

Mørkt stof – vi ved så meget og dog så lidt

Af Steen H. Hansen, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman, Anja C. Andersen, Johan Fynbo, Jens Hjorth, Sune Toft og Darach Watson, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Eksistensen af mørkt stof er veletableret gennem en lang række astrofysiske observationer på størrelsesskalaer fra de mindste dværggalakser til hele universet. Vi ved dog stadig overraskende lidt om den partikel, der udgør det mørke stof. Vi tilbyder her et overblik over hvor meget (eller hvor lidt) vi rent faktisk er sikre på, såsom hvad massen af den mørke partikel og dens vekselvirkninger med andre partikler er, og vi fortæller om, hvordan vi forsøger at fravriste den mørke partikel dens hemmeligheder.

Kan vi bortforklare det mørke stof?

Der er ingen tvivl om, at der findes omkring 6 gange så meget (masse bundet i) mørkt stof som i almindelige partikler. Når vi her taler om “almindelige partikler”, så inkluderer vi alting som stjerner, varm og kold gas, kaffeborde, neutroner, sutteflasker, osv. I helt gamle

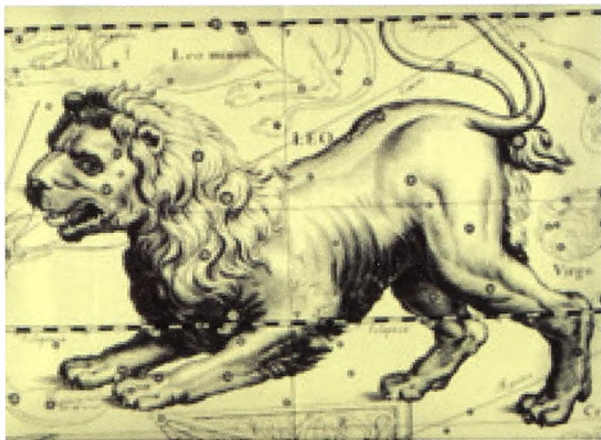
dage, altså for mere end 5 år siden, var der stadig folk, der alvorligt talte om muligheden for at undgå mørkt stof, hvis man til gengæld accepterede at modificere tyngdeloven. Med de smukke observationer af galaksehoben “Bullet cluster” (se figur 1) er der ingen, der formår at bortforklare mørkt stof længere.



Figur 1. Bullet cluster er observeret både gennem den røntgenudstrålende varme plasma (rød), gennem synligt lys (gult og hvidt) som måler stjernerne og galakserne, og ved linsemetoden (blå) som måler massen af alt stof. Den røde blob til højre minder lidt om en kugle, “bullet”, der er skudt igennem noget materiale. Observationen viser, at omkring 90 % af massen (blå) ligger rumligt forskudt i forhold til den varme gas (rød). Denne rumlige forskydning kan ikke forklares ved at modificere Newtons gravitationslov, og er derfor et af de mest direkte beviser på eksistensen af mørkt stof [1]. I dag har vi målt omkring fem tilsvarende strukturer.

Uafhængige observationer, af den kosmiske baggrundsstråling eller af de lette grundstoffer såsom helium, viser at mørkt stof ikke kan være sammensat af grundstoffer fra det periodiske system, eller andre kendte partikler fra partikelfysikkens standardmodel. Vi har altså med noget helt ny fysik at gøre, hvilket har fået feltet "astropartikelfysik" til at eksplodere over det sidste årti.

Vi har fundet mørkt stof på stort set alle kosmologiske skalaer. Det er helt fra de mindste galaktiske strukturer vi kender, nemlig dværggalakser, til hele universet. I de små dværggalakser som typisk er nogle tusind lysår store (Solen ligger omkring 25 lysår fra Mælkevejens centrum) kan vi måle position og hastighed af de meget gamle stjerner (se figur 2). Når vi har målt stjernernes dynamik, så er det ligetil at finde ud af hvor stor total masse en dværggalakse har. Vi finder, at der er fra 20 til 500 gange så meget mørkt stof som almindelige partikler i disse små galakser, der er satellitter til Mælkevejen.



