



Riccardo Catena

är docent i fysik vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Han erhöill sin doktorsexamen vid *Scuola Normale Superiore di Pisa* i Italien 2006 och sin docentur vid Göttingens universitet i Tyskland 2014. Hans forskning är inriktad på sökandet efter mörk materia, och på att förstå dess egenskaper utifrån experimentella data. Forskningen stöds av svenska Vetenskapsrådet och Wallenbergstiftelsen.

Efter ett halvt sekel av allt fler och allt tydligare belägg står det idag klart att lejonparten av universums materia är osynlig, och tycks utgöras av en ännu okänd partikel – en partikel som hittills undgått detektion. Riccardo Catena skriver här om hur vi ändå vet att denna hemlighetsfulla materia finns, om vad den skulle kunna bestå av, och om fysikernas ihärdiga försök att vinna mer kunskap om den.

Bilden: Simulering av strukturbildning i universum, som visar mörk materia (blå-violett) och gas (gul-orange) i en massiv galaxhop. (Illustris Collaboration)

Vad är mörk materia?

Allt mer precisa kosmologiska observationer tyder på att en betydande del av vårt universum består av en ännu okänd materieform, så kallad *mörk materia*. Denna materia varken avger eller absorberar elektromagnetisk strålning av någon observerbar våglängd – den är ”osynlig”. Men vi har indirekt kunnat sluta oss till att den existerar genom dess gravitationella inverkan, dels på stjärnor och galaxer, dels på ljuset från avlägsna astrofysikaliska källor (via en effekt som kallas gravitationslinsning). Beläggen för mörk materia är idag obestridliga, men dess natur förblir ett mysterium: Vad består den av? Från det vi vet idag om hur universums storskaliga strukturer har bildats kan vi säga att den mörka materian inte kan utgöras av något känt partikelslag, som atomer eller neutriner. Den mest populära hypotesen inom modern kosmologi är istället att den utgörs av en ny partikel, ännu aldrig detekterad. Att faktiskt lyckas detektera denna ”mörk materia-partikel” i labbet eller i rymden, och att förstå dess egenskaper, kan anses vara ett av de högst prioriterade målen inom modern fysik; en sådan upptäckt skulle ha långtgående följder inom såväl kosmologi som partikelfysik.

Tidiga belägg

Dagens belägg för att det finns mörk materia i universum kommer från observationer av väldigt olika fysikaliska system. Dessa innefattar kluster av stjärnor, enskilda galaxer, galaxhopar, storskaliga kosmologiska strukturer (dvs. nätverk av galaxer och tomrum på skalor i storleksordningen 100 megaparsec) samt den kosmiska bakgrundsstrålningen (ofta förkortat CMB, från *Cosmic Microwave Background*).

De första upptäckterna som antydde någon form av ”osynlig materia” i universum gjordes i början av förra seklet, och kom från

studier av grupper av stjärnor i vårt närområde i Vintergatan: den synliga massan i stjärngrupperna jämfördes med den gravitationella massa som skulle behövas för att förklara stjärnornas rörelser. Om man nämligen antar att stjärnsystemen kan beskrivas som en gas av partiklar, så kan deras totala gravitationella massa erhållas från *Boltzmanns transportekvation*: ur denna följer att det finns ett samband mellan den totala massan hos systemet och spridningen i stjärnornas hastigheter. Genom att observera spridningen i hastighet får man alltså ett värde på den gravitationella massan. Om denna visar sig vara större än den synliga massan, blir slutsatsen att systemet innehåller mörk materia. De avvikelser man fann med denna metod var dock måttliga – inom en faktor två – och kunde förklaras med ljussvaga stjärnor som man helt enkelt inte sett.

Ett ”mörk materie-problem” formulerades första gången 1933 i samband med studier av Comahopen – en stor galaxhop bestående av över 1 000 galaxer i riktning mot stjärnbilden Berenikes hår. Observationerna, som leddes av den schweiziske astrofysikern Fritz Zwicky, visade att det fanns en förbryllande avvikelse mellan den totala gravitationella massan hos Comahopen – erhållen genom att mäta hastighetsfördelningen hos ett urval av galaxer (åtta stycken i detta fall) – och den totala synliga massan hos Comahopen, uppskattad genom att helt enkelt räkna de synliga galaxerna i hopen. En central ingrediens i Zwickys metod för att få fram den totala gravitationella massan var användningen av det så kallade *virialteoremet* – ett viktigt samband inom den klassiska mekaniken mellan medelvärdet av den kinetiska energin och den gravitationella potentiella energin hos ett slutet stabilt system. (Jämfört med Boltzmanns transportekvation, som tillämpades i fallet med stjärnsystem, innebär virialteoremet starkare antaganden om de dynamiska egenskaperna hos galaxhopar.)

