

SÄRTRYCK UR:

KOSMOS

RELATIVITETS- TEORI

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2021



HUR VET VI ATT EINSTEIN HADE RÄTT?

© NILS ANDERSSON



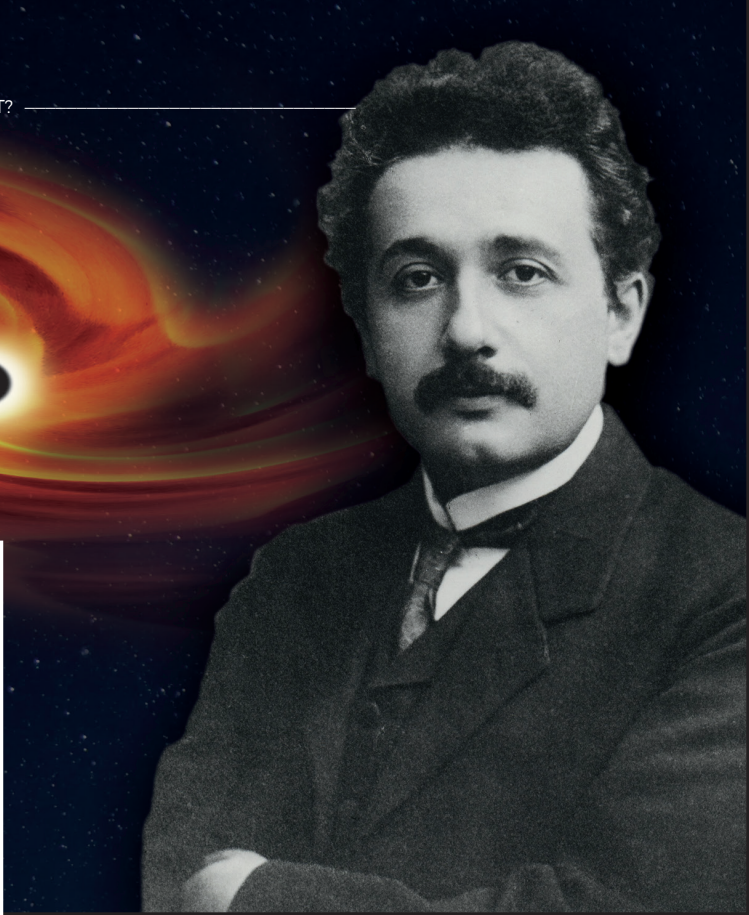
Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0
För bildmaterial med källhänvisning
gäller samma upphovsrättsliga
regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Nils Andersson

är professor i Tillämpad Matematik vid universitetet i Southampton. Han disputerade i Teoretisk Fysik i Uppsala 1991 och har sedan dess forskat på frågor om svarta hål och neutronstjärnor och hur vi kan studera dem med hjälp av gravitationsvågor. Han har skrivit böcker för både vuxna och barn.



Alla känner till Albert Einstein. Knappast någon vetenskapsman har nått upp till samma kändisstatus. Betydligt färre har förstått de speciella och allmänna relativitetsteorier som han lanserade. Vad innebär egentligen $E=mc^2$ och var finns länken därifrån till svarta hål, gravitationsvågor och annat? Nils Andersson reder ut begreppen för oss och visar varför vi nog kan lita på Einsteins teorier.

*Bilden: En konstnärs framställning av en kollision mellan två svarta hål, med Albert Einstein i förgrunden.
(Einsteins foto från Langhans, J. F. - Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45267980>; illustration av Göran Durgé)*

Hur vet vi att Einstein hade rätt?

Albert Einstein. Mannen som krökte rummet och stoppade tiden. Professorn med det bångstyriga håret vars namn ofta ses som själva definitionen av ordet geni. Vad var det egentligen han gjorde? Kan vi vanliga dödliga förstå vad det var han hittade på? Och hur vet vi att han hade rätt? Det finns många frågor att reda ut (Will & Yunes, 2020), men låt oss börja med ett svenskt perspektiv.

I det första numret av Kosmos, som kom ut för precis 100 år sedan, skrev Uppsalaprofessorn och fysikersamfundets grundare Carl Wilhem Oseen en artikel om Einsteins relativitetsteori (Oseen, 1921). Han hade hållit föreläsningar om den moderna fysiken — både atomteorin och relativitetsteorin — redan på sommaren 1919 och dessa kom samma år ut i bokform (Atomistiska föreställningar i nutidens fysik). Det är intressant läsning. Man slås av hur väl Oseen förstod Einsteins teori, trots att den då bara hade några år på nacken. Han diskuterar ”Einsteins storslagna tanke” med uppenbar entusiasm och mycket av det han skriver håller måttet än idag.

I den andra upplagan av Kosmos 1922 skrev Oseen igen. Den här gången var han fokuserad på den fotoelektriska effekten, och hans student Ivar Waller (som senare också han blev professor i Uppsala, se Staffan Yngves artikel i denna Kosmos) bidrog med en artikel om hur man skulle kunna testa Einsteins idéer experimentellt. Uppenbarligen fanns det ett växande intresse bland svenska fysiker, även om få tog aktiv del i den nya forskningen¹. Sam-

¹ Som alltid finns det viktiga undantag. Oseen hjälpte till exempel den norske studenten Jørg Tofte Jebsen, som en tid jobbade i Uppsala, med en artikel som publicerades i Arkiv för fysik 1921 (och inte verkar lästs av särskilt många). Resultatet, som visar att en sfäriskt symmetrisk lösning till Einsteins ekvationer måste vara tidsberoende, beskrivs i de flesta moderna läroböcker men brukar tillskrivas George David Birkhoff som kom fram till det 1923.

tidigt väcktes motstånd mot de nya tankarna. Diskussionen blev förvirrad, framför allt eftersom många valde att kommentera utan att studera detaljerna. Uppsalas filosofer såg till exempel relativitetsteorin som en förolämpning av det sunda förnuftet som inte kunde tas på allvar. Man måste också hålla i minnet att de flesta svenska fysiker var fokuserade på frågor av mer experimentell natur. Den teoretiska fysiken fick inte fotfäste i Sverige förrän under mellankrigsåren och då blev atomfysikens dominans nästan total.

Med ljusets hastighet

Av naturliga skäl har människor spekulerat om rum och tid långt tillbaka i historien, men det är naturligt att se Galileo Galilei som den första riktiga relativisten. Han beskrev hur föremål rörde sig relativt varandra — att man kunde addera hastigheter — en effekt vi är vana vid från vår vardag. Det problemet är också centralt för Isaac Newtons rörelselagar från mästerverket *Principia* som publicerades 1687. Galileo tillskrivs också ett experiment där han lät två klot, ett av järn och ett av trä, falla från det lutande tornet i Pisa och på så sätt fann att föremål faller med samma hastighet oavsett vad de är gjorda av.

Det finns inga historiska bevis för att Galileo faktiskt utförde försöket, men det har repeterats många gånger, till exempel 1971 under den fjärde bemannade månlandningen då Apollo 15 astronauten David Scott lät en hammare och en fjäder falla på månen. Resultatet visar att tyngdkraften inte beror på det fallande materialet. Idag beskriver vi det som att den ”tröga massan” i Newtons andra lag (hur ett föremåls acceleration a beror på en given kraft F)

$$F = ma \quad ,$$

och den ”tunga massan” (hur tyngdkraften, som avtar med inversen till avståndet r i kvadrat, påverkar samma föremål) i Newtons gravitationslag

$$F = \frac{GmM}{r^2} \quad ,$$

har samma värde. Om vi antar att det är fråga om samma kraft är det lätt att se att accelerationen inte beror på det fallande föremålets massa m . Vi finner att

$$a = \frac{GM}{r^2} \quad ,$$

där G är Newtons konstant och M är den ”aktiva massan” (ett mått på hur stark ett givet föremåls tyngdkraft är). Newtons mekaniska världsbild hjälper oss alltså förstå Galileos experiment.

Eftersom vi ska fundera en del över tidens betydelse är det också värt att notera att Galileo sent i livet beskrev hur en pendelklocka fungerar. Han byggde aldrig sin egen version, men bidrog med en tidig länk mellan tid och gravitation eftersom en svängande pendels frekvens beror på tyngdkraften.

