Toudal Frandsen matematiske modeller, som ved hjælp af supercomputere forsøger at forudsige, hvordan det mørke stof fordeler sig i galakserne, og hvordan det vil kunne registreres og måles. Det er en vigtig brik, mener han, i at kunne besvare det grundlæggende spørgsmål på forskningsfeltet: Hvad er det mørke stof, og hvordan fungerer det sammen med de kendte byggesten?

Den store erkendelse, som forskningen i det mørke stof bygger på, er, at vi med stor sikkerhed kan sige, at langt det meste af stoffet i universet er ukendt. Det udgøres ikke af kendte elementarpartikler, men af helt nye. Ud fra den erkendelse kan der vokse en helt ny viden om – og måske svar på – nogle af de store spørgsmål, som Mads Toudal Frandsen allerede i gymnasiet var optaget af:

”Jeg havde enormt svært ved at vælge uddannelse, så jeg prøvede at heldgardere mig ved i begyndelsen at læse både fysik og filosofi, fordi det er sådan to helt grundlæggende fag i forskellige verdener. I sidste ende valgte jeg fysikken, fordi det gav mig nogle meget konkrete redskaber til at undersøge vores plads i det her univers. Det er jo en helt grundlæggende afsøgning, nærmest filosofi i sig selv. Altså, hvorfor er vi her, og hvordan er vi kommet her?”



## Da gennembruddet næsten var der ...

I 2010'erne var Mads Toudal Frandsen en del af en forskergruppe i Oxford, der som nogle af de første opdagede, at resultaterne af to eksperimenter (CoGeNT og DAMA) tilsyneladende stemte overens med hinanden i forhold til at observere kollisioner af mørkt stof i deres detektorer.

Begge eksperimenter forsøgte at påvise mørkt stof ved at måle på rekyler eller vekselvirkninger, for eksempel via den svage kernekraft, når mørkt stof stødte sammen med natriumiodkrystaller eller germanium.

I den periode var der en udbredt tro på, at det mørke stof ville være målt og vejlet inden for få år, udbredt – selv i ellers meget skeptiske forskerkredse.

Men der viste sig at være udfordringer med begge eksperimenter: De kunne ikke repliceres, og baggrundsstøj kunne have påvirket resultaterne. Ifølge Mads Toudal Frandsen er det umådeligt svært at opstille tilstrækkeligt præcise eksperimenter med den i dag tilgængelige teknologi. Overkommes den barriere, venter der mange store opdagelser forude, mener han.





Forskningen presser den teknologiske udvikling til at komme op med noget nyt, ligesom det skete, efter Bohr opdagede kvantemekanikken.

## De grundlæggende fysiske naturlove virker overalt i universet

Forskere inden for alle grene af fysikken arbejder ud fra grundlæggende erkendelser, som tidligere forskere har stået fadder til. Her er nogle eksempler med særlig relevans for forskningen i mørkt stof:

### 1. Keplers planetlove

Johannes Kepler udregnede tre love, der beskriver, hvordan planeter kredser om en stjerne.

### 2. Newtons tyngdelov

Keplers love bidrog til at skabe fundamentet for Isaac Newtons lov om tyngdekraft: To legemer trækkes mod hinanden med en kraft, der er proportional med deres masser og omvendt proportional med kvadratet på afstanden imellem dem.

### 3. Bohrs atommodel

Niels Bohr forenede med sin atommodel kvantefysikken med den klassiske fysik og forklarede, hvorfor elektroner ikke falder ind på atomets kerne og annihilerer.

### 4. Einsteins generelle relativitetsteori

Albert Einsteins generelle relativitetsteori koblede tyngdekraften med tid og rum og forenede de to

sidste som rumtid. Einstein forudså blandt andet, at tyngden (eller massen) af en stjerne bøjer tiden og rummet, så lysstråler bliver afbøjet nær stjernen.

### 5. Hubbles lov

Edwin Hubble opdagede, at Mælkevejen blot er en blandt mange galakser, der hver især har milliarder af stjerner. Derudover opdagede han, at universet udvider sig med en fart, der vokser i forhold til afstanden, og som i dag kaldes Hubbles lov.

### 6. Big Bang-teorien

Big Bang-teorien beskriver, at universet blev skabt for næsten 14 mia. år siden i et enkelt punkt, der udvidede sig med stor hast. Teorien er siden styrket af eksperimenter og observationer – og med opdagelsen af den kosmiske baggrundsstråling, der opfattes som eftergløden af Big Bang.

# Fra undren til (næsten) viden

Idéen om det mørke stof kommer blandt andet fra undren over farten i stjerners og galaxers rotation og har ført til en erkendelse af, at universet rummer langt mere ukendt end hidtil antaget. Nu står vi over for et forskningsgennembrud af uanede dimensioner.