Överraskande nog fann Zwicky en skillnad på mer än två storleksordningar mellan de båda sätten att uppskatta massan, och drog slutsatsen:

“If this [discrepancy] is confirmed, we would arrive at the astonishing conclusion that Dark Matter is present [in the Coma cluster] with a much greater density than luminous matter”¹

1 Från F. Zwicky, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110–127 (1933).

Trots denna banbrytande observation var det till en början bara ett fåtal astrofysiker som tog någon notis om problemet, något som även märks av de ytterst få citeringar som Zwickys artikel erhöll fram till mitten på 70-talet. Å ena sidan kan denna påtagliga brist på intresse ha haft orsaker utanför vetenskapen. Som den teoretiska fysikern Freeman Dyson formulerat saken:

“Fritz Zwicky’s radical ideas and pugnacious personality brought him into frequent conflict with his colleagues at Caltech. They considered him crazy and he considered them stupid.”²

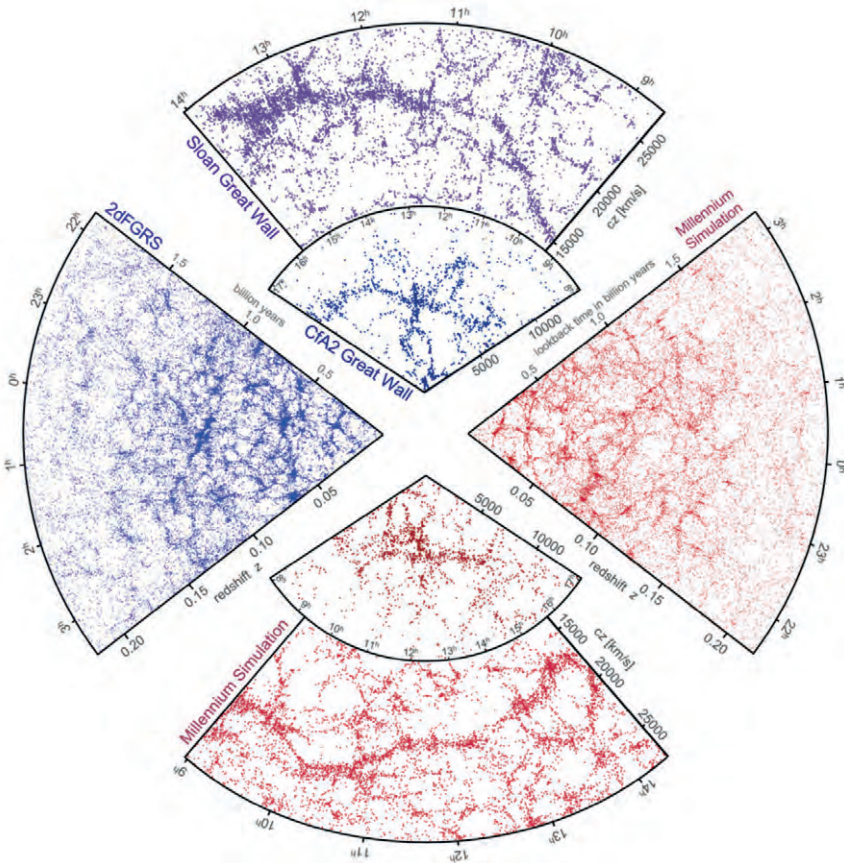
Å andra sidan fanns även konkreta vetenskapliga skäl för en initial skepticism beträffande Zwickys hypotes om mörk materia. Till exempel var det inte klarlagt huruvida virialteoremet verkligen gick att tillämpa för ett system som Comahopen.³ Dessutom kunde andra förklaringar till Zwickys observationer inte uteslutas, förklaringar baserade på att det skulle kunna finnas ytterligare vanlig materia i hopen, för ljussvag för att kunna detekteras. Av dessa skäl gick utvecklingen inom mörk materie-forskningen påfallande långsamt under de tre decennier som följde. Icke desto mindre gjordes några viktiga upptäckter i spåren av Zwickys arbete, bland annat av Sinclair Smith och Horace Babcock som fann belägg för mörk materia även i andra galaxhopar (som t.ex. Virgohopen), och även i enstaka galaxer.

De följande årtiondena utmärktes av en snabb utveckling inom radioastronomin, liksom av allt mer precisa mätningar av egenskaper hos närbelägna galaxer. I och med detta observerades oväntat stora rotationshastigheter hos spiralgalaxer, som Andromedagalaxen. Dessa mätningar – utförda av Ken Freeman, Morton Roberts, Kent Ford, Vera Rubin med flera – innebar ytterligare belägg för osynlig materia i galaxer. Enligt Newtonsk dynamik (närmare bestämt Keplers tredje lag) borde nämligen den fart varmed stjärnorna roterar kring galaxens centrum avta ju längre ut i galaxen de befinner sig, nämligen som ett genom kvadratroten av avståndet från centrum. Men faktum är att denna fart istället visar sig vara ungefär konstant över stora avstånd från rotationscentrat

² Från F. Dyson, *Nature* **435**, 23 (2005).

³ I virialteoremet antas att andraderivatet av den så kallade *tröghetstensorn* (vilken beror på hur massan är fördelad i systemet ifråga) är noll. Detta var dock svårt att fastställa beträffande Comahopen från den då tillgängliga datan.

i en galax. Den Newtonska förutsägelsen kan dock fås att stämma med de ”platta” rotationskurvorna om man antar att galaxen är innesluten i en ungefär sfärisk halo bestående av mörk materia. De partiklar som antas utgöra den mörka materie-halon omkring vår egen galax Vintergatan har än så länge undgått upptäckt, men det pågår ett flertal experiment för att finna dem. Senare i artikeln ska vi stifta bekantskap med några av de metoder som används i sökandet.



Figur 1: Jämförelse mellan numerisk simulering av den storskaliga strukturbildningen i universum (röda punkter i de nedre högra delarna, där varje punkt motsvarar en låtsasgalax i den så kallade millenniumsimuleringen) och verklig data från galaxkartläggningar (blåa punkter i de övre vänstra delarna). Jämförelsen visar att modeller med icke-relativistisk mörk materia väl lyckas förutsäga de nätlika strukturerna av galaxer och tomrum som observeras i universum. (Figur från V. Springel, C. S. Frenk och S. D. M. White, *Nature* **440**, 1137, (2006) (DOI: 10.1038/nature04805). Återpublicerad med tillstånd från Springer Nature.)

