



Gevärskulehopen ("Bullet cluster"). Två galaxhopar kolliderar med varandra. Det rödmarkerade i bilden är stoft som har bromsats upp i kollisionen. Det blåmarkerade innehåller det mesta av massan i galaxerna, men stjärnornas massa är inte tillräcklig för att förklara fördelningen av materia i galaxhopen. Massan är asymmetriskt fördelad – det tyder på att det finns något okänt och tungt med i kollisionen, som inte bromsas upp av passagen: den mörka materian.

Mörk materia – att mäta något man inte kan se

av Elin Bergeås Kuutmann

Det finns något där ute i universum, något som är tungt och inte uppför sig som vi förväntar oss att materia ska göra. Vi kan inte se det, för det varken lyser eller absorberar ljus, utan vi kan bara göra indirekta observationer av dess spöklika effekter. Vi kallar detta okända mörk materia, och dess existens är en av den moderna fysikens stora gåtor. Det är även det område där forskning om det allra minsta, elementarpartikelfysiken, möter det allra största, astronomin.

Sedan början av 1900-talet har vår förståelse av världens beståndsdelar ökat enormt. Vi vet att materien omkring oss består av atomer, som i sin tur består av elektroner, protoner och neutroner. All känd materia och växelverkan mellan materierpartiklarna beskrivs i den så kallade standardmodellen för elementarpartikelfysik. Med denna modell, som är en av den moderna fysikens verkliga triumfer, kan vi förklara nästan alla subatomära fenomen som har observerats, och all materia vi har omkring oss eller som vi



Flygfotografi av partikelfysiklaboratoriet Cern utanför Genève, med dess acceleratoringar markerade. Den stora ringen, med en radie på 4,3 km, är LHC (Large Hadron Collider, den stora hadronkollideraren).

BILD: CERN

har producerat i laboratorier. Men främst astrofysikaliska observationer antyder att vår förståelse inte är komplett. Existensen av mörk materia förutsågs inte av standardmodellen, men observationer av galaxers rotationskurvor och fjärran kolliderande galaxhopar visar tydligt att det finns någonting där ute i universum som är tungt, som varken absorberar eller sänder ut ljus, men som utgör större delen av galaxernas massa.

Verkar utan att synas

Så vad är det som är tungt men inte syns i galaxerna? Vi kallar det mörk materia, men ingen vet med säkerhet vad det är. Flera alternativa förklaringar har föreslagits. Man skulle kunna tänka sig att vi helt enkelt inte förstår hur gravitationen verkar över riktigt långa sträckor, eftersom det som gäller i vårt solsystem kanske inte stämmer på galaktiska skalor. Denna modifierade newtonska dynamik, MoND, har dock förlorat i popularitet efter observationen av Gevärskulehoppen (se bilden), som visar att den mörka materien är asymmetriskt fördelad efter en kollision mellan galaxhopar.

Indirekta observationer och begränsningar från kosmologiska teorier antyder att den mörka materien är kall, det vill säga, den rör sig inte i hastigheter nära ljusets. Dessutom måste den vara tung och växelverka med annan materia enbart via gravitationen och den svaga kärnkraften. Neutriner, lätta oladdade partiklar som bildas i exem-

pelvis vissa typer av radioaktiva processer, betasönderfall, har föreslagits som mörk materie-kandidater, men de är för lätta och rör sig för snabbt för att kunna förklara alla kosmologiska observationer.

Nya partiklar

För närvarande tror många partikel- och astropartikel-fysiker att den mörka materien utgörs av en ny klass av partiklar, så kallade wimpar (efter engelskans *Weakly Interacting Massive Particle*, WIMP, svagt växelverkande tung partikel). Någon sådan partikel förutsågs inte av standardmodellen, men det finns flera föreslagna utvidgningar av teorierna som innehåller wimpar. En av de mest populära teorierna är den så kallade supersymmetrin, i vilken varje partikel i standardmodellen förutsågs ha en tyngre kompanjonpartikel. Den tänkta supersymmetriska partnern till de oladdade kraftförmedlarna, neutralinon, har de egenskaper som krävs av en mörk materie-kandidat. Det finns även teorier som förutspår ytterligare rumsdimensioner utöver de tre vi lever i till vardags, universella extra dimensioner, i vilka våra vanliga partiklar kan röra sig. När partikeln befinner sig i den nya dimensionen framstår den som tung i vår värld. Detta kallas för Kaluza–Klein-excitationer, och om den lättaste Kaluza–Klein-partikeln är stabil skulle den kunna utgöra den mörka materien. Men detta är bara spekulationer, och än så länge har inga experimentella bevis

