

# Tyngre tyngdkraft tar oss bortom Einstein

av Fawad Hassan, Mikael von Strauss & Angris Schmidt-May

Universum expanderar allt fortare – men varför? Den senaste tidens upptäckter inom kosmologin tvingar fysikerna att tänka nytt, och kanske behöver vi ändra vår bild av hur universum funkar. Ett nytt genombrott öppnar upp för nya sätt att förstå tyngdkraften – bortom Einsteins teorier.

**T**yngdkraften har en dubbel natur. Einsteins allmänna relativitetsteori beskriver hur objekt som har massa påverkar varandra genom det som vi kallar gravitationen. När den kom för nästan hundra år sedan gav den en ny bild av gravitationella växelverkningar.

En tolkning är att en massiv kropp påverkar andra massiva kroppar med en gravitationell kraft – så tänkte Newton när han kom fram till sina berömda lagar. I den nya bilden, som Einstein kanske är mest känd för, behandlas rum och tid som två aspekter av samma sak, rumtid. En kropp med massa kröker rumtidens geometri, och räta linjer uppenbarar sig som krökta kurvor runt objekt som har massa. En testpartikel som rör sig längs en sådan linje uppför sig då som om en gravitationell kraft påverkar den.

Den tekniska orsaken till denna dubbla natur hos gravitation, som en kraft eller som krökning av rumtiden, är som följer. I en matematisk beskrivning av ett rum kan man koda in informationen om avstånd mellan olika punkter och vinklar mellan olika linjer i rummet i en uppsättning matematiska funktioner som kollektivt utgör en *metrik*. Metriken innehåller all geometrisk information om rummet. I allmän relativitetsteori är metriken viktig av ännu ett skäl: metriken beskriver också det fält som massiva kroppar genererar runt sig själva och från vilket krafter kan beräknas. På ett liknande sätt kan den elektriska kraften beräknas från fältet som elektriska laddningar genererar.

Einsteins allmänna relativitetsteori beskriver gravitationella växelverkningar i termer av en metrik, som

samtidigt också fullständigt beskriver geometrin hos rumtiden. Tillsammans med standardmodellen för partikelfysik – den uppsättning av partiklar och krafter som utvecklats under det senaste halvsekle – utgör denna metrik grunden för vår nuvarande förståelse av naturen på dess mest elementära nivå. Men den verkar inte räcka fullt ut.

## Okänd fysik kräver nytänk

Det finns många starka tecken på att hittills okänd fysik ligger bortom allmän relativitetsteori och standardmodellen, inte minst från senare års alltmer precisa kosmologiska observationer. Om vi ska förklara dessa observationer på mycket stora avstånd i universum utan att ge upp vare sig allmän relativitetsteori eller standardmodellen tvingas vi till obekväma slutsatser om vårt kosmos. Den materia och strålning vi känner till och förstår utgör bara cirka 5 procent av det totala energiinnehållet i universum. Resten utgörs till 25 procent av en hittills okänd form av materia (den mörka materian), som endast växelverkar gravitationellt med vanlig materia, och till 70 procent av en likaså okänd form av energi (den mörka energin) som får universum att expandera allt snabbare.

Att förstå dessa okända energikomponenter i universum utgör ett av de mest aktiva forskningsområdena inom fysik, både teoretiskt, observationellt och experimentellt.

## Problemet med den kosmologiska konstanten

Observationen att universums expansion accelererar, och den mörka energin som den tycks bero på, har gett upphov till ett av de största olösta problemen inom teoretisk fysik.

Inom ramverket av allmän relativitetsteori är den enklaste beskrivningen av mörk energi som en konstant energikälla i Einsteins ekvationer, den kosmologiska konstanten. Vi kan mäta dess värde från observationer av till exempel avlägsna supernovor (se artikel i PA 2011/4). Kvantteorin, som beskriver hur materians allra minsta beståndsdelar beter sig, ger en annan möjlig tolkning av mörk energi. Den ser den mörka energin som en konstant bakgrundskrökning av rumtiden som uppstår tack vare partiklar och antipartiklar som spontant uppstår och försvinner ur tomma intet, så kallade vakuumfluktuationer. Men enligt kvantteorin är energin som dessa vakuumfluktuationer skulle ge upphov till väldigt, väldigt långt borta från den kosmologiska konstantens observerade värde. Den uppskattas till ungefär  $10^{120}$  (1 med hela 120 nollor efter!) gånger mindre än kvantteorin förutsår. Detta utgör ett av de mest fundamentala problemen i modern fysik och kallas problemet om den kosmologiska konstanten. Det signalerar en brist i vår förståelse av antingen gravitation eller kvantteori – eller bådadera.