Allt säkrare belägg för mörk materia

Det var inte förrän på 70-talet, i samband med de första analytiska och numeriska studierna av den storskaliga strukturbildningen i universum, som mörk materia blev en av grundpelarna inom kosmologin. Enligt vad vi tror idag bildades universums storskaliga strukturer från små täthetsfluktuationer i en från början annars homogen gas av materia och strålning. Om materian i denna gas endast hade utgjorts av protoner, neutroner och elektroner, så skulle dessa täthetsfluktuationer bara ha kunnat växa till *efter* den så kallade *rekombinationen*, dvs. det skeende då elektroner och protoner förenades till neutrala väteatomer, varvid den elektromagnetiska strålningen frikopplades från materian. Före rekombinationen balanserades nämligen tillväxten av fluktuationer (orsakad av gravitation) av ett effektivt tryck orsakat av den elektromagnetiska strålningens växelverkan med materian; detta gjorde att täthetsfluktuationerna oscillerade istället för att växa sig större. Först efter rekombinationen, då materia frikopplat från strålningen, skulle fluktuationerna ha haft möjlighet att växa genom gravitation. I ett sådant scenario finns inte tillräckligt med tid för att galaxer och galaxkluster – såsom vi observerar dem idag – ska hinna bildas från de ursprungliga fluktuationerna.

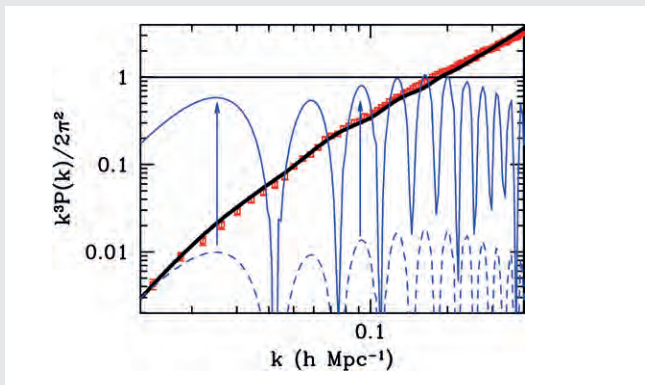
Om materiekomponenten i det tidiga universum istället dominerades av mörk materia, kan täthetsfluktuationerna ha börjat växa redan före rekombinationstiden, eftersom den mörka materian och strålningen är frikopplade redan från början. Ett sådant scenario, där den mörka materian dominerar, ger upphov till ett nätverk av trådar och tomrum i de storskaliga kosmologiska strukturerna som väl liknar det som faktiskt observeras – det så kallade ”kosmiska nätet”. Figur 1 visar en jämförelse mellan resultatet av numeriska simuleringar av den storskaliga strukturbildningen baserade på mörk materie-modeller (röda punkter i den nedre högra delen) och riktiga data från kartläggningar av universums galaxer (blåa punkter i övre vänstra delen). Likheten är slående!

Modifierad newtonsk dynamik?

Observationer av universums storskaliga strukturer utgör ett starkt argument mot en alternativ hypotes som kallas *modifierad newtonsk dynamik* (MOND). Detta är ett ramverk där man försöker förklara alla de fenomen som vanligen tillskrivs mörk materia genom att istället modifiera Newtons gravitationslag, som ju föreskriver att gravitationskraften mellan två kroppar avtar som ett genom kvadraten på avståndet mellan dem.

En sådan modifiering av Newtons dynamik skulle kunna förklara ovan nämnda rotationskurvor för galaxer. Däremot förmår MOND inte förklara universums storskaliga strukturer, och i synnerhet inte något som vi kan kalla *materiespektrat* (eng. *matter power spectrum*). Detta mäter amplituderna hos täthetsfluktuationerna i den storskaliga kosmiska materian som funktion av den fysiska skalan, eller närmare bestämt, som funktion av vågtalet associerat med den skalan.

Problemen med MOND-hypotesen framgår av figur 2, där materiespektrat $P(k)$ som funktion av vågtalet k för en modell med icke-relativistisk mörk materia (svart heldragen linje) jämförs med andra förutsägelser och verklig data, nämligen: (1) En modell baserad på allmän relativitetsteori med vanlig materia men utan mörk materia (blå streckad linje); (2) Förutsägelsen av MOND (blå heldragen linje); (3) data från en verklig kartläggning av galaxer (*the Sloan Digital Sky Survey*) (röda markeringar). Som framgår av de två blåa kurvorna i figuren förutsäger MOND större täthetsfluktuationer än allmän relativitetsteori med motsvarande materietäthet. Men MOND-modellen ger dessutom upphov till oscillationer i spektret som inte svarar mot gjorda observationer, och som man heller inte kan bli av med genom ytterligare modifieringar av den underliggande gravitationsteorin.