Samtidigt som vi ser Galileo som en tidig relativist är det naturligt att beskriva honom som en av den moderna astronomens föregångare. Galileo var bland de första som vände ett teleskop mot himlen. På så sätt upptäckte han att månen hade berg och kratrar. Han såg Vintergatan och Saturnus ringar och i januari 1601 fann han fyra av Jupiters månar. Det var ett viktigt genombrott, men för vår berättelse har Jupiters månar en något oväntad betydelse.

Det gäller ett problem med navigation till sjöss² och hur man kan bestämma latitud och longitud, osynliga linjer på jordklotet. Latituden är relativt enkel eftersom den har en naturlig definition. En given latitud är parallell med ekvatorn och kan bestämmas av dagens längd. Longituden, som går från pol till pol, är en mer godtycklig fråga. Samtidigt är den otroligt viktig för sjöfarten. Måtfel har genom historien kostat många tusentals liv. Eftersom problemet kunde lösas med noggranna tidsmätningar utlyste det brittiska parlamentet 1714 ett pris på 20 000 pund (en summa som motsvarar tiotals miljoner kronor idag). För att vinna äran och pengarna måste man mäta tiden med en felmarginal av 3 sekunder på 24 timmar. Dessutom måste metoden vara pålitlig under månader till sjöss: en rejäl utmaning.

Astronomiska observationer fungerar som både kompass och klocka. På natten kan man navigera med hjälp av stjärnorna och på dagen hjälper solens position på himlen. Samtidigt kan man använda återkommande himlafenomen för att mäta tiden. Galileo föreslog att man kunde navigera med hjälp av Jupiters månars förmörkelser, eftersom dessa ägde rum tusen gånger om året. Det visade sig vara en bra metod på land. Till sjöss var den inte särskilt

² *Albert Einstein har inte gjort entré, men han skulle troligen uppskattat navigationsproblemet. Han tillbringade många av sina somrar ombord på sin lilla segelbåt Tinef, men han var ingen skicklig kapten. Han gick ofta på grund och det hände att han kapsejsade.*

pålitlig eftersom månarna var svåra att observera från ett gungande skeppsdäck. Men idén ledde till ett oväntat framsteg. I ett försök att förbättra Galileos metod fann dansken Ole Römer 1676 att månformörkelserna kom tidigare än väntat när jorden var närmast Jupiter i sin bana, och senare när jorden var längst från sin systerplanet. Genom att mäta tidsskillnaden drog han slutsatsen att det tar en ljusstråle ungefär 22 minuter att korsa jordens bana. På så sätt hade Römer lyckats uppskatta ljusets hastighet — ett viktigt resultat, men det hjälpte inte med longituden. Det problemet löstes slutligen på ett annat sätt. Efter 40 års försök lyckades den klurige klockmakaren John Harrison tillverka ett pålitligt urverk (utan pendel!) och efter många om och men belönades han 1773 med parlamentets pris.

Nu låter vi den pålitliga klockan ticka fram till slutet av 1800-talet. Det var kris inom fysiken. Isaac Newtons mekaniska världsbild, som regerat outmanad i mer än tvåhundra år, gick inte ihop med den nya elektromagnetismen som formulerats av Michael Faraday och James Clerk Maxwell. Ett av de största problemen gällde ljusets hastighet. Enligt Newton kunde man förklara ljuset som små kulor som for fram genom rymden, allt enligt hans mekaniska lagar. Men de nya ekvationerna ledde till en annan förklaring. Ljuset beskrevs som elektromagnetiska vågor och eftersom vågor måste utbreda sig i ett medium (det måste finnas något som kan svänga fram och tillbaka — eller åt sidan — för att få till en vågrörelse) uppfann man den så kallade etern. Problemet var dock inte löst. Man tänkte sig att om jorden rörde sig genom etern på sina varv runt solen, då borde ljuset röra sig med en hastighet som berodde på dess riktning relativt jordens bana. Kanske kunde man mäta effekten och på så vis bevisa eterteorin? Nu blev det inte riktigt så, och det är viktigt att förstå vad som hände.

Den amerikanske fysikern Albert Michelson var fascinerad av frågan om ljusets hastighet och det visade sig att han hade en speciell talang för precisionsmätningar. Vid sidan av sin undervisning vid Naval Academy i Annapolis försökte han göra noggrannare ljusmätningar. Hans experiment från 1879 var ett mästerverk som ledde till att Michelson, som förste amerikan, fick Nobelpriset i fysik 1907. Resultatet för ljushastigheten ($299\,864 \pm 51$ kilometer per sekund) stod sig i många år, och när det slutligen förbättrades var det Michelson själv som gjorde det. Han fortsatte mäta ljuset under hela sin forskarkarriär, med det sista resultat publicerat efter

hans död 1931. Idag är problemet med ljushastigheten ett avslutat kapitel. Sedan 1983 ses den som en naturkonstant, med det exakta värdet $c = 299\,752\,398$ meter per sekund, som knyter ihop enheterna för längd och tid.

Efter det första ljusexperimentet spenderade Michelson två år vid olika universitet i Europa. Under en tid i Berlin gav han sig på eterproblemet och det var nu hans genialitet kom till rätta. Han uppfann en ny interferometer, ett instrument som mäter längdskillnaden i två rätvinkliga armar genom att identifiera interferensmönster (hur två vågors amplitud adderas eller subtraheras beroende på om de är i eller ur fas), men när han försökte mäta eterens hastighet fann han inte den väntade effekten. Trots besvikelsen gav Michelson inte upp. Några år senare hade han, tillsammans med Edward Morley, förbättrat mätmetoden och 1887 upprepede de experimentet, fortfarande utan det väntade resultatet. Eterteorin var problematisk.

Relativt sett

Den unge Albert Einstein tog sig an ljusproblemet redan som student. Hans lösning från 1905 är enkel och genial. Han började med att ifrågasätta Newtons teori som bygger på en universell tid, ett kosmiskt urverk som alla mätningar kan refereras till. Einstein frågade sig hur man skulle kunna mäta en sådan tid. Svaret var inte uppenbart, speciellt inte om klockorna var i rörelse. Istället föreslog Einstein att man skulle synkronisera olika klockor med ljussignaler. Genom att anta att ljuset rörde sig med samma hastighet oavsett hur man mätte, eller vem som gjorde det, härledde han den så kallade Lorentz-transformationen. Resultatet, som relaterar tid och längdmått med klockor eller måttstockar som rör sig med konstant relativ hastighet, var förbryllande.

Einsteins teori visar att en måttstock i rörelse förefaller kortare än den skulle vara i vila. En klocka som rör sig tickar långsammare — en radikal revidering av den Newtonska världsbilden. Rum och tid beror på vem som mäter. Det låter kanske konstigt, men Einstein visste att hans teori gick ihop med elektromagnetismen så han var nöjd. Dessutom var det inte fråga om några stora effekter. I normala fall skulle man inte kunna mäta skillnaden, men om man gav sig på föremål som rörde sig nära ljusets hastighet blev resultaten slående. En klocka som rör sig så oerhört fort skulle verka ticka otroligt långsamt, nästan stanna helt och hållet.

Hur kan vi förstå Einsteins teori utan att använda alltför mycket matematiskt maskineri? Det är inte helt lätt, speciellt inte när vi så småningom kommer fram till den krökta rumtiden. Det är inte utan anledning som Einsteins teori ofta beskrivs som svårhanterlig. Det är lite grann som att lära sig ett nytt språk. Först kan det verka obegripligt, men så snart man lärt sig några fraser kan man försöka konversera. Det är den nivån vi siktar på. Vi ska inte bli experter — det tar för lång tid — men vi ska försöka få grepp om några av de viktigaste ingredienserna så ett litet antal ekvationer är oundvikliga.