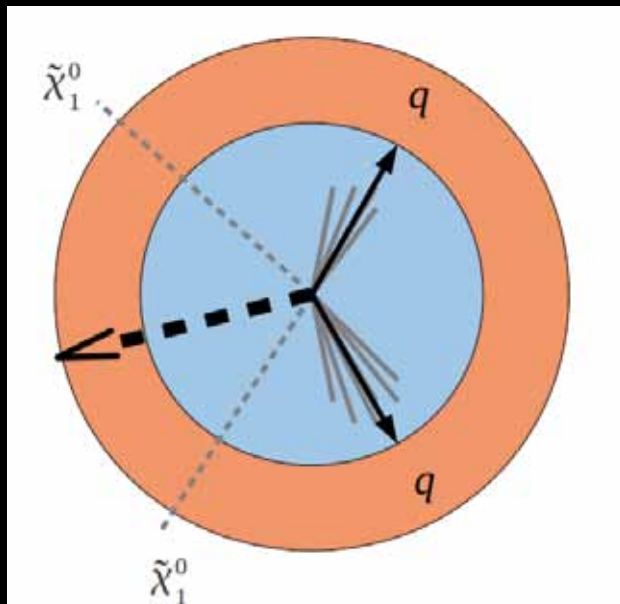


Illustration av det hypotetiska sönderfallet av två supersymmetriska partiklar till två kvarkar (q) och två neutraliner ($\tilde{\chi}_1^0$). Neutraliner är hypotetiska partiklar, som om de finns, skulle kunna utgöra den mörka materien. Kvarkarna, men inte neutralinerna, kan detekteras, vilket leder till en skenbar obalans i den detekterade rörelsemängden. Rörelsemängden som detekteras är markerad med heldragna pilar. För att rörelsemängden ska bevaras i reaktionen behövs ytterligare en komponent, markerad med en streckad tjock pil. Utifrån obalansen kan man sluta sig till att någonting svagt växelverkande måste ha förekommit i sönderfallet.

DIAGRAM: ELIN BERGÅS KUUTHANN

för någondera teorin kunnat observeras.

Att något finns där ute i universum står alltså klart, men för att kunna ta reda på exakt vilken partikel det är frågan om, så måste vi studera dem på närmare håll. Detta kan ske på olika sätt: Man kan utrusta satelliter med speciella detektorer och försöka hitta mörk materia eller dess sönderfallsprodukter i jordens närhet, exempelvis Pamela, AMS och Fermi-LAT, eller göra motsvarande sak med ballongburna experiment, som Atic och Bess. Man kan också försöka studera den mörka materien eller dess sönderfallsprodukter i teleskop på jorden. Det gör bland andra Hess och Veritas. Vissa experiment försöker studera hur den mörka materien "studsar" mot detektorer på jorden, till exempel Cressst och Dama. Dessutom måste den mörka materien lyda fysikens lagar. Eftersom den en gång blev till i universum är det åtminstone teoretiskt möjligt att tillverka mer av den i laboratorier på jorden, och därmed kunna studera den i kontrollerade miljöer. Försök att göra detta sker i exempelvis Atlas- och CMS-experimenten vid LHC på Cern.