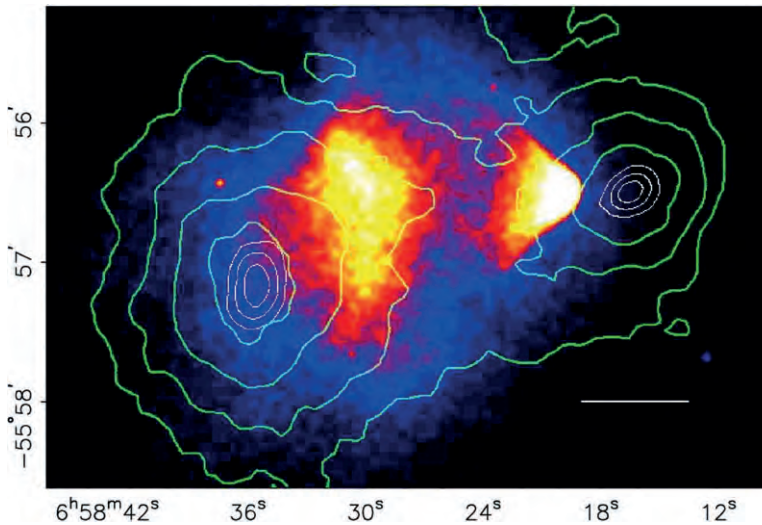


Figur 2: MOND (blå heldragen linje) förutsäger oscillationer i materiespektret som inte observeras (röda markeringar). Se vidare texten. (Figur från S. Dodelson, *International Journal of Modern Physics D* 20, No. 14, 2749–2753 (2011) (DOI: 10.1142/S0218271811020561). Återpublicerad med tillstånd från författaren.)

Idag finns stöd för mörk materie-hypotesen från observationer på vitt skilda skalor, från de allra största längdskalorna i universum, till skalor motsvarande enskilda galaxer och mindre. Under de senaste åren har det dessutom tillkommit nya typer av belägg, som vi nu ska se närmare på. Det handlar om mätningar av den kosmiska bakgrundsstrålningen, observationer av kolliderande galaxhopar, samt data från sfäriska dvärggalaxer.

Den kosmiska bakgrundsstrålningen (förkortad *CMB*) består av fotoner som frikopplades från universums materia vid rekombinationen. Dessa fotoner är i termodynamisk jämvikt och karaktäriseras därmed av ett svartkroppsspektrum motsvarande en viss temperatur T . Denna temperatur varierar dock något med observationsriktningen. Den relativa temperaturvariationen i olika riktningar, $\Delta T/T$, är i storleksordningen 10^{-5} (efter att effekter som har att göra med vår egen rörelse i förhållande till strålningen har räknats bort). Om man ritat en graf över hur *variansen* av $\Delta T/T$ (dvs. väsentligen medelvärdet av avvikelserna $\Delta T/T$ för olika par av riktningar) beror på vinkeln mellan de två riktningar som jämförs, erhåller man en karaktäristiskt oscillerande kurva. Det exakta utseendet hos topparna i dessa oscillationer visar sig bero på materie-sammansättningen i universum vid rekombinationen. Till exempel: ju större förhållande mellan vanlig materia och mörk materia, desto mindre blir förhållandet mellan den andra och tredje toppen i varianskurvan. Genom att jämföra teoretiska förutsägelser för varianskurvan med data insamlad av Planck-satelliten, har man kunnat sluta sig till att den vanliga materian högst kan uppgå till omkring 1/6 av all materia i universum. Den återstående delen måste redan vid rekombinationen ha varit frikopplad från strålningen, i enlighet med mörk materie-hypotesen.

Ett annat belägg kommer från kolliderande galaxhopar. Det mest kända exemplet är den så kallade *gevärskulehopan* (eng. *Bullet cluster*). Den är resultatet av en kollision mellan två från början åtskilda galaxhopar av olika storlek. De viktigaste egenskaperna hos detta system sammanfattas i figur 3 på nästa sida. De ljusa partierna i bilden motsvarar områden som sänder ut kraftig röntgenstrålning, medan de mörka partierna bara sänder ut svag sådan strålning, eller ingen alls. Röntgenstrålningen vittnar om hur den vanliga materian är fördelad inom systemet, eftersom denna strålning härrör från het intergalaktisk gas, vilket vi vet utgör den dominerande komponenten av vanlig ”synlig” materia i galax-



Figur 3: Gevärskulehopen avbildad på två olika sätt. Ljusa partier motsvarar områden med hög intensitet utsänd röntgenstrålning, och därmed områden med hög täthet av vanlig (ljusutsändande) materia. Effekter från gravitationslinsning av ljus från bakomliggande galaxer är markerade med gröna nivåkurvor: linsningseffekterna är små längs de yttre nivåkurvorna, och större längs de inre. Detta ger en bild av hur den totala massan är fördelad i systemet. Skillnaden mellan de två fördelningarna kan bara förklaras av att kollisionen mellan galaxhoparna även innefattade en andel mörk materia. (Bild från D. Clowe et al., *Astrophys. J.* **648**, L109-L113 (2006) (DOI: 10.1086/508162). Återpublicerad med tillstånd från författarna.)

hopar. Således återspeglar de två delvis åtskilda ljusa partierna i bilden täthetsfördelningen av den vanliga ljusutsändande materian i gevärskulehopen.

De gröna konturlinjerna i bilden har, å andra sidan, erhållits genom att studera systemets *gravitationslinsning* – dvs. observationer av hur bilden av bakomliggande galaxer förvrängs pga. ljusavlänkning orsakad av galaxhopens massfördelning. Dessa nivåkurvor visar alltså hur den *totala* massan är fördelad i systemet; densiteten är stor längs de inre kurvorna och lägre längs de yttre. Notera den tydliga skillnaden mellan de båda fördelningarna: densitetstopparna hos den vanliga materian sammanfaller inte med topparna hos systemets totala massa. Avvikelsen är svår att förklara utan stora mängder mörk materia. Å andra sidan är en sådan skillnad just vad man förväntar sig i en modell där galaxhoparna är inbäddade i halos av mörk materia: när två galaxhopar

kolliderar kommer deras vanliga synliga materia att smälta samman och bilda chockvågor som följd av friktion orsakad av växelverkan mellan materia och strålningen. Den mörka materia i respektive hop kommer däremot passera väsentligen opåverkad genom kollisionen, och därför – precis som i bilden – befinna sig längre från varandra efter kollisionen än den vanliga materia.

