

# På sporet af det mørke stof

Det er mere end 80 år siden, at fysikere indså, at der er meget mere masse i Universet, end man umiddelbart kan se. Endnu har vi ikke afsløret, hvad dette "mørke stof" er for noget, men en eksperimentel påvisning af det ligger måske ikke langt ude i fremtiden.

I 1933 studerede den schweizisk-amerikansk astrofysiker Fritz Zwicky en klynge af galakser kaldet Coma. Ved hjælp af den velkendte Dopplertechnik kunne han udlede hastigheden af de individuelle galakser inden for klyngen. Ved at bruge en sætning i den klassiske mekanik, der forbinder den kinetiske energi af et bundet system med dets gravitationelle potentielle energi (virial-sætningen), gjorde Zwicky en overraskende opdagelse: Den synlige masse af galaksehoben var ikke nok til at holde den sammen. Galaksehoben havde tilsyneladende brug for en hel del ekstra – og usynlig – masse for at holde sammen på trosserne.

Siden har en række andre observationer indirekte bekræftet eksistensen af *mørkt stof*, som er blevet betegnelsen for “den manglende masse af universet”, som Zwicky observerede. Mørkt stof er i dag et varmt emne indenfor både den teoretiske og eksperimentelle forskning. Det er dog udelukkende påvist gennem tyngdeeffekter. Derfor arbejder en lang række eksperimentelle kollaborationer ihærdigt på at afsløre, hvilke partikelegenskaber det hypotetiske mørke stof besidder. Det står klart, at der kræves uhyre følsomme detektorer for at finde det mørke stof, men grænserne for eksperimentel formåen rykkes hurtigt, og muligvis ligger opdagelsen af mørkt stof lige rundt om hjørnet. Dette vil være et stort fremskridt i vores bestræbelser på at forstå strukturen af Universet og dets udvikling fra Big Bang til i dag. Det vil også kaste lys over, hvordan naturen fungerer på det mest grundlæggende niveau af elementarpartikler. En forståelse af mørkt stof kan måske også vise sig at være nøglen til en forening af de fundamentale kræfter.

### Ingen oplagte kandidater

Hidtil er eksistensen af mørkt stof udelukkende påvist via den gravitationelle virkning, som mørkt stof har på galakser og galaksehobe. Men hvad er mørkt stof? Partikelfysikkens såkaldte *standard-model* tilbyder kun én partikel, der i princippet kan spille rollen som mørkt stof, nemlig neutrinoen.

← Foto af den centrale del af galaksehoben Coma. Det var studier af hastigheden af de enkelte galakser i denne klynge, der ledte astronomen Fritz Zwicky til at konkludere, at der tilsyneladende manglede masse i universet. Billedet er lavet ved at sammensætte observationer foretaget med hhv. synligt lys og infrarødt lys.

NASA/JPL-Caltech/L.Jenkins (GSFC)

→ I lighed med, at det ved hjælp af acceleratoren LHC ved CERN er lykkedes forskerne at påvise Higgs-partiklen, vil det i princippet også være muligt at afsløre partikler af mørk i eksperimenterne. Figuren viser, hvordan data fra kollisionerne (her mellem to protoner i den såkaldte CMS-detektor) tager sig ud for forskerne.

Illustration: CERN

Neutrinoer er notorisk svære at observere, fordi de ikke har en elektrisk ladning og kun meget svagt vekselvirker med stof. Men neutrinoer bevæger sig med relativistiske hastigheder, dvs. tæt på lysets hastighed, og hvis mørkt stof bestod af neutrinoer, ville de simpelthen udvaske de små strukturer i Universet. Desuden har neutrinoer den egenskab, at de ikke kan være i samme kvantetilstand. Det medfører, at den estimerede mængde af mørkt stof i dværggalakser er sådan, at hvis mørkt stof består af neutrinoer, ville de simpelthen ikke passe inde i disse dværggalakser.