Alla dessa sätt att försöka studera mörk materia har dock ett problem gemensamt: det enda vi egentligen vet om den mörka materien är att den är tung och inte växelverkar speciellt mycket med vanlig materia. Alla detektorprinciper grundar sig på att de partiklar som ska studeras växelverkar med annan materia på något vis. Rörelsemängden hos laddade partiklar kan mätas genom att partikelns bana böjs i magnetfält. Laddade partiklar lämnar mätbara jonisations-spår i vissa material. Partiklar som växelverkar elektromagnetiskt eller med den starka kärnkraften kan åstadkomma energiskurar som kan detekteras. Men partiklar som enbart växelverkar via den svaga kärnkraften kan passera oerhörda mängder detektormaterial, mer än hela jordklotet, utan att reagera alls. Experiment som detekterar exempelvis neutriner, som enbart växelverkar svagt, förlitar sig på stora detektorvolymmer och att endast några få neutriner av många faktiskt reagerar i detektorn. Experiment av den typen är exempelvis IceCube och Super-K. Dessa experiment gör bland annat indirekta sökningar efter mörk materia,

genom att leta efter överskott av neutriner som skulle kunna komma från wimpar som har fastnat gravitationellt i solen och annihileras, förintas parvis, och istället omvandlas till andra partiklar.

Göra mörk materia i labbet

Ett möjligt sätt att göra direkta observationer av mörk materia är att försöka skapa den i kontrollerade miljöer på jorden. Einsteins berömda formel, $E = mc^2$, lär oss att energi kan omvandlas till massa och omvänt. Detta används i högenergipartikelfysiken, där man accelererar lätta stabila partiklar, till exempel protoner eller elektroner, till hastigheter nära ljusets, för att sedan kollidera dem. I kollisionerna kan rörelseenergin omvandlas till nya, betydligt tyngre, partiklar. Runt kollisionspunkterna bygger man detektorer, och kan därmed studera de eventuella nya partiklarna under kontrollerade former. Men även här ställs vi inför samma problem som tidigare: Den mörka materien växelverkar ju inte med detektorer! Hur ser man något som inte syns? Svaret är att det gör man inte – men man kan se om något saknas som borde vara där.

LHC letar redan

Vid LHC, Large Hadron Collider, stora hadronkollideraren, på partikelfysiklaboratoriet Cern utanför Genève kolliderar bland annat protoner som har accelererats till 99,9999991 % av ljushastigheten. Protonstrålarna kolliderar rakt mot varandra. Eftersom rörelsemängden bevaras i reaktioner som dessa betyder det att om en partikel lämnar kollisionen åt ett visst håll, så måste dess rörelsemängd balanseras av motsvarande rörelsemängd hos partiklar som rör sig åt motsatt håll. Om det skulle skapas en svagt växelverkande mörk materie-partikel och en vanlig, detekterbar partikel i kollisionen skulle detta kunna märkas genom att

HISTORIK: MATERIA OCH MÖRK MATERIA

Under det tidiga 1900-talet visade **Albert Einstein** att materia består av atomer. **Ernest Rutherford** utförde 1909 ett experiment som visade att varje atom har en mycket liten, hård och positivt laddad kärna. Det var även Rutherford som några år senare lyckades splittra en atomkärna.

Under resten av 1900-talet har teoretiska fysiker och experimenterare hjälpts åt att bygga upp en detaljerad bild av materia och växelverkan mellan materiepartiklarna i den så kallade standardmodellen för elementarpartikelfysik. Med denna modell, som är en av den moderna fysikens verkliga triumfer, kan vi förklara nästan alla subatomära fenomen som har observerats och all materia vi har omkring oss eller som vi har producerat i laboratorier.

Existensen av mörk materia har visats främst genom astrofysikaliska observationer, genom att massan hos fjärran galaxer har uppskattats på olika sätt. Genom att jämföra den uppskatta-

de massan baserat på de stjärnor och det stoff man ser, med hur galaxerna roterar. Då ser man att massan måste vara fördelad på ett annat sätt än hur stjärnorna är fördelade i galaxen, eftersom rotationskurvorna antyder att massan sträcker sig långt utanför den synliga galaxen. Dessutom kan man se hur ljuset från bakomliggande, mer avlägsna objekt böjs i galaxens gravitationsfält, en gravitationslins, enligt Einsteins allmänna relativitetsteori.