**F**ra tidernes morgen har spørgsmålet om menneskets plads i verden og universet beskæftiget store tænkere. Lige fra Aristoteles til Kepler, Newton, Einstein og mange flere er de bid for bid fremkommet med videnskabelige idéer om universets mange naturfænomener, som hånd i hånd med den teknologiske udvikling har skabt grundlag for den viden og forskning, der findes i dag.

Denne tidslinje illustrerer de afgørende forskningsgennembrud i de seneste knap 100 år, som har ført til teorien om mørkt stof.

## 1933

Fritz Zwicky opdager, at galakserne i galaksehobe – det vil sige samlinger af galakser holdt sammen af tyngdekraften – tilsyneladende bevæger sig så hurtigt, at tyngdekraften i den masse, vi kan se i hoberne, ikke burde være nok til at holde dem sammen.

## 1970

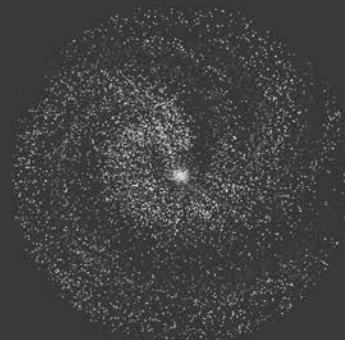
Vera Rubin og Kent Ford opdager, at stjerner roterer hurtigere i galakser, end det er muligt at forklare ud fra massen af det kendte stof.

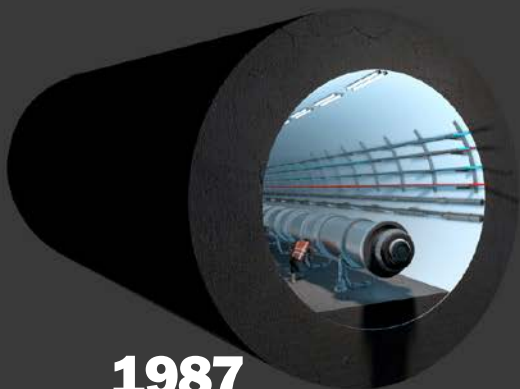
## 1980'erne

Mere avancerede computersimuleringer af galakser mimer, hvordan galakser dannes og udvikler sig. Det står klart, at galakserne ville falde fra hinanden uden det mørke stof.

## 1973

Jeremiah Ostriker og Jim Peebles viser med galaksesimuleringer, at tyngdekraften fra mørkt stof kan forklare Zwicky, Rubin og Fords observationer.





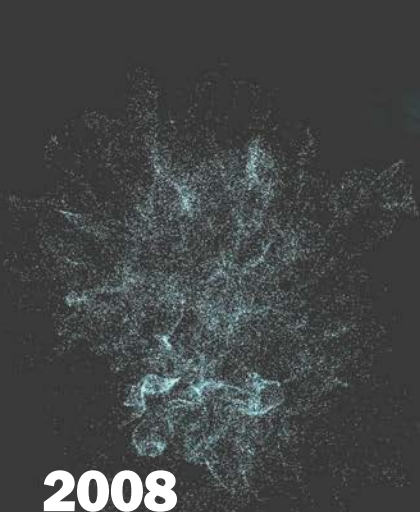
## 1987

Partikeldetektorer under Jordens overflade bygges for at måle mørkt stof. Trods lovende resultater undervejs er det endnu ikke lykkedes endegyldigt at måle mørkt stof.



## 2006

Observation af den såkaldte 'Bullet Cluster Collision', hvor to galaksehobe kolliderer. Observationen giver kraftige indicier for, at mørkt stof eksisterer, og betragtes af nogle som det endegyldige bevis.



## 2008

Russisk-europæisk Pamela-satellit måler overvægt af såkaldte positroner, som kunne være et resultat af to partikler af mørkt stof, der ramler sammen.



## 2010

Eksperimenterne DAMA og CoGeNT, der forsøger at måle rekyl, når mørkt stof kolliderer med natriumiodkrystaller eller germanium, har lovende, men ikke endegyldige resultater.



## 2013

Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) er det hidtil største eksperiment, som fra Den Internationale Rumstation er med til at lede efter spor af mørkt stof.

## I dag

Vi venter stadig på det afgørende bevis for mørkt stof!

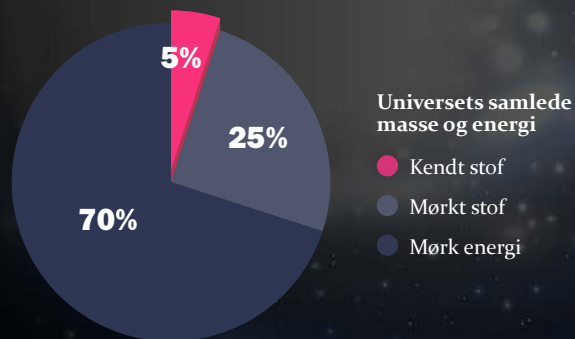
# Mørkt stof ændrer synet på universet

Langt det meste stof i universet er ukendt, og ifølge forskere er mørkt stof en manglende brik. I disse år er der et teknologisk kapløb i gang for at udvikle måder at spore, måle og veje det på.