Antag att en klocka mäter ett (kort) tidsintervall $d\tau$ i vila, men att vi mäter samma intervall när klockan rör sig bort från oss med konstant hastighet v . På vår klocka mäter vi dt , men klockan har samtidigt flyttat sig till en ny plats $dx = v dt$ (om vi för enkelhets skull antar att den rör sig längs x -axeln). Lorentztransformationen länkar resultaten så att

$$d\tau = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \left(dt - \frac{v}{c^2} dx\right) ,$$

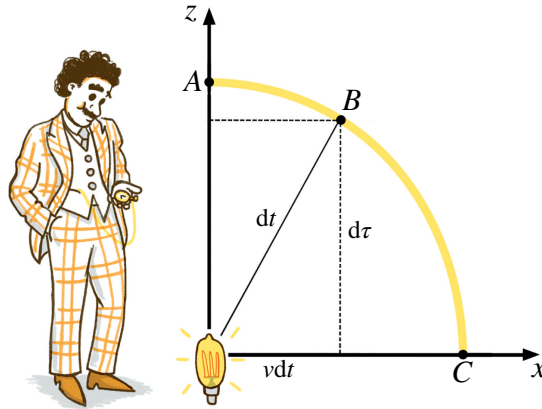
där c representerar ljusets hastighet. Vi ser att vi har blandat rum och tid! Det är en revolutionerande insikt. En observatör som rör sig med klockans hastighet mäter ren tid, men för oss verkar det som en kombination av rum och tid. Eftersom hastigheten är konstant vet vi den nya positionen och det följer att

$$d\tau = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} dt .$$

Intervall $d\tau$ är kortare än dt (eftersom $v < c$) så klockan i rörelse verkar ticka långsammare (se Figur 1). Det följer också att ljusets hastighet fungerar som en kosmisk hastighetsbegränsning. Inga föremål kan röra sig snabbare. Nu är det lätt att bli förvirrad, precis som Uppsalas filosofer på 1920-talet.

Ett liknande argument visar att om vi mäter ett längdintervall på en måttstock i rörelse blandar vi också ihop rum och tid (se Figur 2). Eftersom vi inte längre kan skilja rum från tid är det naturligt att introducera den fyrdimensionella rumtiden. Detta leder i sin tur till ett mått som alla kommer att vara överens om. I de två dimensioner vi använt är intervallet

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2$$



Figur 1: Ett enkelt tankeexperiment hjälper oss förstå varför en klocka i rörelse verkar gå långsamt. Antag att vi definierar vårt tidsmätt med hjälp av en blinkande lampa. Vi definierar tiden det tar signalen att nå en punkt A rakt upp (i z -riktningen) som vårt tidsintervall dt . Eftersom ljuset rör sig med samma hastighet i alla riktningar har signalen när den kommit fram till punkten A också nått punkterna B och C. Det är lätt att se att punkt B, som motsvarar att vårt mätinstrument rört sig till höger (i x -riktningen) med en konstant hastighet v , inte är lika långt från den horisontella axeln som punkten A. Det vill säga, på den "klockan" skulle vi mäta ett intervall $d\tau < dt$, så den verkar ticka långsammare. Vi ser också att om "klockan" rör sig med ljusets hastighet, så att den nått punkt C, då skulle den verka stanna totalt. Längs en ljusstråle passerar ingen tid! (Einstein illustrerad av Oliver Dean.)

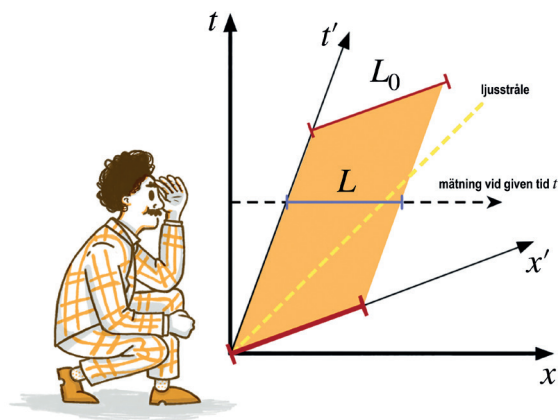
oberoende av vem som mäter och vilken klocka eller måttstock de använder.

Innan vi går vidare ska vi ta tillfället i akt att ta ytterligare ett par användbara steg. På en klocka vi bär med oss mäter vi "egentiden" τ som definieras så att

$$-c^2 d\tau^2 = ds^2 \quad .$$

Sedan gör vi livet lättare genom att arbeta i enheter där $c = 1$. Det vill säga, vi gör ingen skillnad mellan tid och längd. Idén känns igen från astronomin där stora avstånd mäts i ljusår, den sträcka man kommer på ett år med ljusets hastighet.

Nu har vi nästan alla ingredienser vi behöver för att härleda fysikens mest kända ekvation. Låt oss först beskriva rörelse genom



Figur 2: En illustration av längdkontraktionen, hur en måttstock i rörelse verkar kortare än den skulle vara i vila. Genom Lorentztransformationen kan vi relatera två koordinatsystem (t, x) och (t', x') , där det senare rör sig med konstant hastighet i x -riktningen och det första är i vila. Detta leder till de illustrerade koordinataxlarna. Tänk nu att en måttstock (den röda linjen) är i vila i systemet som rör sig. Det innebär att den måste vara parallell med x' -axeln och när den rör sig flyttar den sig uppåt längs t' -axeln. I vila har måttstocken längden L_0 (den röda linjen). Låt oss nu mäta hur lång den verkar vara om vi gör mätningen i det andra koordinatsystemet, vid en bestämd tid t . Detta leder till längden L (den blå linjen) som uppenbart är kortare än L_0 . Måttstocken verkar kortare, men den har inte krympt på något magiskt sätt. Resultatet beror på vem som mäter och det enkla faktum att vi blandat ihop rum och tid. (Einstein illustrerad av Oliver Dean.)

rumtiden utan att välja ett speciellt koordinatsystem. Precis som i Newtons mekanik måste vi använda vektorer för att beskriva rörelse. I den relativistiska bilden är det vanligt att fokusera på koordinaterna. I det familjära Cartesiska koordinatsystemet har vi framåt och bakåt, höger och vänster, upp och ner (x, y, z) . När vi lägger till tiden har vi fyra koordinater x^μ där μ har värden mellan 0 och 3 (till exempel så att $x^0 = t$ och $x^1 = x$ från tidigare). Den så kallade fyrhastigheten ges nu av

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} \quad .$$

Det vill säga, hastigheten i rumtiden definieras av hur koordinaternas värde beror på egentiden. Det är fråga om en helt vanlig deri-

vata, ingenting mystiskt. Slutligen måste vi mäta fyrdimensionella avstånd. Det är knepigare, men vi kan göra det genom att generalisera skalärprodukten för vektorer. Detta leder till den metriska tensorn $g_{\mu\nu}$ och

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad .$$

I det sista steget har vi använt Einsteins summationskonvention — när vi ser att ett index (μ till exempel) är upprepat så vet vi att vi ska summera över antalet dimensioner³. Det är ett smart trick som gör att ekvationerna blir lättare att hantera i fortsättningen. Den metriska tensorn spelar en av huvudrollerna i teorin. Den tillåter oss att mäta avstånd, vilket är nödvändigt för att beskriva rumtidens krökta geometri. Våra resultat visar att vi måste ha

$$g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu = -c^2 \quad .$$

Slutligen definierar vi den fyrdimensionella rörelsemängden

$$p^\mu = m u^\mu \quad ,$$

där m är föremålets massa i vila. Rörelsemängdens tidskomponent representerar en energi och vi ser att

$$E = -g_{\mu\nu} u^\mu p^\nu = mc^2 \quad .$$

Massa och energi är ekvivalenta!

Den speciella relativitetsteorin accepterades mer eller mindre direkt. Andra forskare hade funderat på liknande sätt och dragit liknande slutsatser. Einstein fick naturligtvis mycket av äran och nominerades till Nobelpriset i fysik för första gången 1910. Han fortsatte att jobba vid patentverket i Bern. 1906 blev han befördrad till Teknisk Assistent, men det hade nog inte särskilt mycket att göra med ljusets hastighet.