Der er også den mulighed, at mørkt stof udgøres af sorte huller, kompakte stjerner eller store planeter. Denne forklaring er dog heller ikke særlig attraktiv. Observationer med en teknik kaldet gravitationslinsning tyder på, at sådanne objekter ikke kan udgøre mere end ca. 20 % af mørkt stof. Men hvordan kan vi afklare det mørke stofs natur? Der er i øjeblikket tre forskellige eksperimentelle tilgange til at undersøge mørkt stof, som med et rapt engelsk rim kan sammenfattes “*make it, shake it or break it*”. Lad os betragte disse tre tilgange i lidt mere detalje.

### At lave mørkt stof

Ved Large Hadron Collider (LHC) ved CERN accelererer forskerne protoner op til ekstreme energier og bringer dem til at kolliderer med hinanden. Forskerne studerer produkterne af disse kollisioner i håbet om at opdage ny fysik og nye partikler. Hvis der er energi nok i kollisionen, vil der i princippet kunne dannes et par af en partikel af mørkt stof og en partikel af anti-mørkt stof i eksperimenterne ved CERN. Problemet er så, at mørkt stof som nævnt vekselvirker meget svagt med almindeligt stof, og derfor vil det være meget svært at måle, selvom det faktisk bliver produceret i eksperimenterne. Men det er der heldigvis råd for!

Vi kender energien af protonerne, før de kolliderer, og vi kan måle den totale energi af alle de produkter, der kommer ud af kollisionen – med und-

Forfatterne



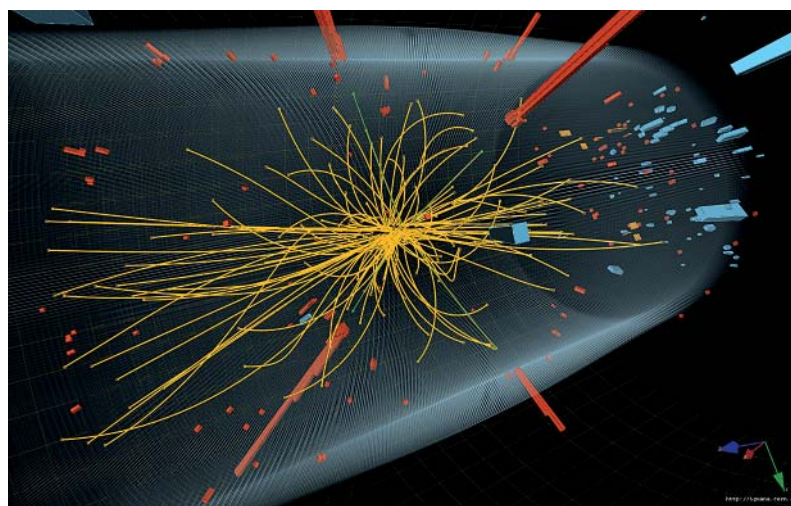
Chris Kouvaris er lektor  
kouvaris@cp3.dias.sdu.dk



Niklas Grønlund Nielsen  
Er ph.d.-studerende  
ngnielsen@cp3.dias.sdu.dk

Begge ved grundforskningscenteret CP<sup>3</sup>-origins, Syddansk universitet

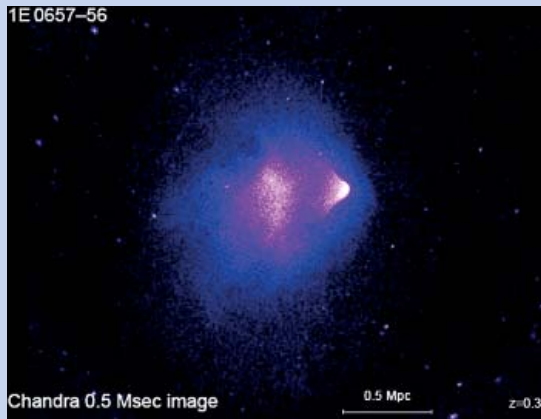
Forfatterne forsker primært i at udvikle teoretiske modeller for mørkt stof og i at opfinde metoder, hvormed modellerne kan afprøves.



## Indicier på eksistensen af mørkt stof

Røntgenfoto af kugleklyngen taget af Chandra-rumteleskopet.