Ytterligare belegg för den mörka materia kommer från studier av *sfäriska dvärggalaxer*, gravitationellt bundna till Vintergatan och Andromedagalaxen. Sfäriska dvärggalaxer är små (med en total massa i storleksordning av miljoner solmassor), de innehåller äldre stjärnpopulationer än andra galaxer, och de är nästan helt fria från interstellär gas. Genom att jämföra den totala gravitationella massan som krävs för att erhålla den observerade hastighetsfördelningen hos galaxens stjärnor med massan hos de synliga stjärnorna, har man funnit att dessa galaxer är de astrofysikaliska objekt i universum som innehåller störst andel mörk materia. Därför är sfäriska dvärggalaxer även lämpliga objekt att studera i sökandet efter indirekta mörkmaterie-signaler i form av gammastrålning, något vi ska återkomma till.

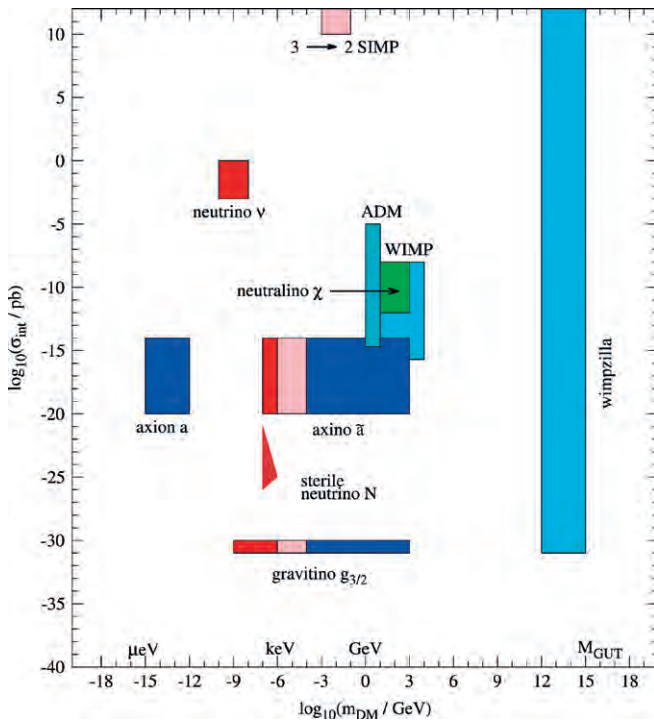
Vad består den mörka materia av?

Samtidigt som det idag är väletablerat att den mörka materia verkligen finns, är dess mikroskopiska natur fortfarande en av den moderna fysikens olösta gåtor. Orsaken är att beläggen för denna osynliga materias existens än så länge helt baseras på observationer av gravitationella effekter – observationer som visar sig vara förenliga med ett brett spektrum av olika mörk materiekandidater.

När vi tolkar de nuvarande beläggen i termer av mörk materiepartiklar, kan vi dock identifiera några grundläggande egenskaper som varje tänkbar partikelkandidat måste uppfylla. Mörk materiepartikeln måste vara elektriskt neutral – annars skulle den växelverka med strålning som vanlig materia och inte vara ”mörk”. Den måste vara stabil över kosmologiska tidsskalor, eftersom den spelar en nyckelroll under flera olika epoker i den kosmologiska utvecklingen. Dessutom kan den mörka materia inte vara *baryonisk*, dvs. den kan inte utgöras av baryoner, såsom neutroner eller protoner. Detta eftersom det följer ur Big Bang-nukleosyntesen – en av hörnstenarna inom modern kosmologi – att bara omkring 1/6 av all materia i universum kan utgöras av baryonisk materia (enligt data från den kosmiska bakgrundsstrålningen, som vi dis-

kuterade ovan). Slutligen måste den mörka materian vara icke-relativistisk under det att universums storskaliga strukturer bildas – i annat fall skulle den undgå att fångas av gravitationen från de första ”fröna” till strukturer, vilka därmed inte skulle kunna växa tillräckligt snabbt.

Nämnda egenskaper behöver dock inte uppfyllas exakt – små avvikelser är möjliga, även om det förstås finns begränsningar från observationsdata. Mörk materiepartiklar skulle exempelvis kunna ha en mycket liten elektrisk laddning (s.k. ”milli-laddad” mörk materia), vara instabil men med en livslängd mycket längre än universums ålder, eller bara nästan vara icke-relativistisk under den kosmologiska strukturbildningsepoken (s.k. ”varm mörk materia”).



Figur 4: Några utvalda modeller för mörk materia, åskådliggjorda i ett plan med mörk materiemassan på den horisontella axeln och växelverkanstyrkan (”tvärsnittet”) på den vertikala. Notera att båda axlarna täcker in ett brett intervall av olika storleksordningar. Se vidare sidorutan. (Figur från H. Baer, K. Y. Choi, J. E. Kim och L. Roszkowski, *Phys. Rep.* 555, 1 (2015) (DOI: 10.1016/j.physrep.2014.10.002). Återpublicerad med tillstånd från författarna.)