**H**vad er galakser, hvordan er de dannet, og hvordan vil de udvikle sig? Det er spørgsmål, som forskere verden over kommer tættere og tættere på at besvare. Svarene ser blandt andet ud til at ligge gemt i det mørke stof.

I hver eneste galakse findes der mange stjernesystemer ligesom vores eget solsystem. Men galaksernes opførsel kan langt fra forklares. De roterer med en hastighed, som burde slynge stjernerne i dem fra hinanden – i hvert fald hvis galaksernes masse består af det stof, vi kender og kan observere. For eksempel stjerner og planeter.

Men tilsyneladende rummer galakserne og stjernesystemerne meget mere stof. Vi kender det bare ikke endnu.



Forskerne estimerer, at ud af universets samlede masse og energi består ca. fem procent af kendt stof. Resten er sandsynligvis mørkt stof og mørk energi.

### De grundlæggende naturlove

Midlerne til at undersøge det mørke stof og dets betydning i universet er de grundlæggende fysiske naturlove. De gælder her på Jorden såvel som i universet. Ud fra naturlovene kan forskere blandt andet beregne, hvilken massefylde det mørke stof må have, når de studerer, hvordan stjerner som vores egen sol bevæger sig i rotation i galakser. Naturlovene gør det også muligt at forklare, hvordan det mørke stof må være med til at bøje lyset fra fjerne stjerner.

Tager man det mørke stof med i ligningen, passer pengene pludselig også i forhold til at forklare, hvordan galakser bevæger sig mellem hinanden i såkaldte galaksehobe. Og hvordan den kosmiske baggrundsstråling, der fylder universet og stammer helt tilbage fra 380.000 år efter Big Bang, har nået sin nuværende udbredelse.

### Skridtet fra indicier til viden er eventyrligt

Der er med andre ord overbevisende indicier for, at det mørke stof findes og påvirker himmellegemerne i kraft af sin masse – selv om vi ikke kan observere det direkte. Når det mørke stof ikke kan erkendes gennem sanserne eller med eksisterende måleapparater, skyldes det sandsynligvis, at stoffet ikke udsender lys.

Med undtagelse af neutrinoer vekselvirker alt kendt stof med det elektromagnetiske felt, som H.C. Ørsted som den første beskrev, og derfor udsender det kendte stof lys som elektromagnetisk stråling. Det gør mørkt stof ikke – deraf betegnelsen 'mørkt stof'.

Det mørke stofs eksistens og opførsel må derfor udledes gennem dets tyngdeeffekt på synligt stof og dets eventuelle vekselvirkning via den svage kernekraft – eller helt nye naturkræfter – med kendt stof.

Forskning i det mørke stof er en færd ind på de hvide, ubeskrevne pletter på videnskabens kort. I en grundskole-kontekst betyder det, at undervisning i det mørke stof ligner et eventyr med plads til fantasi, leg, nysgerrighed og tvivl. Ingen kender alle svarene, og derfor kan eleverne få en konkret

oplevelse af den undersøgende forskningsproces med plads til nysgerrighed, motivation og eget initiativ.

### Enkle forsøg illustrerer teorien

En mulig indgang til at gøre teorien om det mørke stof vedkommende og konkret er en række enkle forsøg. Hvis man for eksempel binder en kugle fast i en snor og giver sig til at svinge den rundt, så mærkes det i armen, hvor meget kraft der skal til for at holde kuglen i cirkelbevægelse. Jo hurtigere der svinges, jo mere kraft skal der til. Svinger man hurtigt nok, knækker snoren til sidst. Der er ikke kraft nok i snoren til at holde kuglen fast, samtidig med at rotationsfarten øges. Det er noget tilsvarende, der er på spil i galakserne. Der er ikke tyngdekraft nok fra det synlige stof til at holde stjernerne og gassen i galakserne fast i deres rotationsbaner. Det er der til gengæld, hvis tyngdekraften fra det mørke stof regnes med.

I et andet forsøg kan man sætte sig op på en cykel. Cyklen vælter, hvis man holder stille uden støtte. Men drejes der rundt i pedalerne, sættes hjulene i rotation, og så vælter den ikke så let. Ved hjulets rotation opstår et såkaldt angulært moment (med retning tværs gennem hjulets plan), og det kræver nu et betydeligt kraftmoment at ændre retningen, for eksempel et fald. Det er den samme mekanisme, der gør galakserne stabile.