Figur 2. Dværggalaksen Leo II ligger i stjernebilledet Løven. Det er en lille satellitgalakse til vores Mælkevej, der ligger omkring 690.000 lysår fra os. De omkring 80.000 målte stjerner ser lidt småkedelige ud, men de er sfærisk fordelt og i dynamisk ligevægt. Vi kan måle den totale masse og vi kan måle massen af stjerner og gas, og vi ved derfor, at Draco-dværggalaksen indeholder 30-40 gange mere mørkt stof end almindelige partikler [2].

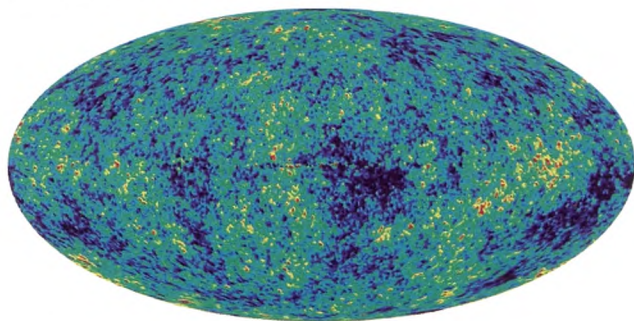
I større galakser finder vi også meget mørkt stof ved at måle rotationshastigheden af stjerner og kolde gasskyer. Vi finder typisk, at der i galakser er fra 1 til 10 gange så meget mørkt stof som almindelige partikler, hvilket afhænger af, hvor langt væk fra galaksernes centrum man kan få pålidelige observationer – jo længere ude man kan måle, jo større bliver bidraget fra mørkt stof. Helt inde i centrum af mange galakser ligger et kæmpestort sort hul, hvilket intet direkte har at gøre med mørkt stof af den slags som denne artikel omhandler.

Galaksehobe er flere millioner lysår store, og er de største strukturer, der kan opnå gravitationel ligevægt. Disse galaksehobe kan observeres på mindst tre forskellige måder, nemlig gennem røntgenstråling og linseteknikken (begge benyttet ved Bullet cluster), men også gennem Sunyaev-Zeldovich effekten (SZE). SZE

er en imponerende simpel teknik, som måler de kosmiske baggrunds-fotoner der vekselvirker med de varme elektroner i galaksehoben. Denne teknik oplever i disse år en fantastisk udvikling. Alle disse teknikker giver den samme konklusion, nemlig at den totale masse i galaksehobe udgøres af 80-90 % mørkt stof, og resten er så varm gas og stjerner.

På de allerstørste målbare skalaer – flere milliarder lysår – svarende til hele det synlige univers (altså så langt lyset kan nå på 13,7 milliarder år) observerer vi mørkt stof på mindst tre uafhængige måder: ved at observere de kolde fotoner i den kosmiske baggrundsstråling, ved at måle hvordan strukturer fordeler sig i forhold til hinanden (også kaldet "storskalastruktur") og endelig ved at observere hvordan supernovaers lysstyrker afhænger af afstanden.

Alle disse observationer peger på, at der i hele universet er omkring 6 gange så meget mørkt stof som almindelige partikler.



Figur 3. Den kosmiske baggrundsstråling viser ganske små variationer i fotonernes temperatur over hele himlen. Disse temperaturfluktuationer kan kun forklares ved at de første strukturer, der blev skabt, var af mørkt stof, og senere begyndte de almindelige partikler så at klumpe sammen inde i disse ansamlinger af mørkt stof.

Er mørkt stof en "partikel"?

Nogle ville nok spørge hvad det ellers kunne være, så lad os stille et mere utvetydigt spørgsmål: opfører mørkt stof sig som relativistiske partikler (såsom fotoner og neutrinoer), som vakuumfluktuationer (ligesom den kosmologiske konstant), eller som en tung og langsom partikel (som protoner, elektroner, neutroner,...). Dette kan omformuleres som et spørgsmål om mørk stofs "tilstandsligning". Vi kan tillægge enhver partikel et tal, som beskriver en forbindelse mellem tryk og tæthed

$$\text{tryk} = w \times \text{energitæthed}, \quad (1)$$

og for at være konkrete, så er $w = 1/3$ for fotoner og andre relativistiske partikler, $w = -1$ for vakuumfluktuationer, og $w = 0$ for protoner og andre massive ikke-relativistiske partikler. Ved at analysere den kosmiske baggrundsstråling (figur 3) i stor detalje finder vi, at $w = 0$ for mørkt stof, med en præcision på en milliontedel [3]. Vi er altså ret sikre på, at mørkt stof rent faktisk opfører sig som en partikel, der vejer noget – den kan altså ikke være helt masseløs

$$M > 0 \text{ kg}. \quad (2)$$

Hvad vejer mørkt-stofpartiklen?