Slutsatsen av allt detta är att den mörka materian inte kan utgöras av någon av de hittills kända partiklarna; beskrivningen av mörk materia på mikroskala måste innefatta en utvidgning av den nu rådande teorin för elementarpartiklar och krafter – standardmodellen. Neutriner är visserligen både neutrala, stabila och icke-baryoniska – men de rör sig relativistiskt under strukturbildningen (dvs. de utgör en het mörk materie-kandidat) och är därmed uteslutna. Dessvärre finns många sätt att utvidga standardmodellen till att innehålla en lämplig mörk materiekandidat. I figur 4 är flera tänkbara modeller inritade i ett diagram, vars båda axlar spänner över flera storleksordningar: den ena axel visar massan hos mörk materiepartikeln och den andra styrkan i växelverkan mellan den mörka materian och dagens kända partiklar. Detta vida spektrum av möjligheter gör sökandet efter mörk materiepartikeln till en enorm utmaning.

Ett brett spektrum av kandidater

Bland de många kandidaterna till mörk materia illustrerade i figur 4 är två som förtjänar att nämnas mer utförligt, eftersom de utgjort huvudfokus för de experiment som utförts hittills: *WIMP:ar* (efter eng. *Weakly Interacting Massive Particles*) och *axioner*.

WIMP:ar förväntas ha en massa inom intervallet⁴ $1 \text{ GeV}/c^2 - 100 \text{ TeV}/c^2$. Deras växelverkan med kända partiklar (t.ex. kvarkar eller elektroner) har en styrka jämförbar med den svaga kraftens (en av de fyra fundamentala krafterna i naturen), och de antas ha befunnit sig i termisk jämvikt i det tidiga universum. Detta innebär att deras nuvarande densitet i universum kan förutsägas redan utifrån grundläggande teori. Överraskande nog hamnar den beräknade förutsägelsen av deras täthet idag (givet nämnda massintervall och växelverkansstyrka) inom samma storleksordning som den faktiskt uppmätta tätheten av mörk materia, erhållen ur data från den kosmiska bakgrundsstrålningen – ett sammanträffande som brukar kallas ”WIMP-miraklet”.

Axioner har däremot aldrig befunnit sig i termisk jämvikt. Deras massa är i storleksordningen 10^{-3} till $10^{-6} \text{ eV}/c^2$ (åtminstone i den enklaste modellen som beskriver dem) och deras kopplingsstyrka är proportionell mot deras massa. Ur ett teoretiskt perspektiv uppkommer WIMP:ar naturligt i teorier som försöker förklara varför Higgs-bosonens massa är stabil under kvantkorrektioner (ett sätt att formulera det så kallade *hierarkiproblemet*), medan axioner har föreslagits som förklaring till varför produkten av två

4 Partikelmassorna anges här i gigaelektronvolt (GeV) eller teraelektronvolt (TeV) dividerat med ljushastigheten c i kvadrat. En elektronvolt (eV) är lika med en volt gånger elektronens laddning e .

symmetrier – *laddningskonjugering* C och *paritet* P – är bevarade under den starka växelverkan (en annan av de grundläggande krafterna i naturen). Brott mot symmetrin CP inom stark växelverkan skulle exempelvis ge upphov till ett icke observerat elektriskt dipolmoment hos neutronen.

Ytterligare en kandidat till mörk materia som aldrig har varit i termisk jämvikt med de andra partiklarna är ”WIMPzillan”. Dessa extremt tunga partiklar (med massa över 10^{12} GeV/ c^2) förväntas uppstå omedelbart efter *inflationen* (en epok i universums tidiga utveckling, före Big Bang-nukleosyntesen, karaktäriserad av accelererande expansion). WIMPzillan har föreslagits uppkomma vid sönderfall av *inflatonfältet* – det hypotetiska skalärfält som tänks driva expansionen av det tidiga universum).

Frågan om hur mörk materia kan tänkas ha uppstått har inspirerat till ytterligare kandidater, vid sidan om WIMP:ar, WIMPzillor och axioner. Till exempel, i den *asymmetriska mörk materie-modellen* (ADM från eng. *Asymmetric Dark Matter*) bestäms den nuvarande tätheten av mörk materia av en initial asymmetri mellan mörk materiepartikeln och dess antipartikel, analogt med den kosmiska produktionen av baryoner (*baryogenesen*). Dagens täthet av SIMP:ar (från eng. *Strongly Interacting Massive Particles*) bestäms istället av en dragkamp mellan två processer där den ena innefattar tre SIMP:ar i initialtillståndet och två i sluttillståndet, och den andra två i initialtillståndet och tre i sluttillståndet. Slutligen, *gravitino* och *axino* är mörk materie-kandidater som uppstår från en klass teorier som innefattar en ny typ av symmetri som knyter samman partiklar med heltaligt spinn (*bosoner*) med partiklar med halvtaligt spinn (*fermioner*). Inom detta teoretiska ramverk är axino spinn-1/2-partnern till axionen, medan gravitino är spinn-3/2-partnern till gravitonen (den hypotetiska partikel som tänks förmedla gravitationell växelverkan).

Sökandet efter mörk materia

Att lyckas detektera mörk materiepartiklar i Vintergatan, och att förstå deras egenskaper utifrån partikelfysikens modeller, är ett av huvudmålen inom modern fysik. Uppgiften försvåras dock genom de många teoretiska möjligheter som finns för den mörka materians natur. Dagens experiment har fokuserat på WIMP:ar och axioner, delvis eftersom de uppstår naturligt i välmotiverade teoretiska modeller, delvis för att de går att söka efter med befintliga experimentella metoder.