Foto: Nasa



Observationer af galaksehobe viser, at den synlige masse ikke er nok til at holde dem sammen. Det viste Fritz Zwicky allerede i 1933. Senere påviste astronomen Vera Rubin i 1970, at hastigheden af stjerner, der roterede omkring centrum af vores nabogalakse Andromeda-galaksen, tilsyneladende ikke følger newtonsk dynamik. Observationerne kan forklares med, at mørkt stof bidrager med ekstra masse – og dermed tyngkraft.

Ud fra spektret af den kosmiske mikrobølge-baggrundsstråling kan man udlede mængden af baryonisk stof i Universet

(dvs. de almindelige atomer, som alt stof, vi kan "se", er opbygget af) og den totale mængde stof. Hvis man trækker mængden af baryonisk stof fra den totale mængde stof, giver det en rest. Denne rest er et skøn over mængden af mørkt stof.

Numeriske simuleringer af strukturerne i Universet viser, at de galakser, vi kan observere i dag, ikke ville være opstået hvis der kun fandtes lysende, baryonisk stof. Det kræver med andre ord, at der er ekstra materiale til stede – dvs. mørkt stof – for at forklare de fine strukturer i Universet.

Kugleklyngen (Bullet Cluster) er en klynge af galakser, der består af to mindre klynger, der er kollideret med hinanden. Med røntgenspektroskopi kan man afsløre det område i dette system, hvor det baryoniske stof og leptoner (fx elektroner) er koncentreret, da dette stof udsender røntgenstråler. Med en anden teknik kaldet "gravitationslinsning" kan man lokalisere det område, hvor det meste af massen af systemet er koncentreret. Og det har vist sig, at disse to områder ikke er det samme. Det betyder, at det meste af massen er placeret i den del, der ikke producerer mange røntgenstråler. Sammenstødet mellem de to galakseklynger har med andre ord ført til, at mørkt stof og baryonisk stof mere eller mindre er blevet adskilt.

tagelse af det, som udgøres af neutrinoer og mørkt stof. Ethvert underskud i energi mellem situationen før og efter kollisionen kan altså simpelthen tilskrives enten mørkt stof og/eller neutrinoer.

Da vi ved præcis, hvor stærkt neutrinoer vekselvirker med stof, kan vi regne ud, hvor meget energi der mangler på grund af partikler af mørkt stof produceret i kollisionen.

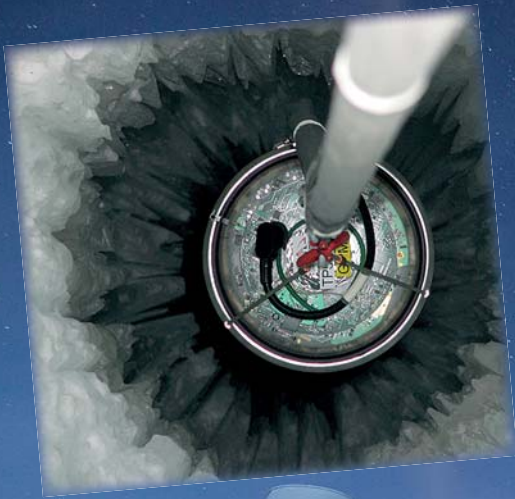
Normalt er man i LHC-eksperimenterne på udkig efter unikke signaler, hvor kollisionen har skabt en enkelt foton med meget høj energi eller efter en såkaldt jet (en hel kaskade af energirige partikler langs en bestemt retning) med en ubalance mellem energi før og efter kollisionen. Hidtil har forskerne dog ikke observeret noget ud over det normale. Det kan enten betyde, at der simpelthen ikke er energi nok i kollisionerne til at skabe et partikelpar af mørkt stof og anti-mørkt stof, eller at sandsynligheden for at skabe et sådant partikelpar er så lille, at vi endnu ikke har set et signal i det indsamlede data.

### At se "rystelserne" fra mørkt stof

Der er store mængder mørkt stof i vores galakse, og derfor burde det være en almindelig begivenhed, at partikler af mørkt stof passerer Jordens over-

flade. I stedet for selv at producere mørkt stof, kan man derfor forsøge at observere en direkte kollision mellem en partikel af mørkt stof og en atomkerne i en detektor. Hvor sandsynligt det er, afhænger af tre faktorer: 1) hvor hyppigt partikler af mørkt stof faktisk besøger Jorden 2) styrken af vekselvirkningen mellem en partikel af mørkt stof og atomkerne i detektoren og 3) eksponering af detektoren – dvs. hvor stor detektoren er, og hvor længe, vi venter på en begivenhed.