Einsteins berömda formel $E = mc^2$ ger oss tillfälle att reda ut ett annat problem. Om all energi har massa och (i princip) kan vägas, då borde ljusstrålar påverkas av tyngdkraften. Det är en gammal idé, som ledde till att John Michell redan 1784 föreslog

³I ekvationen har vi alltså en dubbelsumma där både μ och ν summeras från 0 till 3.

att det kunde finnas ”mörka stjärnor” vars tyngdkraft var så starka att de till och med skulle fånga ljuset. Resonemanget byggde på Newtons gravitationslag och tanken att ljuset beskrivs av partiklar. Det är lätt att räkna ut den så kallade flykthastigheten och om den är större än ljusets hastighet då ser det mörkt ut, men denna tidiga diskussion av vad vi idag kallar svarta hål stötte på problem när vågteorin för ljuset blev populär.

Ett annat resultat värt att notera är Johann Georg von Soldners beräkning från 1801 (också den med ljuset som partiklar) som beskriver hur en ljusstråle skulle böjas om den passerade nära solen. Med den speciella relativitetsteorin kan vi blåsa nytt liv i dessa gamla förslag och här gjorde Einstein ytterligare ett viktigt bidrag. Under det produktiva året 1905 förklarade han den fotoelektriska effekten — hur ljusstrålar kan slå loss elektroner från en atom och ge upphov till observerbara gnistor. Han gjorde det genom att introducera fotonen, en ljuspartikel vars energi ges av

$$E = hf \quad ,$$

där f är ljusets frekvens och h är Plancks konstant. Den senare spelar en huvudroll i kvantfysiken och Einsteins formel hade stor betydelse även för den teorins utveckling. Samma ekvation lägger även grunden för atomklockan och noggranna tidsmätningar (Zelan, 2020).

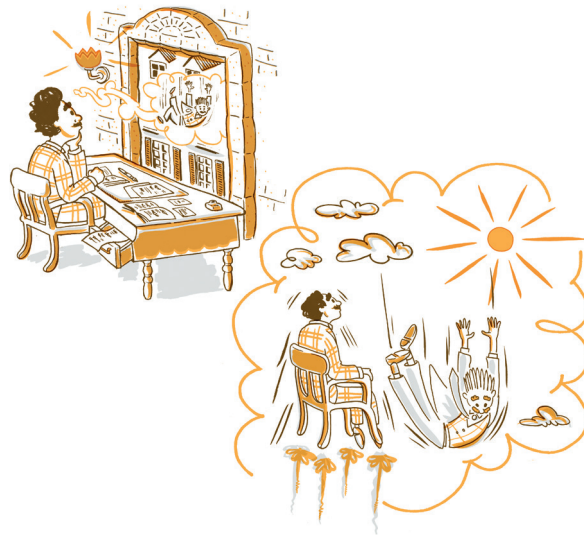
Genom att introducera fotonen har vi nått den moderna beskrivningen av ljuset. Det rör sig som en våg men kommer fram som en partikel. Faktum är att när Einstein slutligen fick sitt Nobelpris 1921 var det inte för relativitetsteorierna. De ansågs för kontroversiella och om det inte varit för Carl Wilhelm Oseen, som precis blivit medlem av Nobelkommitten, kanske det inte blivit något pris alls till Einstein. Oseen argumenterade att man inte kunde ge dansken Niels Bohr priset för atomteorin om man inte först belönade Einstein för fotonformeln. Så fick det bli. Bohr fick Nobelpriset 1922.

Allting faller på plats

När Einstein publicerade den speciella relativitetsteorin var han medveten om att något fattades. Hans teori kunde inte beskriva tyngdkraften. Det var ett stort problem, eftersom Isaac Newtons gamla gravitationslag beskrev hur lokala variationer i gravitationsfältet (som till exempel när två stjärnor cirkulerar kring varandra i

ett binärssystem) omedelbart skulle kännas av överallt i universum. Det vill säga, gravitationen respekterade inte den kosmiska hastighetsbegränsning som Einsteins första teori insisterar på. Einstein funderade på problemet, men kom ingenstans.

Genombrottet kom två år senare, någon gång under 1907, när Einstein satt och dagdrömde vid sitt skrivbord på patentverket. Genom fönstret såg han en fönsterputsare som arbetade på huset på andra sidan gatan. Då slog det honom: vad skulle hända om mannen trillade? Han skulle naturligtvis falla mot marken och troligen slå sig ganska rejält, men det var Einstein inte så intresserad av. Istället undrade han hur det skulle kännas att falla fritt. Han insåg att mannen inte skulle känna av tyngdkraften under fallet. Han skulle bara se marken accelerera upp mot honom. Man kunde inte skilja de två effekterna. Tyngdkraften och accelerationen måste vara likvärdiga. Den så kallade ekvivalensprincipen (se Figur 3) ledde till tanken att tyngdkraften kan förklaras med en krökt rumtid och lade på så vis grunden till den allmänna relativitetsteorin.



Figur 3: En illustration av Einsteins ekvivalensprincip. En fallande man känner inte av tyngdkraften. Man kan inte skilja situationen där han faller från en där observatören (i det här fallet Einstein själv) accelererar uppåt och mannen flyter omkring som en astronaut i yttre rymden. Länken mellan gravitation och acceleration leder till en teori som bygger på en krökt rumtid. (Illustration av Oliver Dean.)

Rumtidens krökning är ett klurigt begrepp och den direkta orsaken till att Einsteins ekvationer är matematiskt utmanande, men själva idén är rätt enkel. Tänk dig att du sitter i en raket i yttre rymden som accelererar mot ljushastigheten. Om en ljusstråle kommer in genom ett litet fönster på sidan av raket kommer ljusets bana att böjas mot golvet. Ljuset rör sig med konstant hastighet men raket accelererar. Enligt ekvivalensprincipen är acceleration och gravitation två sidor av samma mynt, så vi kan lika väl förklara ljusets krökta bana som ett resultat av tyngdkraften. Det vill säga, ett gravitationsfält kan böja ljusstrålar. Om man lägger till att ljuset alltid väljer den kortaste vägen mellan två punkter (i vanliga fall en rät linje) inser man att resultatet kan förklaras med att rummet (eller rättare sagt, rumtiden) är krökt.

Nu hade Einstein den idé han behövde för att komma vidare men matematiken var svår (man måste arbeta med tensorer). Han körde fast och behövde hjälp. Som tur var var hans vän från studietiden, Marcel Grossman, en duktig matematiker, så hjälpen var inte långt borta. Att formulera teorin Einstein var ute efter tog nästan 8 år av hårt arbete. Flera gånger blev det fel, men till slut skickade Einstein under en hektisk månad i november 1915 fyra korta artiklar till vetenskapsakademin i Berlin. En artikel i veckan, varje onsdag. Han finjusterade sin teori, steg för steg, och presenterade slutresultatet den 25 november.

Den allmänna relativitetsteorin beskriver gravitationen som ett resultat av rumtidens geometri — hur det krökta rummet och den elastiska tiden bestämmer hur stjärnor och planeter måste röra sig. Einsteins eleganta ekvation

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

kan ge intrycket av att det kanske inte är så komplicerat trots allt. Det kan vara så och så med den saken men principen är i alla fall lätt att förklara. Den ena sidan av ekvationen beskriver rumtidens geometri, som beskrevs av Oseen i en artikel (Oseen, 1932) i Kosmos 1932 (han hade alltså inte förlorat intresset, trots att han ägnade sin mesta tid åt teorin bakom flytande kristaller). Einsteins tensor $G_{\mu\nu}$ byggs av krökningstensorn $R_{\delta\mu\gamma\nu}$ som bara beror på den metriska tensorn⁴ $g_{\mu\nu}$ som i sin tur beror på rum och tid. Ekvationens andra sida, med energi-impulstensorn $T_{\mu\nu}$, beror på

⁴Och som leder till både $R_{\mu\nu} = g^{\delta\gamma} R_{\delta\mu\gamma\nu}$ och $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$.

var materia finns och hur den rör sig genom det krökta rummet. I praktiken är ekvationen mycket svår att lösa⁵. Tag som exempel jorden bana runt solen — ett enkelt problem för Newtons gravitationsteori. I Einsteins universum kan vi inte lösa det utan approximationer eller superdatorer. Svårigheten ligger i att rumtiden elastiskt justerar sig när jorden rör sig. Detta leder till gravitationsvågor — en oundviklig konsekvens av Einsteins ekvationer — som i sin tur leder till att systemet förlorar energi. Jorden faller långsamt närmare solen, även om det är en otroligt liten effekt.