En metod att söka efter WIMP:ar i laboratoriet är genom så kallade direkta detektionstekniker. Idén är denna: Jordens rörelse omkring solen, i kombination med solens rörelse kring Vinter-

gatans centrum, förväntas ge upphov till ett flöde av mörk materiepartiklar (från galaxens halo) genom vår planet. Om man tar hänsyn till att vinkeln mellan jordens banplan och solens banplan (dvs. det galaktiska planet) är omkring 60° , så borde detta flöde variera under året: det borde ha ett maximum i juni, då projektionen av jordens hastighet på det galaktiska planet sammanfaller med solens rörelseriktning, och ett minimum i december, då hastighetsprojektionen är i motsatt riktning. När en WIMP från Vintergatans halo passerar genom en detektor på jorden finns en möjlighet att den kan detekteras genom den energi den lämnar efter sig i detektormaterialet. Mer specifikt är det rekylen hos kärnor i detektormaterialet som denna typ av experiment söker tecken på. Sådana direkta detektionsexperiment utförs djupt ner i jorden – i gruvor eller under höga berg – för att reducera bakgrundseffekter från kosmisk strålning.

En annan metod i sökandet efter WIMP:ar är så kallade indirekta detektionstekniker. Här letar man efter partiklar som borde uppkomma när mörk materiepartiklar *annihileras* i rymden. Vid en annihilation kolliderar en partikel med sin egen anti-partikel, varvid partiklar av en annan sort bildas. Till exempel kan en elektron och en positron annihileras och bilda två fotoner. På samma sätt skulle två WIMP:ar kunna annihilera varandra och ge upphov till par av kända partiklar. Man letar efter produkter från sådana annihilationer både med satelliter i rymden, som exempelvis gamma-strålningsteleskopet Fermi-LAT, och med jordbaserade detektorer, såsom HESS eller IceCube. Man riktar då in sig på galaktiska och extragalaktiska astrofysikaliska system med hög täthet av mörk materia, som galaxens centrum eller ovan nämnda sfäriska dvärggalaxer. Beroende på vilken WIMP-modell man utgår från kan annihilationsprodukten bestå av positroner eller antiprotoner (dvs. antimateria), fotoner eller neutriner. Ur ett experimentellt perspektiv har varje annihilationsprodukt sina egna för- och nackdelar. I fallet när produkten är antimateria, till exempel, måste de teoretiska förutsägelseerna ta hänsyn till hur positronerna och antiprotonerna sprids genom de delvis okända galaktiska magnetfälten innan de når en detektor ovanför jordens atmosfär. Å andra sidan är antimateria väldigt mycket mindre vanligt än materia i universum. Därmed kan varje överskott av antimateria, utöver vad man förväntar sig från vanliga astrofysikaliska processer, direkt tolkas som resultatet av mörk materie-annihilationer. Fotoner

och neutriner däremot, rör sig mot oss längs raka linjer utan att avlänkas av de galaktiska magnetfälten. Å andra sidan skapas de i stor mängd vid vanliga astrofysikaliska processer, och utgör därför i sig inget entydigt tecken på mörk materia.

En tredje metod går ut på att söka efter WIMP:ar i de produkter som uppstår vid högenergetiska protonkollisioner vid partikelacceleratorer, som *Large Hadron Collider* (LHC) vid CERN i Genève, där ATLAS och CMS-experimenten körs. Metoden bygger på att energin i en kollision alltid är bevarad. Om nämligen WIMP:ar skulle bildas vid en protonkollision vid LHC-acceleratorn, så kommer de ändå att undgå detektion i såväl ATLAS- som CMS-detektorerna på grund av deras svaga växelverkan. Men de skulle kunna upptäckas indirekt genom att vi vet att energin hos de kolliderande protonerna måste vara densamma som hos de partiklar som finns kvar efter kollisionen. Om man observerar att det saknas energi efter en kollision kan det alltså tyda på att en WIMP har skapats. Tyvärr kan det dock lika gärna bero på att det har bildats någon annan partikel som har undgått att detekteras – som en neutrino eller någon ny okänd partikel som inte har med mörk materia att göra. Så även om man skulle finna tecken på en avvikelse i energin vid ATLAS eller CMS, skulle man för att säkert kunna dra slutsatsen att det verkligen handlar om mörk materia behöva ett bekräftande experiment, antingen via direkt eller indirekt detektion. Avancerade statistiska metoder och offentligt tillgängliga datorprogram för att kunna samköra och tolka resultat från alla tre sökstrategierna har utvecklats under de senaste åren, något som lett till många tvärvetenskapliga samarbeten mellan fysiker och statistiker.

Axioner är så lätta och växelverkar så svagt med vanlig materia att de inte låter sig skapas och detekteras med några av de konventionella metoderna inom partikelfysiken. Men axioner kan omvandlas till fotoner vid växelverkan med ett magnetfält, och även orsaka precession hos magnetiseringsvektorn för en uppställning elektroner eller neutroner med sammanfallande spinn. I båda fallen bygger detektionsprincipen på att man mäter de fotoner som induceras, och det handlar då om högst någon enstaka foton i timmen. Fotonens frekvens beror på axionmassan: ju större massa desto högre frekvens. Pågående experiment bygger på så kallade *mikrovågskaviteter* (dvs. slutna metallstrukturer som kan hålla mikrovågsfotoner på plats), anpassade för att hitta ax-

ioner med en massa kring 10^{-6} eV, och därmed axioninducerade fotoner med en frekvens på högst omkring 1 GHz. För att söka efter mer massiva axioner, motsvarande fotoner med högre frekvens (strax under THz-området), vet man att en-fotondetektorer skulle vara den bästa detektionsmetoden. Tyvärr finns ännu inga en-fotondetektorer med känslighet i det aktuella frekvensområdet. Att utveckla sådana är målet för olika svenska och internationella samarbeten, och något som engagerar forskare inom såväl fasta tillståndets fysik som astropartikelfysik.