Overraskende nok, så har vi stort set ingen anelse om hvad mørkt-stofpartiklens masse er. Som eksempel har vi to gode kandidater kaldet axionen og en wimpzilla. Hvis axionen skulle vise sig at være mørkt stof, så vejer den omkring en milli-elektronvolt, hvilket svarer til 10^{-42} kg. Hvis i stedet wimpzilla'en skulle vise sig at udgøre det mørke stof, så vejer den i størrelsesordenen en million-milliard giga-elektronvolt (10^{15} gange protonens masse), hvilket altså er ca. 30 størrelsesordener fra axionens masse. Til sammenligning svarer det til hvis vi ikke vidste om Jorden havde en masse som Jordens masse, eller i stedet vejede det samme som en myres venstre fod.

Den mindst modelafhængige øvre massegrænse vi har for mørkt stof er sjovt nok gennem analysen af dynamikken i dværggalakser. Den mindste rumlige opløsning vi formår at måle viser, at de mørke partikler må veje mindre end 10 millioner solmasser

$$M < 10^{37} \text{ kg.} \quad (3)$$

Det er altså kun mellem 50 og 80 størrelsesordener fra vores bedste partikkelkandidater – der er ingen der har sagt, at det skulle være let at være astrofysiker.

Hvor meget vekselvirker den?

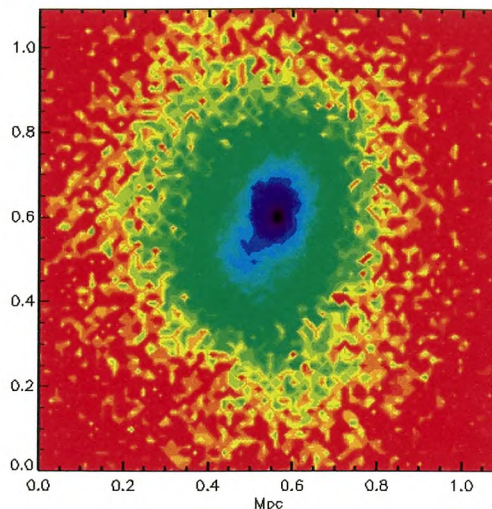
Når man spørger en teoretiker, hvad der egentlig skal til for at vi vil kalde noget for en partikel, så svarer de ofte, at den skal have en veldefineret masse, og man skal kunne fortælle, hvilke andre partikler den vekselvirker med (“ingen” er også et acceptabelt svar her, i modsætning til når man taler om folks personlighed). Når man kender vekselvirkningen med andre partikler, så kan man definere et vekselvirkningstværsnit, σ . For en almindelig bold er vekselvirkningstværsnittet blot hvor stor den ser ud, altså noget med $\sigma = 5 \text{ cm}^2$ til 500 cm^2 , afhængig af hvad man spiller. Når man dividerer med boldens masse, giver det σ/M omkring 4 til $10 \text{ cm}^2/\text{gram}$, afhængig af om man spiller bordtennis eller fodbold.

Vi har to essentielt modelafhængige målinger af dette tværsnit, som giver det samme svar. Det første er fra Bullet cluster (figur 1). Denne konfiguration er fremkommet ved, at to mindre galaksehobe er kollideret, og eftersom den varme gas har et rimelig stort vekselvirkningstværsnit, så blev det opbremset (det røde). De to klumper med mørkt stof (blå) er derimod fløjet lige igennem hinanden, hvilket giver os en øvre grænse på mørkt stofs vekselvirkningstværsnit.