Mer än 100 år senare ses Einsteins teori ofta som en makalös succé. Den allmänna relativitetsteorin är en av de två pelare som den moderna fysiken bygger på. Den står sida vid sida med kvantfysiken och hjälper oss förstå universum genom att förklara både hur och varför tyngdkraften fungerar. Einsteins teori beskriver ett kosmos som skiljer sig från det vi upplever i vår vardag. Tyngdkraften leder till att saker faller, men den böjer också ljusets strålar. Klockor tickar långsammare nära jordens yta än i yttre rymden. Gravitationen leder till vågor och svarta hål, så kompakta att inte ens ljuset kan fly deras dragningskraft. Teorin hjälper oss förklara universum och hur det hela började med en gigantisk explosion för ungefär 14 miljarder år sedan. Det är spännande idéer, men hur vet vi att de är rätt?

Einstein själv var övertygad. Han visste att hans teori reproducerade Newtons gamla resultat så länge det var fråga om små effekter. Han hade också löst ett problem som gällde planeten Merkurius, vars bana långsamt marscherar framåt — varv efter varv flyttar sig dess perihelium (punkten närmast solen i den elliptiska banan). När Urban Le Verrier 1859 försökte räkna ut hur de andra planeterna påverkade resultatet fann han att det fattades 43 bågsekunder varje århundrade (ungefär en tredjedel av effekten av planeten Jupiter). Det var denna lilla effekt som Einstein lyckades förklara i en av sina artiklar från 1915.

Einstein hade redan 1913 använt sin nya teori för att beräkna hur rumtidens krökning leder till ljusavbökning och att stjärnor vars ljusstrålar böjts verkar förskjutna på himlen. Han insåg att man borde kunna mäta effekten under en solförmörkelse och lyckades till och med övertyga några astronomer att det var värt ett

⁵ *Einsteins problem leder till sex icke linjära och kopplade partiella differentialekvationer som måste lösas för de sex oberoende komponenterna av den metriska tensorn.*

försök. Som tur var — för Einstein — blev de planerade expeditionerna ingen framgång. Det var tur, eftersom hans beräkning var fel. När han äntligen publicerade teorin 1915 hade han rättat felet, men då hade också första världskriget brutit ut. Observationerna fick vänta till 1919 och den berömda expedition som leddes av den brittiska astronomen Arthur Eddington. Resultatet — att ljuset böjs enligt Einsteins förutsägelse — slogs upp på tidningarnas förstasidor världen runt. Det beskrevs som en vetenskaplig revolution, en ny världsbild som konkurrerade ut Copernicus, Kepler och Newton. Einstein blev omedelbart en superkändis, men en noggrannare analys visar att resultaten kanske inte var så övertygande. Mätfelet uppskattades till ungefär 30%. Det tog lång tid innan ljusavböjningen kunde mätas på ett mer övertygande sätt.

När Einstein dog den 18 april 1955 lämnade han efter sig ett skrivbord fullt med ofullständiga beräkningar och obesvarade frågor. Många av hans idéer förblev oprövade. Effekterna var helt enkelt för små och det fanns heller inget större intresse för att testa dem heller. Einsteins teori betraktades som ett slags eftertanke inom fysikvärlden, en esoterisk konstruktion som inte hade någon direkt tillämpning, eller ens betydelse, för vår dagliga tillvaro. Teorin var svår att förstå — och förklara — eftersom den byggde på komplicerad matematik. Ända in på 60-talet räddes fysikstuderanter att hålla sig borta från relativitetsteorin. Det var tur att inte alla lyssnade.

En relativ renässans

Det fanns flera orsaker till att intresset för relativitetsteorin väcktes igen. Man hade uppfunnit atomklockan, vilket möjliggjorde noggranna tidsmätningar. Lasern gjorde det möjligt att mäta avstånd med hög precision. Astronomer fick tillgång till nya teleskop — baserade på radartechnologi som utvecklats under andra världskriget (Radhakrishnan, 2008) — som öppnade ett nytt fönster mot universum och en generation av unga fysiker bestämde sig för att det var dags för att förstå Einstein bättre.

En intressant sammanfattning av de frågor som ställdes i början av 60-talet finner man i Kosmos från 1964. Där skriver Leopold Halpern och Bertel Laurent (en av tidens ledande svenska relativister) om experimentella försök och framtida planer (Halpern & Laurent, 1964). Det är värt att notera deras spekulation om gravitationsvågor och speciellt roligt att se kommentarer om lösningen

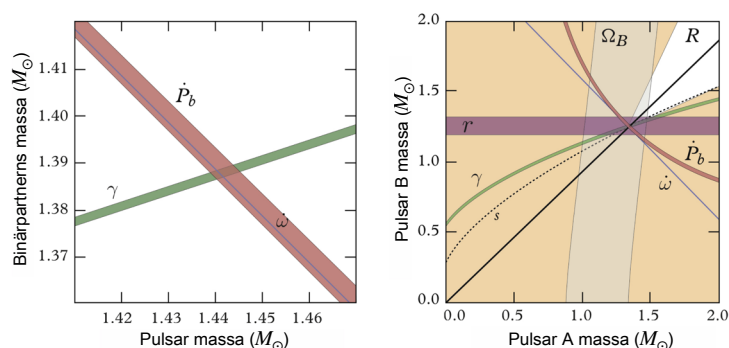
till Einsteins vakuumeckvationer som året innan hittats av Roy Kerr. Den nya lösningen, som beskriver ett roterande svart hål, har haft enorm betydelse för astrofysiken.

Den nya astronomin var revolutionerande. I tusentals år hade människan studerat natthimlen, där stjärnor långsamt glider fram, och försökt förstå ett universum där allting tar en evighet. Men så är det inte alls. När de nya radioteleskopen vändes mot himlen visade det sig att vi lever i ett våldsamt universum. Maarten Schmidt fann den första kvasaren (radiokällan 3C 273) redan 1963. Den var så ljusstark att den hade tagits för en stjärna, men det visade sig att den var miljarder ljusår borta. Det är istället frågan om en galaxkärna. Dessa aktiva galaxer kan skina många tusen gånger starkare än en vanlig galax. I en del fall ser man jetstrålar där materia spotas ut med nära ljusets hastighet och som sträcker sig flera tusen ljusår från galaxens centrum. Hur kan man förklara ett så spektakulärt kosmiskt fyrverkeri? Svaret är med gravitationen. En otrolig mängd energi frigörs när materia faller in i ett svart hål.

Vi har lärt oss att stjärnor exploderar i dramatiska supernovor när deras kärnbränsle tar slut. Det kan leda till ett nytt liv som en neutronstjärna, ofta snabbt roterande och med karakteristiskt pulserande radiostrålning. Dessa pulsarer, som upptäcktes av Jocelyn Bell Burnell 1967 när hon var doktorand i Cambridge, beskrivs av extrem fysik som vi ännu inte riktigt klurat ut. De väger mer än solen men deras massa ryms inom en volym med ungefär 10 kilometers radie. En tesked av en neutronstjärna skulle väga lika mycket som 1000 egyptiska pyramider! Tätheten är så hög att atomkärnorna pressats ihop till en vätska av — i enklaste fallet — superflytande neutroner, protoner och elektroner. Många neutronstjärnor roterar vansinnigt snabbt. Ett berömt exempel är Krabbspulsaren som bildades i en supernova som noterades av kinesiska astronomer år 1054. Den roterar 33 varv varje sekund men är faktiskt långsam jämfört med sina snabbaste kusiner. Neutronstjärnorna är små och tunga så vi måste använda Einsteins relativitetsteori för att beskriva dem.