## Hopp om en lösning

Vi får alltså inte ihop dessa okända energiformer med våra etablerade teorier. Därför försöker forskare utvidga och gå bortom dessa teorier. Fram tills nu utan någon större framgång, delvis för att det har visat sig vara mycket svårt att konstruera alternativa teorier som både fungerar på papper och som dessutom stämmer överens med observationer av universum.

Men några verkar lovande. En som vi själva arbetat med heter *bimetrisk teori*. Som namnet antyder är detta en teori som innehåller två metriker. Teorin är en modifikation av den allmänna relativitetsteorin och har således betydelse både för tyngdkraftens fysik och för kosmologi. En nära besläktad teori till denna kallas *massiv gravitation*, där det gravitationella fältet har en massa i sig självt – mer om detta snart. Dessa alternativa teorier har faktiskt varit föremål för undersökning i över ett halvt sekel. Men det är först under de senaste åren som forskare övertygats om att de fungerar rent tekniskt och inte innehåller några inbördes motsägelser.

Vad innebär dessa teorier för kosmologin? Det ska vi komma till snart. Men först behöver vi en snabbkurs i några viktiga koncept.

## Ett fält med massa

Magnetfält och elektriska fält är två exempel av fysiska egenskaper vars värde generellt beror på både tid och position i rummet. Både den elektriska kraften och den gravitationella kraften har det gemensamt att styrkan avtar kvadratisk med avståndet – effekten kallas Newtons

lag för gravitationsfält och Coulombs lag för elektriska fält. Störningar i dessa fält rör sig med ljusets hastighet, 300 000 kilometer i sekunden. Å andra sidan vet vi från Einsteins speciella relativitetsteori att bara objekt som inte har någon massa kan röra sig med ljusets hastighet. Därför säger vi att dessa fält är *masslösa*.

Kvantfysiken ger ett annat sätt att se på fälten, som en uppsättning partiklar, eller kvanta. Elektromagnetisk strålning utgörs av ljuskvanta, eller fotoner. Gravitationens motsvarighet till ljus är enligt Einsteins allmänna relativitetsteori gravitationsvågor, men de kan också beskrivas som partiklar – så kallade *gravitoner*. Massan hos ett fält är enligt den här kvantfysiska bilden just massan hos dess partikelkvanta. Masslösa fält, eller deras kvanta, rör sig med ljusets hastighet, medan massiva fält alltid rör sig med en lägre hastighet.

Fotoner och det elektromagnetiska fältet som de hör till är både neutrala och masslösa. Men i naturen finns även partiklar som upptäckts i acceleratorexperiment som liknar fotoner, men som har både massa och laddning. W- och Z-partiklarna är två exempel. Den matematiska beskrivningen av dessa ligger till grund för standardmodellen inom modern partikelfysik och dessa partiklar är experimentellt påvisade. En naturlig och viktig fråga uppstår. Har även det gravitationella fältet massiva släktingar – eller kan det rentav vara massivt i sig självt?

För att precisera den frågan måste vi först klargöra vad som menas med att ett fält är "likt" ett annat.

## Olika fält, olika spinn

Den naturliga distinktionen mellan fälten ligger i begreppet spinn, som inom kvantfysiken är ett slags rörelsemängdsmoment. Fotoner har spinn på 1 (i enheter av  $h/2\pi$ , där  $h$  är Plancks konstant) och det elektromagnetiska fältet kallas således ett fält med spinn 1. Med "fotonlika" partiklar avser vi andra elementära partiklar med spinn 1. Det gravitationella fältet är på liknande sätt ett fält med spinn 2, medan de fält som beskriver vanlig materia (partiklar som kvarkar och leptoner) är fält med spinn  $\frac{1}{2}$ . Klassificeringen av partiklar i termer av spinn är av fundamental betydelse eftersom den matematiska beskrivningen av ett fält i stor utsträckning bestäms av dess massa och dess spinn. Till exempel ger Maxwells ekvationer den unika beskrivningen av ett neutralt, masslöst, fält med spinn 1 (som ger oss elektromagnetism), medan Einsteins ekvationer ger en unik beskrivning av ett neutralt masslöst fält med spinn 2 (gravitation).

Vad kan vi säga om gravitationsfältets eventuella massiva släktingar? Det är experimentellt verifierat att det, utöver fotoner, finns andra både massiva och laddade fält med spinn 1: dessa ger upphov till den svaga och starka kraften, två av de andra fundamentala krafterna inom fysiken. Kan det, på liknande sätt, även finnas elementära massiva fält som har spinn på 2? Eller kan det gravitationella fältet självt vara ett massivt fält med spinn 2?