Begge forsøg dokumenterer fysikkens universalitet. Det er de samme fænomener og lovmæssigheder, vi ser

i naturen igen og igen, blot i forskellige størrelsesordener. Derfor kan viden fra forskning i mørkt stof også anvendes på andre måder i samfundet.

Et par eksempler: De matematiske metoder, som anvendes til at beregne fordelingen af mørkt stof i universet, er de samme, som bruges til at beregne luftstrømme hen over vingerne på en vindmølle – og dermed til at udvikle effektive vindmøller. Og de super-computerteknikker, som anvendes til at forudsige, hvordan mørkt stof

### Måling i rummet af mørkt stof

Partikeldetektoren AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer) blev i 2011 opsendt til Den Internationale Rumstation. Her udfører detektoren præcisionsmålinger af kosmisk stråling for at lede efter mørkt stof og antistof. Detektoren bygger på den idé, at to partikler af mørkt stof en gang imellem støder sammen og annihilere via kræfter til almindeligt stof (for eksempel elektron-positron-par). Det burde kunne detekteres via elektronens elektromagnetiske vekselvirkning med AMS-02.

Data fra målingerne er en kilde til viden for de 56 forskningsinstitutioner, der er med i AMS-02-projektet. Forskningsinstitutionerne søger efter mønstre eller andre ledetråde i de indsamlede data, som kan sandsynliggøre – eller bevise – det mørke stof.

Hvad betyder det, at naturen er åben, og at der er store opdagelser at gøre? Det betyder, at der er eventyr forude. Der venter en kæmpe fortælling her, mener Mads Toudal Frandsen.

fordeler sig i galakserne, svarer til dem, man anvender til at udvikle klimamodeler og forstå klimaudviklingen.

### Forskningen strækker sig til det yderste

Ovenstående forsøg beviser ikke, hvad det mørke stof er, og hvordan det eventuelt interagerer med universet ud over tyngdekraften. Men de illustrerer gennem analogier, hvilken rolle tyngdekraften fra det mørke stof tilsyneladende har som en stabilisator.

Den måde at nærme sig viden ad omveje er ikke unik. Faktisk er det et vilkår ved meget videnskab, at forskere ud fra et ufuldstændigt grundlag forsøger at drage holdbare konklusioner. Gennem gentagne eksperimenter eller i lyset af ny viden kan de så efterhånden be- eller afkræfte konklusionerne. Forskere verden over strækker sig til

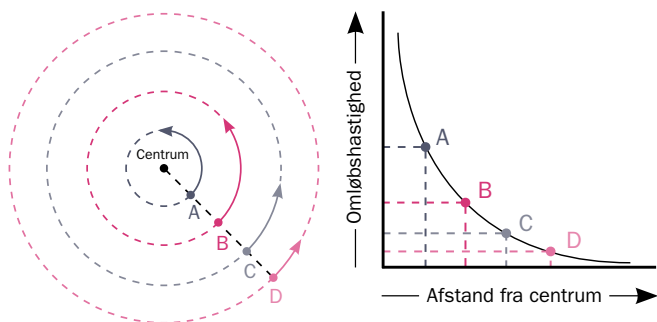
det yderste for at komme fra indirekte til direkte eller konkret viden om det mørke stof og dets partikelegenskaber – det vil sige dets masse og vekselvirkning via ukendte eller kendte naturkræfter som for eksempel den elektrosvage kraft i radioaktivitet. Det handler om at udvikle måleinstrumenter og forsøg, som gør det muligt at registrere vekselvirkning mellem det mørke stof og det kendte stof – for eksempel ved at opfange og måle det minimale rekyl, der efter al logik må være, når mørkt stof rammer andet stof.

### Samfundet kan bruge teknologierne

Sandsynligvis kan mange af de værktøjer, forskerne udvikler til at registrere og beskrive det mørke stof, overføres direkte til erhvervslivet eller til samfundet generelt. Der er aktuelle

eksempler på, at tilgangen til data-analyse i forbindelse med forskningen i mørkt stof har fundet anvendelse på så forskellige områder som i finansverdenen, i kortlægningen af udbredelsen af Covid-19 samt i udviklingen af respiratorer.

Historisk set har indsigter fra partikelfysikken haft enorm betydning for vores moderne teknologier. Eksempler er den halvlederteknologi, som computere er baseret på, og strålings- og partikelterapi i lægevidenskaben. Et tredje eksempel er GPS-systemet, som er baseret på generel relativitetsteori. GPS-systemet virker på betingelse af, at vi korrigerer for, at tiden går anderledes på GPS-satellitterne, end den gør på Jorden. Det skyldes både den hastighed, satellitterne bevæger sig med, og at de mærker en anden tyngdekraft end på Jorden.