En drastiskt förbättrad teknologi och en rikare astronomi att ta sikte på har lett till många imponerande försök att testa Einsteins teori. Ett exempel är NASAs Messenger (som cirkulerar i bana kring jorden sedan 2011) som mätt Merkurius perihelförskjutning med en precision av en bråkdel av en procent. Samma effekt testas i det mycket starkare gravitationsfältet kring binärpulsaren PSR

B1913+16 som 1974 upptäcktes av Richard Hulse (också han doktorand) och Joseph Taylor. I det fallet marscherar perihelium framåt en vinkel motsvarande 4 grader varje år. Binärpulsaren bidrar också med ett indirekt bevis för att de gravitationsvågor som Einstein förutspått är verklighet. Idén är ganska enkel. Binärsystemets omloppsbana beror bara på de två massorna (se Figur 4). Eftersom Einsteins teori inte har några fria parametrar innebär det att om vi kan mäta tre variabler så kan vi testa teorin. I fallet med PSR B1913+16 kan man mäta hur omloppsbanan långsamt krymper på grund av gravitationsvågorna — i överensstämmelse med teorin med en felmarginal av mindre än en procent. Hulse och Taylor fick Nobelpriset i fysik 1993 för detta genombrott. Ett liknande system, dubbelpulsaren PSR J0737-3039 som upptäcktes 2003, är ännu bättre. I det fallet kan man mäta sju variabler så man har fem observationella restriktioner på teorin. Resultaten bekräftar än en gång att Einsteins teori håller måttet.



Figur 4: Vi kan testa Einsteins teori med binärsystem. I fallet med binärpulsaren PSR B1913+16 (till vänster) kan vi mäta den gravitationella rödförskjutningen γ , perihelförskjutningen $\dot{\omega}$ samt hur omloppsbanan krymper på grund av gravitationsvågor $\dot{P}_b$. På så sätt kan vi bestämma de två massorna (horisontella och vertikala axeln) och dessutom testa teorin (de tre resultaten måste stämma med varandra, inom felmarginalen, så det måste finnas en punkt där alla kurvor korsar varandra). I fallet med dubbelpulsaren PSR J0737-3039 (till höger) kan man också mäta relationen mellan de två massorna R , två parametrar r och s som beskriver Shapiros tidsfördröjning och den geodetiska precessionen Ω_B . Med sju parametrar har vi hela fem tester av teorin (Översatt från *Gravitational-wave astronomy* [Andersson, 2019]).

När det gäller ljusavböjningen har moderna radioantenner bekräftat Einsteins resultat med en felmarginal på 0.01%. ESAs GAIA projekt, som siktar på att följa 1% av alla stjärnor i vår galax, väntas testa teorin till en del på en miljon. Då blir det troligen mindre svängrum för alternativa tankar. Ljusavböjningen har blivit ett av astronomins många användbara verktyg. Gravitationen kan agera som en lins som böjer ljuset från avlägsna galaxer, en effekt som Einstein föreslog redan 1912. Ibland leder det till att vi ser kopior av samma föremål. Ibland blir det delar av, eller till och med kompletta, cirklar — en slags gravitationell hägring. Genom att jämföra sådana observationer med teoretiska beräkningar kan man lista ut var det finns mörk materia (Cattena, 2019), som påverkar ljuset via sitt gravitationsfält men som inte skiner och därför inte kan ses i ett teleskop. Genom att kombinera resultatet med den imponerande galaxkatalogen från Sloan Digital Sky Survey kan man dra slutsatser om hur mycket mörk materia det finns i universum.

I grund och botten bygger Einsteins relativitetsteori på mått av rum och tid. Vi har sett hur vi kan använda ljusstrålar för att mäta längdavstånd som tidsintervall. Logiskt följer det att vi måste ha tillgång till noggranna tidsmätningar om vi vill testa det finstilta i teorin. Uppfinningen av atomklockan 1948 möjliggjorde ett antal precisionsexperiment. Teorin förutsäger till exempel att en klocka tickar långsammare i ett gravitationsfält. I vardagslivet är det en oerhört liten effekt — du känner inte av att ditt huvud åldras snabbare än dina fötter (ungefär 7 nanosekunder per år). Einstein noterade dock att ljusets frekvens skulle skiftas mot det röda i spektret när det kämpar för att fly från solens dragningskraft. Ljuset tröttnar lite, förlorar energi, och dess frekvens skiftas mot rött. Det första försöket att mäta denna rödförskjutning av solens ljus ägde rum redan 1917, men det var för svårt. Solens ytlager är kaotiskt, lite grann som ett stormigt hav, och svårt att mäta med säkerhet. Experimentet lyckades inte förrän på 1960-talet och då hade effekten redan mätts av Robert Pound och Glen Rebka. 1959 hade de studerat energiskiftet för gammastrålning i ett 23 meter högt torn. Genom att jämföra energiskiftet för fotoner som de lät falla nedåt med resultatet för fotoner som sköts upp i den andra riktningen lyckades de för första gången mäta ljusets massa.

Några år senare visade Irwin Shapiro att Einsteins relativitetsteori fortfarande ruvade på hemligheter. 1964 räknade han ut att

Ljuset saktar ned när det passerar igenom ett gravitationfält. En ljussignal kommer fram lite senare än man väntat sig. Shapiros tidsfördröjning har nu mätts med hög precision, till exempel för dubbelpulsaren J0737-3039 (se bild 4). Resultat från 2003 visar också att signaler från NASAs rymdsond Cassini, på väg mot Saturnus, fördröjdes helt enligt teorin med en noggrannhet av 0.001%.

Ett uppenbart sätt att använda atomklockor för att sätta Einstein på prov är att lämna en klocka i labbet och flyga en annan på hög höjd. Om teorin är korrekt kommer den flygande klockan att ticka snabbare än den som lämnats på jorden. Men riktigt så enkelt är det inte eftersom vi också måste ta hänsyn till Einsteins speciella relativitetsteori. En klocka i rörelse tickar långsammare än en klocka i vila. Det första lyckade klockexperimentet utfördes 1971 av Joseph Hafele och Richard Keating. De tog helt enkelt en atomklocka med sig på en resa jorden runt, och tillbaka igen, på vanliga passagerarflyg. Klockan tog upp två säten, medan forskarna fick nöja sig med ett var. När de kom hem räknade de omsorgsfullt ut de två relativitetsteoriernas kombinerade effekt. Experimentet hade det väntade resultatet. Den resande klockan hade jetlag.

Att klockor saktar in har bevisats med mycket högre precision än dessa pionjärer kunde nå. Ett genombrott var Gravity Probe A, ett raketexperiment som 1976 flög en maserklocka (masern är mikrovågornas motsvarighet till lasern). När raketen efter en flygfärd på mindre än 2 timmar plaskade ner i Atlanten hade man testat teorins med en noggrannhet bättre än 0.01%. Strävan efter högre precision fortsätter, till exempel med klockexperimentet ACES/Pharao ombord på International Space Station. Det kommer att bli den bästa mätningen av tiden hittills.

Det är också värt att nämnda Gravity Probe B, ett projekt som tog decennier från idé till verklighet. När satelliten äntligen sköts upp (efter att ha skjutits upp många gånger ...) 2004 var syftet att med känsliga gyroskop mäta hur jordens rotation drar med sig rumtiden. Det lyckades och vi har nu bevis för att effekten stämmer med Einsteins teori med en felmarginal på ungefär 1%.

Det är rimligt att tycka att Einsteins relativitetsteori inte påverkar vår dagliga tillvaro — det är bara frågan om små justeringar så det finns inget att oroa sig för. Så är det nog, men många av oss använder relativitetsteorin dagligen. Vår moderna värld byg-

ger på tillämpningar som inte skulle vara möjliga om vi ignorerade Einstein. Det uppenbara exemplet är det globala positioneringssystemet GPS, ett biljondollarprojekt med 24 satelliter, var och en med en atomklocka, som roterar runt jorden och möjliggör navigation med en noggrannhet på 15 meter och en lokal tidsbestämning med ett fel mindre än 50 miljarddelar av en sekund — en imponerande lösning på det gamla longitudproblemet! Satelliterna, som flyger med en hastighet av 14 000 kilometer i sekunden, roterar runt jorden två varv varje dag. Vi har redan sett att det betyder att vi måste använda både den speciella och den allmänna relativitetsteorin. Den speciella teorin visar att klockorna tickar långsammare än en klocka på jorden, hela 7 miljondelar av en sekund varje dag. Samtidigt förutsäger den krökta rumtidsteorin att den flygande klockan ska ticka snabbare, 45 miljondelar av en sekund per dag. Det låter som små effekter, men de kompenseras av ljusets enorma hastighet och resultatet blir att om vi inte tar hänsyn till relativiteten växer navigationsfelet med ungefär 7 meter per minut. Då blir det snabbt säkrare att styra manuellt.