Da partikler af mørkt stof netop ikke vekselvirker kraftigt med almindeligt stof, kan vi ikke forvente at se mange begivenheder i en jordbaseret detektor. Og så er der også et andet problem: Detektorer for mørkt stof registrerer "rekyl-begivenheder", dvs. hvor en partikel af mørkt stof slås tilbage, når den kolliderer med en atomkerne. Men gammastråling, elektroner og neutroner fra kosmiske stråler, naturlig radioaktivitet og anden baggrundsstråling fra menneskelige aktiviteter kan producere tilsvarende signaler i detektoren og helt overskygge et signal fra mørkt stof. Det er grunden til, at detektorerne placeres i gamle miner et par kilometer under jorden. De tykke klippelag afskærmer det meste af strålingen, så det kun er neutrinoer og mørkt stof, der kan nå detektoren.



Eksperimentet Icecube er placeret ved Amundsen-Scott-stationen i Antarktis og skal bl.a. lede efter signaler fra mørkt stof. Under bygningen findes selve detektoren dybt nede i isen, og den består af 86 lodrette "streng" hver med 60 sensorer. På det andet foto ses en af disse sensorer i færd med at blive sænket ned i borehullet.

Fotos: Bygning: Felipe Pedreros, IceCube/NSF  
Sensor: IceCube/NSF

Hidtil er det dog ikke lykkedes at måle mørkt stof endegyldigt i underjordiske detektorer. Det kan der være flere grunde til. Hvis partikler af mørkt stof er tunge, vil der kun være få af dem, og derfor vil strømmen af mørkt stof, der passerer gennem Jorden være lille. Det vil være håbløst at forsøge at opdage en type partikel, der fx kun passerer Jordens overflade en enkelt gang pr. årti. Hvis partikler af mørkt stof omvendt er for lette, kan de være lige så svære at opdage. Selvom der ankommer masser af dem til Jorden hvert eneste sekund, vil de medbringe så lidt kinetisk energi, at det vil være meget svært – måske umuligt – for dem at udløse detektoren.

Der er selvfølgelig også den mulighed, at partikler af mørkt stof vekselvirker så svagt, at vores detektorer ikke er følsomme nok.

Under alle omstændigheder er det et tålmodighedsspil – jo længere tid, vi venter, jo større er sandsynligheden for at se en partikel. Men vi har selvfølgelig ikke uendelig mængder af tid til rådighed! Snart vil følsomheden af detektorerne være så fin, at de underjordiske detektorer vil blive overvældet af signaler fra neutrinoer. Derfor vil det blive nødvendigt med nye strategier, der kan skelne mellem signalet fra en neutrino og en partikel af mørkt stof i detektorerne.

### At se mørkt stof gå i stykker

En tredje måde at måle mørkt stof på er at observere den indirekte signatur af mørkt stof, der tilintetgøres eller henfalder. Visse modeller for mørkt stof tillader, at to partikler af mørkt stof mødes og "udsletter" hinanden, hvorved der produceres mere almindelige partikler, der potentielt kan registreres på Jorden.

Der er også den mulighed, at mørkt stof kan henfalde til almindelige partikler. I et sådant scenarium må henfald af mørkt stof dog være en sjælden begivenhed. Mørkt stof må nødvendigvis have en levetid, der er længere end Universets alder, for ellers ville en for stor del af det mørke stof på nuværende tidspunkt være henfaldet.

Der er to steder i vores galakse, hvor tilintetgørelse og henfald af mørkt stof kan forekomme med højere rate i forhold til andre steder: i centrum af Mælkevejen og i Solen. I centrum af Mælkevejen forventes det, at der er en større tæthed af mørkt stof, hvorfor det her er mere sandsynligt, at partikler mødes og tilintetgøres. På grund af højere tætheder vil henfald af mørkt stof også være højere der. Hvad angår Solen kan partikler af mørkt stof blive fanget i Solens tyngdefelt, når de krydser Solens overflade. Partiklerne vil blive koncentreret i Solens kerne, hvilket vil betyde en større rate af begivenheder med mørkt-stof-tilintetgørelse og henfald her.