Den anden metode er ved at måle om de mørke partikler kan huske, hvad der er op og hvad der er ned. Hvis de mørke partikler ofte støder sammen, så mister de hurtigt hukommelse om deres orientering. Ved at måle det mørke stofs “hukommelse” af rumlig orientering får vi derfor også en øvre grænse for deres vekselvirkning. Begge målinger giver

$$\frac{\sigma}{M} < 1 \frac{\text{cm}^2}{\text{gram}}. \quad (4)$$

Det er sandsynligvis et tilfælde at denne øvre grænse ligger så imponerende tæt ved værdien for almindelige boldspil.



Figur 4. Røntgenobservation af Galaksehoben med det poetiske navn RXJ1347, hvor vi kan måle at partiklerne der udgør det mørke stof har hukommelse om hvilken retning der er ind mod centrum. Det betyder at de ikke kolliderer ofte, hvilket giver os en øvre grænse for mørkt-stofpartiklernes vekselvirkningstværsnit [4].

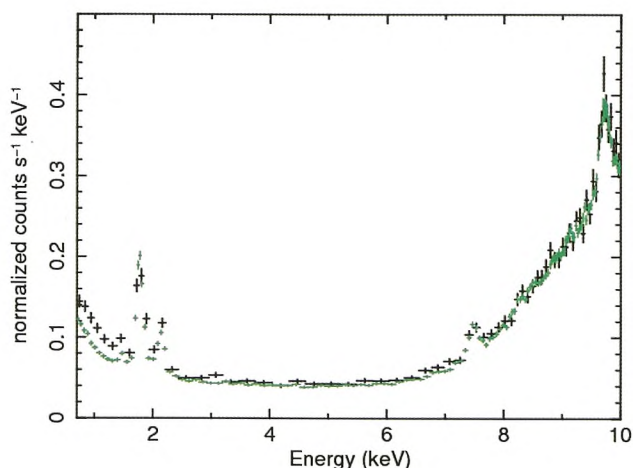
Hvordan kan vi måle mørkt stof?

Der er omkring 673 forskellige kandidater til mørkt stof som alle har forskellige egenskaber. Nogle har den heldige evne, at de kan henfalde eller annihilere med hinanden, andre kan en sjælden gang støde ind i – og vekselvirke med – almindelige partikler, og endelig er visse kandidater til mørkt stof et sandt mareridt for eksperimentalisterne fordi de essentielt er umulige at måle.

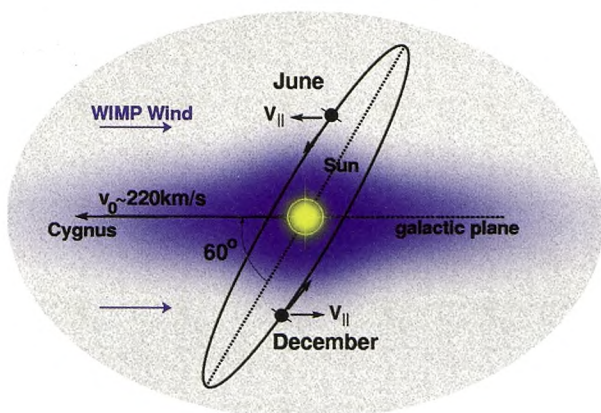
Henfald

Der er flere partikkelkandidater til mørkt stof som har den egenskab, at de henfalder. Deres levetid skal naturligvis være længere end – eller sammenlignelig med – universets alder, men selv hvis deres middellevetid er en million gange længere end 13,7 milliarder år, så kan der alligevel være mange der henfalder i en stor ansamling af mørkt stof. Hvis vi kigger på en struktur, der ligger tæt på os, så kan signalet ligefrem forventes at være stort, og så vil de udsendte fotoner have en energi der svarer præcist til halvdelen af massen af det mørke stof (som vi godt nok ikke kender). Vi ved jo at dværggalakser som ligger i udkanten af Mælkevejen er domineret af mørkt stof, så ved at kigge på fotoner fra dem kan vi blot lede efter et ikke-forventet spektralt “bump” i energien. På figur 5 ser vi et typisk spektrum fra en observation med røntgensatelliten “Chandra”. Der er en tydelig top omkring 2 keV (sort), som præcis svarer til en mørkt-stofpartikel med massen $M = 4 \text{ keV}/c^2$, svarende til knap 1 % af elektronens masse. Første gang vi opdagede dette bump sov vi ikke i tre

dage. Men det viste sig desværre at være baggrund, hvilket vi så ved at kigge lidt væk fra dværggalaksen (grøn).