Vårt extrema kosmos

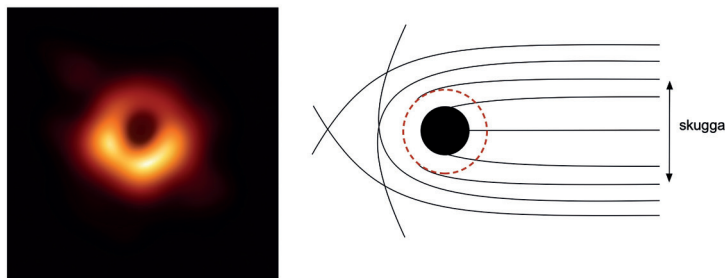
När intresset för Einsteins teori väcktes under slutet av 1950-talet var det tack vare en liten grupp av entusiastiska forskare. En av de ledande personerna var John Wheeler vid Princeton. Han var fascinerad av det motsägelsefulla beteendet hos stjärnor som kollapsar under sin egen tyngdkraft. Teorin beskriver hur en kollapsande stjärna skrynklar ihop rum och tid tills den omges av ett slags osynlighetsmantel (den så kallade händelsehorisonten). Ända in på 60-talet var diskussionen om sådana föremål — som vi nu, tack vare Wheeler, kallar svarta hål — förvirrad, och det fanns inga som helst bevis att sådana exotiska objekt faktiskt finns i världsrymden.

Situationen ändrades dramatiskt när kosmisk röntgenstrålning observerades 1962. Man insåg snart att en av de starkaste strålningskällorna, Cygnus X1 i stjärnbilden Svanen, varierade snabbare än väntat och att det därför måste vara fråga om ett litet föremål, kanske ett svart hål. Bevisen för detta stärktes under 70-talet med resultaten från de första röntgenobservationerna via satellit. Så snart Uhuru-satelliten skjutits upp i december 1970 blev det uppenbart att många av galaxens röntgenkällor måste vara kompakta. Strålningen kommer från materia som slits av en partner i ett binärsystem och hettas upp till hög temperatur när den

faller mot det svarta hålet. Från binärsystemets rörelse kan man matematiskt väga den osynliga skurken i dramat. På så sätt har vi lärt oss att Cygnus X1 måste vara ett svart hål som väger ungefär 15 gånger så mycket som solen. Beviset för detta blev till slut så starkt att Stephen Hawking gav upp ett berömt vad han slagit med sin kollega Kip Thorne, en av John Wheelers gamla studenter.

Sedan 1970-talet har vi lärt oss mycket om de svarta hålen. Vi vet att de finns i dramatiskt olika storlekar. Absoluta giganter gömmer sig i kärnan på i stort sett varje galax och vi ser dem ofta som kvasarer. I maj 1994 rapporterade NASA att Hubbleteleskopet hade "sett" ett svart hål i galaxen M87. Gas i galaxkärnan virvlade runt med hög hastighet. Spektroskopiska mätningar tydde på en osynlig massa som vägde mer än 2 miljoner solar. Ytterligare imponerande bevis för ett supertungt svart hål presenterades ett år senare via emissionslinjer från maserstrålning i galaxen NGC 4258. Radioobservationer med Very Long Baseline Array kunde urskilja en ackretionsskiva med gas som roterade runt en mörk massa. Gasens hastighet tydde på en central massa mer än 40 miljoner gånger så tung som solen. Sedan dess har astronomer studerat många liknande exempel och det spekuleras att dessa tunga svarta hål kan ha något att göra med galaxernas uppkomst. I april 2019 sattes kronan på verket. Det internationella forskarlaget bakom Event Horizon Telescope hade lyckats sätta samman en detaljerad bild av skuggan av det svarta hålet i M87s galaxkärna (se Figur 5). Även om det inte är frågan om en faktisk bild av det svarta hålets händelsehorisont är det ett mycket imponerande resultat. Det svarar mot förväntningarna och är svårt att förklara utan att involvera ett svart hål. Bilden prydde tidningarnas förstasidor världen runt.

Att vår egen galax även den gömmer ett gigantiskt svart hål har också diskuterats sedan 70-talet. I Vintergatans centrum finns en ovanlig radiokälla, Sagittarius A*, som troddes vara ett svart hål. I mer än 25 år har två forskarlag, ledda av Andrea Ghez och Reinhard Genzel, följt hur stjärnor nära galaxens centrum rör sig — ett projekt som kräver precision och tålamod. Resultaten visar att stjärnornas banor är konsistenta med ett svart hål ungefär 3 miljoner gånger så tungt som solen (se Figur 6). Som belöning för mödan fick Ghez och Genzel dela 2020 års Nobelpris i fysik med Roger Penrose, en av de forskare som förklarade hur svarta hål fungerar redan på 1960-talet (se artikel av Ingemar Bengtsson i

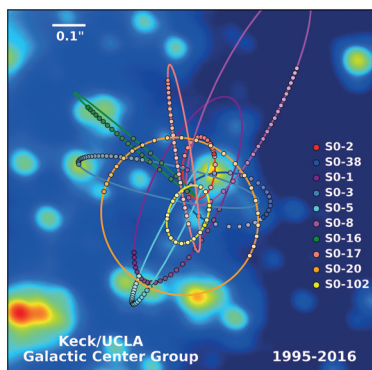


Figur 5: Den berömda bilden på det svarta hålet i galaxkärnan M87 (till vänster). Bilden visar egentligen inte det svarta hålets händelsehorisont, utan snarare den "skugga" som uppkommer på grund av den starka ljusavböjningen (se skissen till höger där en ljusstråle från punkten A böjs så att den når punkten B) och den så kallade ljusringen, där gravitationen är så stark att ljusstrålar kan fångas i en evig cirkel. För ett icke roterande svart hål är ljusringens radie 50% större än händelsehorisontens. Oavsett detaljerna är det ett imponerande resultat som är svårt att förklara utan att blanda in ett svart hål. (Fotot till vänster från *The Astrophysical Journal Letters*, 875:L1.)

denna Kosmos). Priset knyter samman årtionden under vilka de svarta hålen gått från spekulatión till vardagsastronomi.

Einstein teori bygger på att rum och tid är flexibla. De kan sträckas tills klockor verkar stanna, som vid ett svart håls händelsehorisont. Effekten kan vara dramatisk, men flexibiliteten påverkar också det finstilta. Teorin spår att alla ändringar i tyngdkraften rör sig som vågor, små krusningar i rumtiden som breder ut sig med ljusets hastighet.

Gravitationsvågorna visade sig kontroversiella och svårfångade. Under flera decennier debatterade experter om de kunde vara verklighet. Einstein själv argumenterade både för och emot! Så snart problemet lösts i slutet av 1950-talet började man försöka klura ut hur man skulle kunna fånga vågorna. De första försöken gjordes av pionjären Joseph Weber under 60-talet men vi fick vänta ett halvt århundrade på genombrottet. Teknologin förbättrades steg för steg tills instrumenten nådde den känslighet som borde behövas för att mäta gravitationssignaler från andra galaxer. Det var ett mästerverk i ingenjörskonst. LIGO-projektets två laserinterferometrar — en modern version av Michelsons gamla eterexperiment — kan idag mäta rörelsen hos speglar 4 kilome-



Figur 6: Omloppsbanor för stjärnor som rör sig runt Vintergatans centrum. Resultaten tyder på att vår galax döljer ett svart hål ungefär 3 miljoner så tungt som solen. (Bilden kommer från Professor Andrea Ghez och hennes forskarlag vid UCLA och bygger på data från Keck-teleskoperna.)