**Figurforklaring:** Jo tættere en planet er på solsystemets centrum, jo hurtigere roterer den. Det kan forklares med tyngdekraften. På samme måde skulle en stjernes rotation rundt om en galakses centrum kunne forklares. Men observationer viser, at stjernerne roterer for hurtigt til, at det kan forklares med tyngdekraften fra det kendte stof. Der mangler noget stof, som må dreje med rundt og trække i stjernerne, så deres rotation om galaksens centrum opnår en højere fart.

## Den manglende planet

Fejl er uudgåelige i videnskab. Og godt for det – fejl er nemlig ofte et skridt på vejen mod videnskabelige gennembrud. For eksempel beregnede den franske matematiker Urbain Le Verrier i 1860 ud fra Newtons tyngdelov, at der måtte være en yderligere planet i vores solsystem. Han kaldte planeten Vulcan, men det viste sig, at planeten slet ikke var der.

Det, Le Verrier rent faktisk havde registreret, var et konkret eksempel på, at den klassiske forståelse af tyngdekraften var mangelfuld: Hvis den klassiske forståelse var korrekt, så skulle Vulcan have været der. Men det var teorien og ikke solsystemet, den var gal med. Først 55 år senere blev gåden løst, da Einstein med sin generelle relativitetsteori reviderede forståelsen af tyngdekraften.



## Tre forskningseksempler: Direkte detektion af mørkt stof

Der er flere igangværende forskningsindsatser, som handler om såkaldt direkte detektion af mørkt stof – i modsætning til Alpha Magnetic Spectrometer (AMS 02), der fra Den Internationale Rumstation forsøger at detektere mørkt stof indirekte via elektromagnetisk måling af vekselvirkningen mellem mørkt og kendt stof.

Eksperimenterne med direkte detektion forsøger at måle, når en partikel af mørkt stof fra den vind af partikler, der konstant "blæser" henover Jorden som følge af Jordens rotation gennem galaksen, kolliderer med en detektor. 'Kollision' skal forstås som en vekselvirkning via andre kræfter end tyngdekraften, for eksempel den elektrosvage kraft i radioaktivitet. Tre eksempler på forskning af denne type er:

Eksperimenterne har endnu ikke med sikkerhed detekteret det mørke stof direkte. Men de indsamler løbende viden om mulige fejlkilder, og hvad der kan måles og hvordan. Samtidig genererer eksperimenterne viden om neutrinoer – den kendte partikel, der minder mest om mørkt stof.

---

### 1. DAMA

Siden 1990'erne har DAMA-eksperimentet målt et signal, der svarer præcist til, hvad forskerne forventer, når partikler af mørkt stof kolliderer med detektoren. Eksperimentet viser blandt andet, at signalet varierer med årstiden på en måde, som passer med Jordens rotation om Solen.

Læs mere her: [www.nature.com/articles/d41586-019-00865-9](http://www.nature.com/articles/d41586-019-00865-9)

---

### 2. CoGeNT

I 2010 begyndte CoGeNT-eksperimentet at observere det samme som DAMA, og det lykkedes at vise, at de to eksperimenters resultater stemte overens. Mange så resultatet som afgørende i jagten på at beskrive det mørke stof, men CoGeNT-eksperimentets resultater viste sig fejlbehæftede.

Læs mere her: [www.nature.com/news/2010/100226/full/news.2010.97.html](http://www.nature.com/news/2010/100226/full/news.2010.97.html)

---

### 3. XENON1T

I de seneste år har XENON1T-eksperimentet været førende inden for direkte detektionseksperimenter, og i 2020 er der fremlagt resultater fra eksperimentet, der kan ses som et nyt spor af mørkt stof. Mulige fejlkilder er dog ikke på nuværende tidspunkt udelukket – for eksempel kan resultaterne skyldes en ukendt radioaktiv kilde i detektoren.

Læs mere her: [www.xenon1t.org/](http://www.xenon1t.org/)