Den första av dessa frågor är av potentiellt stor betydelse, oavsett om den har några kosmologiska konsekvenser eller inte, eftersom det vi vet om fält med spinn 0,  $\frac{1}{2}$  och 1



FOTO: GENEVEUNIVERSITETET



FOTO: NEW YORK UNIVERSITY



FOTO: PERIMETER INSTITUTE

Spökjägarna - ute på fält och på kontoret. Från ovan: Claudia de Rham, Gregory Gabadadze och Andrew Tolley. Nedan: Einstein som han såg ut 1921.



FOTO: FERDINAND SCHMITZER

säger oss att dessa generaliseringar på något sätt manifesteras i naturen. För att börja besvara dessa frågor måste vi först ha en bra och sammanhängande teori för massiva fält med spinn 2. Först då kan vi studera teorin och undersöka om den innehåller intressant och relevant fysik.

Seriösa försök att konstruera sådana teorier inleddes redan under 1960 och 1970-talen men man stötte tidigt på problem. Alla kom med ett "spöke" på köpet!

### Spöket ställer till det - men leder till insikt

Med ett "spöke" eller "spökfält" menar vi inom fysik ett tilltänkt fält med en mycket märklig egenskap: negativ rörelseenergi. Det låter problematiskt och det är det - den negativa energin signalerar en instabilitet i teorin som är mycket oönskad. Spökfältet kan obehindrat minska sin energi och den överskottsenergi det ger upphov till kan överföras till att spontant skapa strålning och partiklar överallt utan någon total energikostnad. Sådana processer har aldrig observerats i naturen, så en godtagbar fysikalisk teori kan inte innehålla spökfält. Än värre är att spökfält, i kvantteorin, ger upphov till processer som sker med sannolikhet större än 100 procent - vilket naturligtvis är nonsens rent matematiskt. Men spöken har sin positiva sida. Kravet att en teori inte ska innehålla ett spökfält är ett mycket kraftfullt redskap när teorier ska byggas inom fysiken. En stor del av strängteorin, till exempel, följer faktiskt direkt av sådana krav.

Under 2010 kom genombrottet. Efter ett förnyat intresse och genom en systematisk metodik, där avsaknad av spökfält var det grundläggande kriteriet, lyckades fysikerna Claudia de Rham, Gregory Gabadadze och Andrew Tolley för första gången konstruera en sammanhängande teori för ett massivt fält med spinn 2, och den blir känd som dRGT-teorin. Under 2011 och 2012 gjorde vi själva, tillsammans med vår kollega Rachel Rosen, viktiga generaliseringar av denna teori. Allra mest spännande var att vi fick fram ett efterlängtat bevis för avsaknaden av spökfält i dessa teorier. Den viktigaste generaliseringen utgörs av den bimetriska teorin som beskriver hur ett masslöst fält växelverkar med ett massivt fält med spinn 2.

Inom fysik är det ytterst ovanligt att man lyckas konstruera helt nya konsistenta fältteorier. Historiskt har det också visat sig att sådana nya konstruktioner har varit mycket viktiga för vår förståelse av naturen. Några utmärkande exempel är Diracs elektronteori, Yang-Mills-teorin och Higgsmodellen som tillsammans utgör stommen för standardmodellen inom partikelfysik. I samma anda är det viktigt att fortsätta studera rent tekniska aspekter av den bimetriska teorin, oavsett dess potentiella kosmologiska implikationer. Hoppet är att en teori för växelverkande fält med spinn 2 kan hjälpa oss att förstå fysik bortom allmän relativitetsteori och standardmodellen.

### Bimetrisk teori och massiv gravitation

Den bimetriska generaliseringen av allmän relativitetsteori är en teori för två växelverkande fält med spinn 2 där det ena ska tolkas som ett gravitationellt fält. Dessa fält kan

kombineras på två sätt: i den ena varianten har fälten massa och i den andra är den masslös. Teorin som går under namnet *massiv gravitation* erhålls enkelt från den bimetriska teorin genom att fixera ett av de två spinn 2-fälten godtyckligt. Detta leder till en teori för en enda "metrik" som beskriver ett massivt fält med spinn 2. Bimetrisk teori och massiv gravitation är således besläktade, men de är helt olika teorier och leder oss till olika slutsatser om verkligheten.