Men var är den mörka materian?

Man har ännu inte i något av de pågående experimenten kunnat rapportera otvetydiga tecken på mörk materia. Det gäller experiment som bygger på såväl direkt som indirekt detektion, och ingen indikation finns heller på att man skulle ha lyckats skapa mörk materia. Man har tolkat frånvaron av resultat genom att ange övre gränser på styrkan hos den mörka materians växelverkan med kända partiklar.

I fallet med direkta detektionsexperiment uttrycks styrkan hos växelverkan mellan den mörka materian och atomkärnan i detektorn som ett *spridningstvårsnitt*. Man kan tänka på tvärsnittet för en viss process som ett mått på sannolikheten att processen ska äga rum – ju större tvärsnitt, desto sannolikare process. De experiment som hittills har rapporterat data, som XENON1T och PandaX-II, har kunnat utesluta (spinn-oberoende) tvärsnitt större än 10^{-47} cm² för mörk materiepartiklar med massa omkring 30 GeV/ c^2 . Detta motsvarar området ovanför $\sigma_{\text{int}}/\text{pb} = 10^{-11}$ i figur 4 (där tvärsnitten uttrycks i enheter av *pikobarn* (pb), 1 pb = 10^{-36} cm²). Även flera andra direkta detektionsexperiment, där man utnyttjat olika metoder och detektormaterial, har rapporterat ”noll-resultat” i enlighet med experimenten vid XENON1T. Det finns ett undantag: DAMA-experimentet, som under de senaste två decennierna rapporterat att man sett en årlig variation i antalet kärnrekylor i den natriumjodid man använt som detektormaterial. Periodtiden och fasen i denna variation stämmer med vad man förväntar sig från mörk materia. En central teoretisk utmaning inom fältet är att förstå hur DAMA:s resultat kan gå ihop med avsaknaden av resultat från övriga experiment.

När det gäller indirekt detektion presenteras resultaten som övre gränser på tvärsnitten för annihilation av mörk materie-

partiklar till sluttillstånd bestående av fotoner, antimateria och neutriner. Indirekta detektionsexperiment innefattar neutrino-teleskop, gammastrålningsteleskop baserade på jorden och i rymden, *the Alpha Magnetic Spectrometer experiment* (AMS-02) ombord på den internationella rymdstationen, samt radioteleskop.

Vad beträffar LHC-acceleratorn så presenteras resultaten exempelvis som övre gränser på tvärsnitt för sluttillstånd innehållande både mörk materiepartiklar (vilka, som nämnts ovan, undgår detektion) och ytterligare en partikel eller partikelstråle som fungerar som markör för händelsen. Typiska exempel är sluttillstånd som innehåller enstaka fotoner eller en hadronstråle.

När det gäller axioner har samarbeten som ADMX presenterat övre gränser på axion-foton-växelverkan, medan framtida experiment (som CARPEr och QUAX) även kommer att vara känsliga för växelverkan mellan axioner och neutroner samt mellan axioner och elektroner.

I kölvattnet av att man ännu inte lyckats detektera varken WIMP:ar eller axioner har nya experimentella metoder börjat utvecklas, anpassade för alternativa mörk materiekandidater, främst inom massintervallet $1 \text{ MeV}/c^2$ till $1 \text{ GeV}/c^2$. Detta är något mindre massor än traditionella WIMP:ar, men fortfarande detekterbart med metoder liknande de som används vid direkta detektionsexperiment. För kandidater med massor lägre än $1 \text{ GeV}/c^2$ är den kinetiska energi som överförs till en atomkärna vid en icke-relativistisk kollision för liten för att kunna upptäckas bara genom att observera kärnans rekyl. Men en icke-relativistisk partikel med en sådan massa kan jonisera en atom, eller excitera en valenselektron i ledningsbandet i en kristall. Så mörk materiepartiklar i detta massområde skulle alltså kunna detekteras genom att söka efter kollisioner med elektronerna i atomer eller i halvledande kristaller. Själva detektionen görs då genom att accelerera den joniserade atomen eller den exciterade elektronen i ett externt elektriskt fält, vilket får den att i sin tur spridas och ge upphov till observerbara sekundära partiklar.

De ovedersägliga beläggen – som ännu helt saknar förklaring – för att det finns osynlig mörk materia i galaxer, galaxhopar och i universum i stort, ställer oss inför en av de mest akuta och fascinerande frågorna inom modern fysik: Vad består den mörka materian av? Det råder en bred enighet om att den mörka materian utgörs av en ny typ av partiklar, ännu aldrig detekterade, lik-

som att den snabba experimentella utvecklingen under det senaste decenniet snart kommer att ge oss svar på frågan om den mörka materians väsen. ❖

För vidare läsning

G. Bertone och D. Hooper, *History of Dark Matter*,
Rev. Mod. Phys. **90** nr. 4, 045002 (2018).

Översättning från engelska: Sören Holst