# Det mørke stof kan tage eleverne med på eventyr

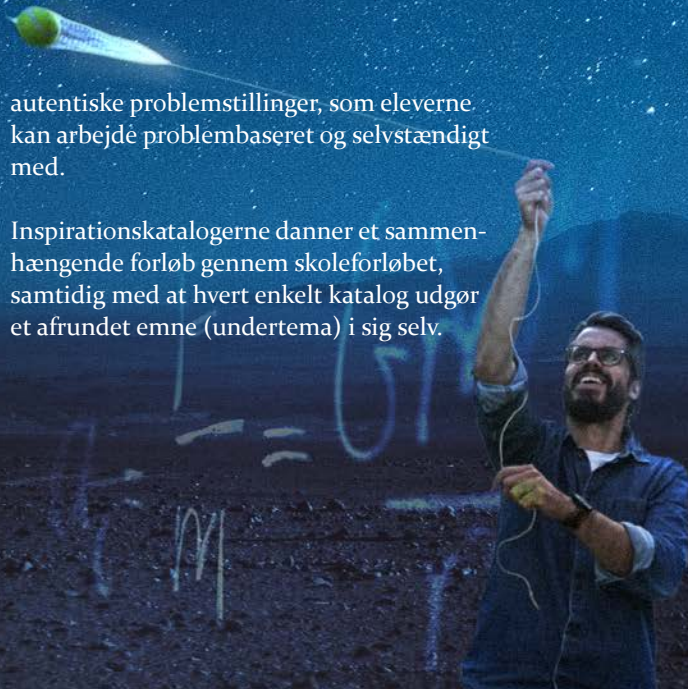
Det mørke stof er allestedsnærværende, og partikel- og astrofysiker Mads Toudal Frandsen ser det som et eventyr, der under overskriften 'Det store ukendte' har potentiale til at begejstre elever i grundskolen.

**T**emaet 'Det store ukendte' kredser om mørkt stof, som er usynligt og kan forekomme abstrakt. Men seks inspirationskataloger, der er udarbejdet i forlængelse af dette temamagasin, giver naturfagslærere og -teams konkrete forslag til at gennemføre undervisning i temaet.

De seks inspirationskataloger er målrettet forskellige klassetrin og præsenterer

autentiske problemstillinger, som eleverne kan arbejde problembaseret og selvstændigt med.

Inspirationskatalogerne danner et sammenhængende forløb gennem skoleforløbet, samtidig med at hvert enkelt katalog udgør et afrundet emne (undertema) i sig selv.





# Klassetrin



## Progression og den røde tråd

Figuren illustrerer temaets progression gennem inspirationskatalogerne, der dækker hele skoleforløbet fra 1. til 9. klasse. Figuren viser dermed også den faglige røde tråd i forhold til temaet.

Inspirationskatalogernes undersøgelses- og aktivitetsforslag har progression fra det nære og lokale i indskoling og til samfundsmæssige og globale perspektiver i udskoling. Graden af problembasering i forslagene øges gennem skoleforløbet, ligesom der sker en udvikling fra det be-

skrivende over mere konkrete fænomener i indskoling og på mellemtrinnet mod et højere abstraktionsniveau i udskoling.

Gennem skoleforløbet får eleverne forudsætninger for at arbejde med mørkt stof - først gennem kropslige erfaringer med usynlige kræfter og derefter gennem nysgerrige undersøgelser af skalaforhold, lys og rotation, inden forløbet giver rum til at arbejde med komplekse spørgsmål om fejl i videnskaben og overvejelser om ekstraterrestielt liv.

## Det mørke stof åbner for undren og store spørgsmål

På tværs af de seks inspirationskataloger løber fem røde tråde. Det er store spørgsmål eller erkendelser, som er essentielle for forskning i det mørke stof, og som samtidig kan være kilde til undren blandt eleverne. En undren, der åbner døren til eventyret om alt det, menneskeheden endnu ikke ved.

### 1. Stof og lys

Forskning i det mørke stof peger på, at vi ved ganske lidt om, hvad universet består af. Stof og lys er grundelementer, og virkeligheden er opdelt i synligt og usynligt for vores øje. Det rejser et spørgsmål om vores virkelighedsforståelse. Menneskeskabt teknologi afgør, hvad vi kan erkende, men udtømmer ikke virkeligheden. Vi kan for eksempel se elektromagnetisk stråling som lys, mens vi "overser" andre (for os) usynlige energibølger.

### 2. Usynlige kræfter

Noget holder sammen på det synlige stof i universet – og der er kraftige indicier for, at det er det mørke stof. Tyngdekraften spiller også ind. Vi kender ikke forholdet mellem de usynlige kræfter – måske har vi endnu ikke fuldt begreb om, hvilke usynlige kræfter der er. Det betyder, at et blik ud i universet er et blik ind i det store ukendte.

### 3. Rotation i stort og småt

Indiciene for det mørke stofs eksistens kommer blandt andet fra erkendelsen af, at galaksers og galaksehobes rotation ville slynge stjerner og galakser fra hinanden, hvis ikke det mørke stof holdt dem sammen. Cirkelvægelser er også centrale i dagliglivet, når cykelhjulet roterer og skaber stabil balance, eller når vinden blæser over vindmøllevinger og skaber rotation – og energi. Sammenhængen mellem rotation, masse og energi er et prisme at se den fysiske virkeligheden gennem.