Astronomen **Fritz Zwicky** gjorde den första observationen av denna effekt på 1930-talet, men hans upptäckt föll i glömska och dess betydelse diskuterades inte förrän astronomen **Vera Rubin** på 1970-talet kunde göra noggrannare mätningar. Den samlade bedömningen är att galaxerna verkar vara ungefär fem gånger tyngre än vad man kan förvänta sig, utifrån vad vi vet om stjärnor och interstellärt stoff.

Den materia som vi inte kan observera kallas mörk materia, och ingen vet idag med säkerhet vad den består av.

EXPERIMENT SOM LETAR EFTER MÖRK MATERIA

SATELLITBURNA EXPERIMENT – letar huvudsakligen efter partiklar från annihilation av mörk materia i kosmiska strålar.

Pamela (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics), i omloppsbana sedan juni 2006. **SE**

Fermi-LAT (Fermi Gamma-ray Space Telescope, Large Array Telescope), i omloppsbana sedan juni 2008. **SE**

Egret (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) ombord på Compton Gamma Ray Observatory, i drift 1991–2000.

AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer) på Internationella rymdstationen ISS sedan maj 2011.

BALLONGBURNA EXPERIMENT – letar huvudsakligen efter partiklar från annihilation av mörk materia i kosmiska strålar.

Bess (Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer). Har skickats upp ett flertal gånger över Antarktis.

Atic (Advanced Thin Ionization Calorimeter). Har skickats upp totalt tre gånger över Antarktis.

Caprice (Cosmic AntiParticle Ring Imaging Cherenkov Experiment). Har skickats upp över Nordamerika. **SE**

ACCELERATORBASERADE EXPERIMENT – försöker skapa mörk materia i partikelacceleratorer för att sedan kunna studera den under kontrollerade former.

CDF och DO vid proton-antiprotonkollideraren Tevatronen utanför Chicago i USA. Datatagningen avslutades 30 september 2011, men dataanalysen kommer att fortgå ytterligare några år. **SE**

Atlas och CMS vid hadronkollideraren LHC utanför Genève i Schweiz. Tar data sedan mars 2010. **SE**

IACF-TELESKOP (Imaging Atmospheric Cherenkov Technique) – letar huvudsakligen efter partiklar från annihilation av mörk materia i kosmiska strålar från Vintergatans centrum eller dvärggalaxer.

Hess High Energy Stereoscopic System (Hess) i Namibia. **SE**
Veritas Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System, Arizona, USA.

Magic Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope, på La Palma, Kanarieöarna.

Cangaroo Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback, Woomera, Australien.

DETEKTORER PÅ JORDEN för direktdetektion av mörk materia genom att mäta elastiska stötar mot detektormaterialet.

Cresst Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers, i Gran Sasso, Italien.

Dama Investigations on particle DARK MATTER, i Gran Sasso, Italien.

CDMS Cryogenic Dark Matter Search i Soudangruvan i Minnesota, USA.

NEUTRINOTELESKOP – detekterar neutriner som skulle kunna komma från annihilation av mörk materia.

IceCube Neutrino Observatory på Sydpolen. **SE**

Super-K Super-Kamioka Neutron Decay Experiments i Kamioka, Japan.

Antares Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch project i Medelhavet utanför Toloun i Frankrike.

SE Svenska institutioner eller universitet deltar.

den slutliga rörelsemängden vinkelrätt mot protonstrålen inte är noll. Utifrån den observerade obalansen kan man dra slutsatser om egenskaper hos partikeln som borde finnas där, men inte syns.

Under de senaste åren har många intressanta observationer gjorts vid olika mörk materie-experiment. 2008

orsakade ballongexperimentet Atic stor uppståndelse i partikelfysikvärlden efter observationen att det förekommer elektroner än förväntat i kosmiska strålar. Atic, som skickats upp till stratosfären över Antarktis, består av en jonisationskalorimeter som mäter energin hos de inkommande partiklarna, samt detektordelar för att mäta deras

AKTUELL FORSKNING

laddning. Det observerade elektronöverskottet skulle kunna betyda att det existerar en Kaluza–Klein-partikel med en massa ungefär 600 gånger större än protonens. Senare mätningar med andra instrument har dock inte kunnat bekräfta denna observation.