Den bimetriska teorin är mycket komplex och innehåller sju parametrar som kan justeras. Utöver alla lösningar som känns igen från den allmänna relativitetsteorin finns även lösningar som är mycket olika dessa. Det är naturligtvis av vikt att justera parametrarna så att de bimetriska lösningarna är tillräckligt lika lösningar inom allmän relativitetsteori på astronomiska avstånd för att stämma överens med observationer av kosmos, men samtidigt ge oss en ny och rimlig bild av universum på kosmologiska avstånd. I synnerhet måste lösningarna vara mer eller mindre desamma som Einsteins teorier ger för himlakroppar i vårt solsystem, där allmän relativitetsteori är noggrant testad.

Allt vad den bimetriska teorin innebär för kosmologin vet vi inte ännu. Men vi börjar förstå hur den kan komma att fungera.

### Ett universum med tunga gravitoner

Att studera hur massiva fält med spinn 2 fungerar i kosmologiska sammanhang visar sig vara mycket intressant. Kraften som ett masslöst fält ger avtar som sagt kvadratisk med avståndet (matematiskt avtar den med  $1/r^2$  där  $r$  är avstånd). För ett massivt fält tillkommer en minskning av kraften som beror på fältets massa – den avtar enligt  $(1/r^2 + m/r) \cdot e^{-mr}$  där  $m$  är massan. På stora avstånd är därför kraften som förmedlas av det massiva fältet svagare än den motsvarande kraft som skulle förmedlas av ett masslöst fält.

Här får vi en spännande första inblick i varför gravitoner med massa kan hjälpa oss att förklara universums accelererande expansion. Vi föreställer oss att två massiva kroppar påverkar varandra genom ett ömsesidigt utbyte av massiva partiklar (eller fältkvanta). Om vi nu jämför denna växelverkan med hur den hade sett ut om fältet istället varit masslöst ser vi att kraften mellan dessa kroppar är mindre än den annars hade varit. Kraften blir dessutom allt mindre desto större separation det är mellan kropparna. Denna effekt kan då tolkas som existensen av en kraft som motverkar gravitationen, som ökar med avståndet mellan kropparna – precis som vi behöver.

### Bimetrisk teori: en kosmologisk lägesrapport

Efter att det hade bevisats att den bimetriska teorin var "spökfri" ville fysiker undersöka vad den innebär för kosmologin. Kosmologiska lösningar räknas fram i rask takt – vårt team var ett av tre som publicerade på bara två veckor i slutet av 2011 – och undersöks vidare. Lovande nog visar många av dessa lösningar upp en accelererande

expansion under den senare fasen av universums utveckling. Dessutom matchar lösningarna universums tidiga utveckling som den allmänna relativitetsteorin beskriver den och skiljer sig främst för tidpunkter däremellan. Det visar sig vara mycket lätt att få den bimetriska teorin att matcha kosmologiska observationer minst lika bra som dagens mest etablerade kosmologiska modeller som istället har allmän relativitetsteori i botten.

Nu har vi alltså ett konkret alternativ till dagens teorier, utan spöken och andra problem, som vi kan undersöka vidare. Det är bra, men det är också lite synd. Lite mer konflikt med observationerna hade faktiskt varit till praktisk hjälp med att strama upp den bimetriska teorin.

För att kunna jämföra med observationer och därmed komma vidare behöver vi undersöka mer noga vad den bimetriska teorin säger om områden där den kanske ger andra resultat än Einsteins teorier, till exempel rörelser i vårt eget solsystem och hur universums storskaliga struktur utvecklas med tiden. Än så länge är det för tidigt att säga hur bra dessa lösningar kan bli.

### En lösning – och en ny fysik?

Kan den bimetriska teorin hjälpa oss lösa problemet om den kosmologiska konstanten? I den bimetriska teorin får vi ytterligare bidrag till den kosmologiska konstanten utöver vakuumbidragen tack vare växelverkningarna mellan de massiva och masslösa spinn 2-fälten. Detta innebär att om vi lyckas – och det kanske vi kan – argumentera att kvantfluktuationerna inte alls bidrar, erbjuder den bimetriska teorin en naturlig förklaring till varför den kosmologiska konstanten är liten, men inte noll.

Den nya, spökfria bimetriska teorin tycks alltså vara en teori som kommer att tåla att arbeta vidare med. Den kan dessutom ge oss ett alternativ till Einsteins allmänna relativitetsteori med potentiellt mycket intressanta konsekvenser. Vi får även en spännande möjlighet att utforska aspekter av teoretisk fysik som går bortom både partikelfysikens standardmodell och den allmänna relativitetsteorin.

Mycket mer forskning krävs för att till fullo förstå vad denna teori har att erbjuda. Men den har en chans att ändra i grunden vår förståelse av den värld vi lever i. ★



FAWAD HASSAN, MIKAEL VON STRAUSS och ANGRIS SCHMIDT-MAY är alla fysiker vid Oskar Klein Center och Stockholms universitet.