Figur 5. Røntgenobservatoriet Chandra detekterer fotoner ved at kigge på dværggalaksen Draco (sort) og den forventede baggrund (grøn). Vi leder efter en afvigelse mellem disse to, som måske kommer fra en henfaldende mørkt-stofpartikelkandidat, en såkaldt "steril neutrino" [5].



Figur 6. Solens bevægelse gennem Mælkevejens halo af mørkt stof får haloen til at virke som en strid modvind for os. Da Jorden bevæger sig langsomt rundt om Solen, så vil modvinden være lidt større om sommeren end om vinteren. Denne årlige modulation kan man lede efter i underjordiske detektorer [6].

Underjordiske detektorer

En stor klasse af kandidater til mørkt stof har den egenskab, at de forventes at vekselvirke ganske svagt med almindelige partikler, hvilket åbner for en ny måde at detektere dem på med "normale" detektorer. Idéen er ret ligetil. Man bygger et laboratorium dybt under et stort bjerg for at formindske baggrunden af almindelige kosmiske stråler. Så installerer man en hyperfølsom detektor, der kan måle hvis enkelte detektorpartikler pludselig modtager en energi. Denne energi kan komme fra mange ting, såsom neutroner fra radioaktive henfald i Jorden, partikler fra normal kosmisk stråling, eller fra et sjældent sammenstød med en mørkt-stofpartikel. Måden at skelne disse bidrag fra hinanden er gennem den årlige modulation. Eftersom Solen bevæger sig

rundt om Mælkevejens centrum med omkring 220 km/s, så ser vi de mørke partikler i Mælkevejen som en strid vind. Da Jorden bevæger sig rundt om Solen, så vil styrken af vinden fra det mørke stof variere ganske svagt fra sommer til vinter, og vi kan potentielt måle denne årlige modulation (figur 6). Der er idag omkring 10-15 forskellige eksperimenter, der forsøger at identificere den mørke partikel ved at benytte denne teknik, og et af disse, DAMA, har allerede publiceret et signal, som potentielt kan være den første detektion af mørkt stof. Vi venter alle spændt på om andre eksperimenter vil bekræfte eller afvise denne detektion som uforstået baggrund, eller som den første mørkt-stofmåling med en underjordisk detektor.

Litteratur

- [1] D. Clowe, M. Bradac, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones and D. Zaritsky (2006), A direct empirical proof of the existence of dark matter, *Astrophys. J.* bind **648** L109, <http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/0608407>.
- [2] A. Koch et al. (2007), Stellar kinematics in the remote Leo II dwarf spheroidal galaxy – Another brick in the wall, *Astron. J.*, bind **134**, 566, <http://lanl.arxiv.org/abs/0704.3437>.
- [3] C. M. Muller (2005), Cosmological bounds on the equation of state of dark matter, *Phys. Rev. D*, bind **71**, 047302, <http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/0410621>.
- [4] O. Høst, S. H. Hansen, R. Piffaretti, A. Morandi, S. Ettori, S. T. Kay and R. Valdarnini (2009), Measurement of the dark matter velocity anisotropy in galaxy clusters, *Astrophys. J.*, bind **690**, 358, <http://lanl.arxiv.org/abs/0808.2049>.
- [5] S. Riemer-Sørensen and S. H. Hansen (2009), Decaying dark matter in Draco, <http://lanl.arxiv.org/abs/0901.2569>.
- [6] R. Bernabei et al. (DAMA Collaboration) (2008), First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI, *Eur. Phys. J. C* bind **56**, 333, <http://lanl.arxiv.org/abs/0804.2741>.



Fra venstre, i baggrunden: Kristian Pedersen, Anja C. Andersen, Jesper Sollerman. Foran: Sune Toft, Darach Watson, Jens Hjorth, Steen H. Hansen. Alle forfatterne er ansat ved "Dark Cosmology Centre" ved Niels Bohr Institutet. DARK er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond siden 2005.