Flere eksperimenter forsøger at opdage sådanne indirekte signaler fra mørkt stof: røntgenteleskoper, antipartikel-detektorer på satellitter og neutrino-teleskoper på Jorden. Et af de mest imponerende eksperimenter er *IceCube*, som er placeret ved sydpolen to kilometer under isen. Et af formålene med dette eksperiment er at observere potentielle produkter af tilintetgørelse eller henfald af mørkt stof og genskabe den indkommende partikels vej mod Jorden.

### Andre veje til opdagelse

Der er mange andre måder, at mørkt stof kan give anledning til signaler fra verdensrummet, som vi kan observere. Flere typer af kandidater til mørkt stof kan således opvarme, ødelægge eller ændre egenskaberne af almindelige stjerner. Derfor kan vi med astrofysiske observationer indkredse mulige signaler fra mørkt stof eller måske endda finde den "rygende pistol".

Alternativt kan det være, at den "mørke sektor" er meget mere kompliceret, end forskere normalt antager. Fx kunne mørkt stof bestå af mange slags partikler i stedet for én. Der kunne endda være nye naturkræfter, som medierer vekselvirkninger udelukkende imellem mørkt stof. Hvis mørkt stof er asymmetrisk (dvs. der er flere mørke partikler end mørke antipartikler) kunne strukturen af mørkt stof være meget indviklet. Man kunne forestille sig, at der eksisterer "mørke stjerner", som ikke udsender fotoner. Mørke stjerner ville i princippet kunne observeres, selv hvis mørkt stof kun vekselvirker

### Konkurrerende teorier

Mørkt stof er i dag den mest realistiske forklaring på den "ekstra" tyngdekraft, som lysende stof i Universet ikke kan gøre rede for. Der findes dog andre forklaringer. Et prominent eksempel er MoND (Modificeret Newtons Dynamik). I MoND forestiller man sig, at tyngdekraften er Newtonsk på små skalaer, men ændrer sig på galaktiske afstande. Mørkt stof er dog i vore øjne den mest overbevisende forklaring, fordi den i modsætning til MoND samtidigt forklarer tyngdeeffekter på helt forskellige skalaer. Derudover forklarer mørkt stof smukt den observerede gravitationslinsning i forbindelse med Kugleklyngen (Bullet Cluster), som MoND-teorier ikke kan forklare.

med almindeligt stof gennem tyngdekraften. Det skyldes, at de kunne udsende gravitationel stråling gennem de såkaldte tyngdebølger. Tyngdebølger er dog meget svære at observere, og kun for nylig er de blevet observeret af LIGO-eksperimentet.

Vi har i de seneste år blandt andet arbejdet på at klassificere hvilke mørke stjerner, forskellige modeller for mørkt stof kan give anledning til. Den del af vores forskning bygger på håbet om, at mørkt stof er asymmetrisk af karakter, og at en mørk stjerne opdages i fremtiden. Opdagelsen af en sådan stjerne ville afsløre enormt meget omkring egenskaberne af det mørke stof. ■

### Videre læsning

Populære artikler  
Signe Riemer-Sørensen: Jagten på det mørke stof. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 5/2007

Francesco Sannino: Universets lyse og mørke sider. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 5/2009

Rune Elgaard Mikkelsen, Ulrik Ingerslev Uggerhøj: En gigantisk isterning – lysglimt fra Antarktis dyb fortæller om kosmos. *Aktuel Naturvidenskab* 4/2013

### Videnskabelige artikler

Chris Kouvaris & Niklas Grønland Nielsen: Asymmetric Dark Matter Stars. *Phys.Rev. D92* (2015) no.6, 063526

Joshua Eby, Chris Kouvaris, Niklas Grønland Nielsen, L.C.R. Wijewardhana: Boson Stars from Self-Interacting Dark Matter. *JHEP* 1602 (2016) 028

# Announce