### 4. Kosmologisk skala

Afstande og tid måles på en astronomisk skala, blandt andet ud fra hvordan roterende samlinger af store masser af stof ændrer energi og fotonbaner fra lyskilder. Leg med størrelsesforhold kan skabe fascination af det største og det mindste – og kan gennem sanselige oplevelser give krop til pointerne om, hvordan masse, rotation og energi hænger sammen.

### 5. Fejl fremmer forskning

Det mørke stofs forskningshistorie er fuld af fejl – hypoteser, der er blevet vendt, drejet og forkastet eller forfintet til nye hypoteser og gennembrud. Alle fejlene rummer læring, som har bragt forskningsfeltet fremad skridt for skridt. Det faktum åbner for at arbejde med en positiv fejlkultur og er med til at give rum til nysgerrighed og fantasi, som kan føre til uanede indsigter, uanset om fejlene kommer før gennembruddet.



Meget tyder på, at det mørke stof spiller efter helt andre regler, og at vi skal opfinde nye måder at detektere det på. Det betyder samtidig, at der er et stort behov for forskere, der med kreativitet og fantasi kan bidrage til tankepring, mener Mads Toudal Frandsen.



## Ud af klasselokalet

Temaet om det mørke stof inviterer til at gå ud af klasselokalet og lære gennem leg. Leg kan indgå som erkendelsesform med varierende grad af elevstyring, ikke kun i indskoling, men gennem hele skoleforløbet med:

- Undersøgelser af karruselens usynlige kræfter på legepladsen
- Leg med usynlige sammenstød i sorte bokse (indfaldsvinkel/udfaldsvinkel)
- Selvbyggede roterende exoplanetmodeller til måling af lysfald
- Fællesfaglige undersøgelser af forudsætninger og evidens for liv, dyrkning, vækst, digitalt 3D-månebase-design og afstandsvejskilte gennem universets stor-skala.

En anden mulighed for at bringe undervisningen ud af klasselokalet er at samarbejde med lokale virksomheder eller foreninger, der anvender beslægtet teknologi eller beror på de samme fysiske love, som kendes fra forskningen i det mørke stof. Det kan for eksempel være en vindmølevirksomhed, hvor cirkelbevægelse og viden om elektromotorisk kraftoverførsel til energiforsyning er centralt. En LED-/lysvirksomhed eller en vandkraftproducent.

Inspiration til konkrete besøg eller samarbejder med virksomheder kan fås ved at kontakte nationalt videnscenter for skole-virksomhedssamarbejde, på Tektanken.dk. Men mindre kan også gøre det – samarbejde med en forælder, der arbejder med et relevant område, kan være præcis lige så givende.

## Udvikling af inspirationsmaterialerne

Der udvikles i alt 10 sæt inspirationsmaterialer om i alt 10 naturvidenskabelige temaer, herunder dette om 'Det store ukendte'. De øvrige temaer dækker over blandt andet hav- og klimaforskning, vira i dyreverden, bæredygtigt byggeri, rent ferskvand, biodiversitet, genetik og sygdomme, det teknologiske samfund og rumforskning.

I hvert sæt indgår der et temamagasin, en film og seks inspirationskataloger med inspiration til undervisning i det pågældende tema på forskellige klassetrin. Fagudviklere fra professionshøjskoler har udviklet indholdet på baggrund af forskeres input og i samarbejde med arbejdsgrupper med lærere.

Det er motiverende for eleverne at vide noget om, hvordan forskere arbejder. Der er mange i dagens grundskole, der ikke hører om mørkt stof, så det er rigtig godt at inddrage ny viden. Det kan åbne øjnene for nogle elevers interesse for naturfag. Mørkt stof er også meget nyt for os undervisere, og det er svært tilgængeligt. Men jeg synes, at der er kommet gode undervisningsaktiviteter ud af det.

Naturfagslærer Kim Christiansen,  
C. la Cours Skole

Mørkt stof kan være svært at gøre praksisnært og trække ind i elevers hverdagsliv. Men de kan lægge sig ned en tidlig vintermorgen og kigge på den mørke himmel. Så skal de forestille sig, at de ligger med ryggen klistret op mod undersiden af jordkloden og kigger ned på himlen. Der begynder de så at lære om mørkt stof og usynlige kræfter som tyngdekraften.

Fagudvikler Simon Olling Rebsdorf,  
VIA University College

# Seks inspirationskataloger om mørkt stof

De seks inspirationskataloger, som didaktiserer Mads Toudal Frandsens aktuelle forskning, er tilrettelagt med henblik på de naturfaglige kompetenceområder og Fælles Mål:



**1.-2.  
klasse**

## Usynlige kræfter

**Kompetenceområde i fokus:**  
Modellering

**Fælles Mål:**  
Færdigheds- og vidensområderne mennesket (sanser); vand, luft og vejr; modellering i naturfag i 2. klasse.