Satellitexperimentet Pamela har observerat ett överskott av högenergetiska positroner, positiva elektroner, som skulle kunna komma från annihilering av mörk materiepartiklar. Pamela, som består av flera olika deldetektorer för att kunna göra en noggrann identifikation av de observerade partiklarna, har delvis konstruerats av fysiker från KTH. Sedan juni 2006 befinner sig Pamela i omloppsbanan ombord på en rysk Resurs-DK1-satellit. Ett av experimenten som har kunnat bekräfta Pamelas observation är Lattteleskopet på satelliten Fermi, även det konstruerat med KTH-hjälp. Sedan 2008 befinner sig Fermisatelliten i omloppsbanan, där Lattteleskopet mäter förekomsten av inkommande partiklar från den kosmiska strålningen. Fermi-Lat har ingen egen möjlighet att skilja på partiklar med olika laddning, men genom att utnyttja jordens magnetfält kan ändå en separation av elektroner och positroner göras, och dessa mätningar bekräftar Pamelas observation. Dessa observationer är dock inte med säkerhet en mätning av mörk materiepartiklar, eftersom överskottet skulle kunna ha orsakats av andra astrofysikaliska källor, som exempelvis pulsarer. För närvarande har alltså inga säkra direkta observationer av mörk materia kunnat göras av astropartikelfysikexperiment.

De acceleratorbaserade experimenten har inte heller kunnat göra några otvetydiga direkta observationer av

mörk materia, vilket kan tyda på att partiklarna, om de finns, är för tunga för att produceras, eller skapas med alltför låg sannolikhet. Trots alla dessa negativa resultat, har åren av mätningar inte varit förgäves. Om man inte ser någonting kan den informationen användas för att utesluta olika modeller. Vår kunskap om vad den mörka materien förbättras således hela tiden.

Nu är det väl revolution på gång

Så vad betyder då allt detta? Standardmodellen, vår ytterst välundersökta och experimentellt verifierade teori, förklarar all materia vi har i vår omedelbara närhet. Men historien har lärt oss att närhelst vetenskapen tror sig förklara nästan allting, utom några få detaljer, så är en vetenskaplig revolution nära förestående. I slutet av 1800-talet trodde man sig förstå nästan alla fysikens lagar, och så kom 1900-talet med relativitetsteori, kvantmekanik och subatomär fysik. Nu är vi där igen – vi har en teori som förklarar nästan alla subatomära fenomen, utom några få. Hur fysiken kommer att se ut om 50 år är svårt att förutsäga, men ett är absolut säkert: den kommer att beskriva aspekter av universum som vi knappt tänkt på idag, och de stora genombrotten kan komma att ske snart. Det är en förmån att få leva och verka som partikelfysiker i dessa spännande tider! ★

ELIN BERGEÅS KUUTMANN är experimentell partikelfysiker vid Atlasexperimentet på Cern och postdoktor vid det tyska forskningsinstitutet Desy utanför Berlin.

Vill du också veta mer?

Institutionen för astronomi vid Stockholms universitet ger under våren 2012 två orienteringskurser på kvällstid, alla med start i januari. Anmäl dig direkt till institutionen!



Modern kosmologi, 7,5 hp

Vad finns det för stöd för Big Bang-teorin och universums expansion? Kan vi säga något om universums framtid? I denna kurs tittar vi på universum i stor skala.



Översikt kurs i astronomi, 7,5 hp

Ger en bred översikt bild av solsystemets, stjärnors, galaxers och hela universums struktur och utveckling samt vilka instrument och metoder astronomerna använder.



**Stockholms
universitet**

För att läsa dessa kurser behövs endast grundläggande behörighet för universitet och högskolor. Alla kurserna ges i AlbaNova, Roslagstullsbacken 21.

För mer information se www.astro.su.se eller kontakta vår studentexpedition: studentexp@astro.su.se
Tfn 08-5537 8505
Fax 08-5537 8510