**5.-6.  
klasse**

## Stjernelys

**Kompetenceområde i fokus:**  
Undersøgelse

**Fælles Mål:**  
Færdigheds- og vidensområderne mennesket (sanser); stof og energi; undersøgelser i naturfag i 6. klasse.



**3.-4.  
klasse**

## Størst og mindst

**Kompetenceområde i fokus:**  
Undersøgelse

**Fælles Mål:**  
Færdigheds- og vidensområderne Jorden og solsystemet (livs begyndelse); naturen lokalt og globalt; undersøgelser i naturfag i 4. klasse.



**7.**  
klasse

## Fejl gør os klogere

**Kompetenceområde i fokus:**  
Kommunikation

**Fælles Mål:**

**Fysik/kemi:** Jorden og universet; produktion og teknologi; partikler; bølger og stråling; kommunikation i naturfag.

**Biologi:** stof og kredsløb; økosystemer; kommunikation i naturfag.

**Geografi:** jordkloden og dens klima (klimamodeller); Jorden og universet (den dynamiske jord – pladetektonik); kommunikation i naturfag.



**8.**  
klasse

## Alt drejer rundt

**Kompetenceområde i fokus:**  
Modellering

**Fælles Mål:**

**Fysik/kemi:** Jorden og universet (kræfter og bevægelser, bevægelse, universets udvikling, simuleringer); modellering i naturfag.

**Biologi:** celler; mikrobiologi og bioteknologi (cellers vækstbetingelser, sollys); modellering i naturfag.

**Geografi:** jordkloden og dens klima (døgnet, jordens rotation, tidevand, ekliptika, længde og breddegrader); modellering i naturfag.



**9.**  
klasse

## Er vi alene? Betingelser for liv

**Kompetenceområde i fokus:**  
Undersøgelse

**Fælles Mål:**

**Fysik/kemi:** Jorden og universet; stof og kredsløb (betingelser for liv); partikler; bølger og stråling; energiomsætning; undersøgelser i naturfag.

**Biologi:** evolution; økosystemer; celler; mikrobiologi og bioteknologi; undersøgelser i naturfag.

**Geografi:** jordkloden og dens klima (geologisk udvikling); exoplaneter; undersøgelser i naturfag.

### Læs mere ...

De seks inspirationskataloger er struktureret ud fra en fagdidaktisk ramme, som understøtter systematisk planlægning og udførelse af undervisningen. Rammen er grundigt udfoldet i 'Vidensnotat om kompetenceorienteret naturfagsundervisning'.

En proces for at arbejde i naturfagsteamet med inspirationskatalogerne til temaet 'Det store

ukendte' om mørkt stof ud fra den fagdidaktiske ramme er beskrevet i 'Udviklingsredskab til kompetenceorienteret naturfagsundervisning til naturfagsteams'.

Begge dele kan sammen med de seks inspirationskataloger hentes på [emu.dk/grundskole/naturvidenskabsstrategien](http://emu.dk/grundskole/naturvidenskabsstrategien).

# Du står med en del af en samlet videnspakke

Hent pakkens indhold her: [emu.dk/grundskole/naturvidenskabstrategien](http://emu.dk/grundskole/naturvidenskabstrategien)



Bokssæt med 10 temamagasiner



60 inspirationskataloger (10 temaer til seks klassetrin)

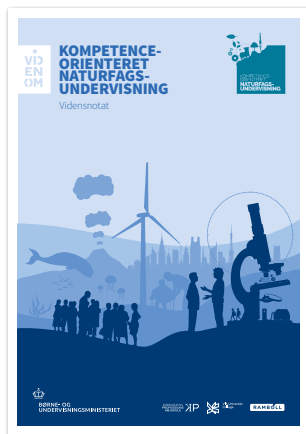


## 10 film i lang og kort version

Forskerne fra de 10 temamagasiner præsenterer deres naturvidenskabelige forskning.



Podcasts



**Vidensnotat**  
12 sider.



**Planlægningsredskab**  
Otte sider til naturfagslærere og vejledere i grundskolen.



**Eksemplarisk fællesfagligt forløb**  
16 sider til naturfagsteams og -lærere.



**Udviklingsredskab**  
Fire sider til skoleledelserne.



**PowerPoint-præsentation**  
Præsentation af de vigtigste pointer fra vidensnotatet.



**Video**  
Speed drawing.



Udarbejdet af Rambøll Management Consulting,  
Københavns Professionshøjskole og VIA University  
College for Børne- og Undervisningsministeriet.

Eftertryk med kildeangivelse er tilladt.

**Design & illustrationer**  
Campfire & co

**Fotos**  
B2Bfilm ApS

**ISBN**  
87-603-3281-6 (web udgave)  
87-603-3282-4 (trykt udgave)



**BØRNE- OG  
UNDERVISNINGSMINISTERIET**