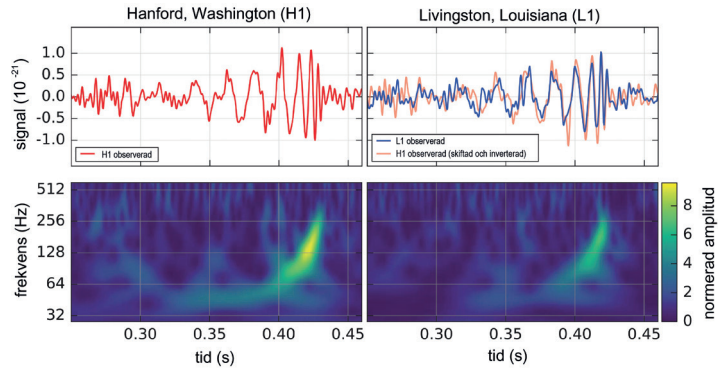
ter isär med en precision bättre än en tusendel av en atomkärna. Det är alltså frågan om en relativ längdförändring av ungefär

$$h = \frac{\Delta L}{L} = 10^{-21} \quad .$$

Kosmiska gravitationsvågor är så otroligt svaga eftersom det är fråga om astronomiska avstånd. Att man kan konstruera ett mätinstrument — i stort sett en avancerad linjal — med sådan precision är på många sätt fantastiskt (se artikel av Aleksandra Foltynowicz Matyba i denna Kosmos).

Den första gravitationsvågen fångades den 14 september 2015 (se Figur 7). Efter att ha jämfört signalen, som kom att kallas GW150914 efter dagens datum, med simuleringar från superdatorer drog man slutsatsen att vågorna skapats i en kollision av två svarta hål för 1,4 miljarder år sedan, vid en tid då det bara fanns encelliga organismer på jorden. När de två svarta hålen slog ihop frigjordes en energi motsvarande 3 solmassor. Omräknat till elektromagnetisk energi strålade kollisionen under en bråkdel av en sekund starkare än alla stjärnor vi kan se på natthimlen. Det bildades ett tyngre svart hål — precis som teorin förutspått. Genombrottet följdes av liknande signaler, och vi har idag sett (eller snarare hört, eftersom en gravitationsvågsantenn mer liknar en mikrofon än ett teleskop) ett 50-tal svarta-hål kollisioner. LIGO-

projektets ledare Kip Thorne, Rai Weiss och Barry Barish fick ett välförtjänt Nobelpris 2017.



Figur 7: Den första gravitationsvågssignalen som fångades av LIGO-instrumenten i september 2015. De övre panelerna visar hur signalen varierar med tiden. Genom att skifta signalen den tid det tar ljuset att röra sig mellan de två instrumenten i Hanford och Livingston (10 millisekunder) kan man se att det är samma signal i de båda mätningarna (den högra panelen). De undre panelerna visar en tid-frekvens representation av resultatet. Vi ser att amplitud och frekvens ökar fram till det ögonblick då de svarta hålen slår ihop (Översatt från B.P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>).

Det andra genombrottet för gravitationsvågsastronomi följde den 17 augusti 2017 när LIGOs instrument fångade en svag signal, GW170817, som skapades precis innan två neutronstjärnor kraschade ihop. Det är alltså frågan om den binära pulsarens slutliga öde (om vi väntar en miljard år eller så) — ett astronomiskt spektakel med få likar. När stjärnorna slår ihop hettas materian upp till temperaturer av den nivå som studeras i partikelexperimenten vid CERN, men neutronstjärnorna pressar samtidigt samman materian till en täthet som aldrig kan nås i kontrollerade experiment. Om vi vill klura ut vad som händer, måste vi beskriva fysik som vi inte riktigt förstår. Det är ett svårt problem som involverar i stort sett all modern fysik, från kvantteorin till gravitationen och med ingredienser från den kondenserade materiens fysik (eftersom en neutronstjärnas kärna väntas vara superflytande) och elektromagnetism (eftersom stjärnorna har starka magnetfält), och våra modeller måste inkludera det finstilla eftersom LIGOs instrument kan följa signalen i flera minuter. Genom

att jämföra signalen med resultat från tidsödande (och dyra!) superdatorsimuleringar kan man försöka reda ut den extrema fysiken.

Stjärnkollisionen leder till en våldsamt vibrerande massa, som vi hoppas kunna studera med nästa generation gravitationsvågsinstrument någon gång på 2030-talet. Efter några sekunder följer en explosion av gammastrålning, en signal som man också lyckades fånga 2017. När nyheten spreds pekade astronomer — proffs såväl som amatörer! — sina teleskop mot kollisionens kvarleva. Under de månader som följde studerade man den optiska och infraröda strålningen som skapats när materia som slungats ut under kollisionen genomgick snabba kärnreaktioner och bildade tyngre element. Denna så kallade kilonova hade förutspåtts men aldrig tidigare studerats i detalj och resultatet var fascinerande. Det pekade mot att kollisionen hade producerat 50 gånger jordens massa av silver, 100 gånger jordens massa av guld och 500 gånger jordens massa av platina. Allt på några få sekunder. Om du har en guldring på fingret är den troligen gjord av ett material som bildats i en stjärnkollision.

Vi kan också använda resultaten från GW170817 för att testa ytterligare en aspekt av Einsteins teori. Genom att jämföra ankomsttiden för gravitationsvågorna med den elektromagnetiska strålningen kan man dra slutsatsen att vågorna rör sig med ljusets hastighet, precis som Einstein förutspått. Från ett partikelfysikaliskt perspektiv betyder det att gravitonen, precis som sin kusin fotonen, måste vara (så gott som) masslös. Dessutom kan vi ta ett steg mot att lösa kosmologiska frågor.

Att väga universum

Vi har sett hur Einsteins relativitetsteori beskriver exotiska objekt som svarta hål och neutronstjärnor och hur den flexibla rumtiden leder till gravitationsvågor och en ny sorts astronomi, mer som att lyssna än att se. Från en kosmologisk synpunkt får vi ett annat perspektiv på Einsteins ekvationer. Varje lösning vi hittar är ett universum. Troligen inte det universum vi lever i, eftersom det kompliceras av galaxer, stjärnor, planeter, människor, växter och små kryp. Allt detta ryms inte i matematiken, men man kan tänka sig att ta ett genomsnitt — ungefär som man gör i hydrodynamiken där ett vätskeelement som innehåller ett gigantiskt antal atomer beskrivs av ett litet antal termodynamiska variabler. På

samma sätt kan man använda ett medelvärde av ett stort antal galaxer för att bygga en modell av universum. Sedan kan vi förbättra teorin genom att jämföra med observationer. Det är ett storslaget forskningsproblem. Genom att väga universum försöker vi luska ut var allting — rum, tid och materia... allting — kom ifrån. Hur det hela började och hur det kanske tar slut någon gång i en avlägsen (förhoppningsvis!) framtid.

När Einstein formulerade sin teori var det allmänt accepterat att universum var statiskt. Ekvationerna pekade dock i en annan riktning — mot en världsrymd som växte (eller krympte). Einstein löste problemet genom att introducera en extra term i ekvationen, den så kallade kosmologiska konstanten. Den nya termen såg till att gravitationen sköt ifrån istället för att dra emot. Det visade sig vara ett misstag. Edwin Hubble upptäckte 1929 att de flesta avlägsna galaxer rör sig bort från oss — deras ljus har skiftats mot det röda i spektret. Universum expanderar och vi kan glömma den kosmologiska konstanten. Eller kanske inte

Om universum expanderar måste det varit mindre om vi tittar tillbaka i tiden. Om vi går tillräckligt långt tillbaka, kommer vi till ett ögonblick när allt började? Det första beviset för en ur-explosion — Big Bang — identifierades av Arno Penzias och Robert Woodrow Wilson när de 1964 hittade en mystisk störning i signalen från sitt radioteleskop. Störningen var oväntat stark, jämnt fördelad över himlen både dag och natt. Det tydde på en homogen strålning från universum, motsvarande en temperatur på ungefär tre kelvin. Vi vet nu att denna mikrovågsbakgrund är en viskning från universums födelse.

Med hjälp av satellitinstrument, som COBE på 1980-talet och mer nyligen WMAP och Planck, har vi kunnat studera finstrukturen i universum när det var ungefär 400 000 år gammalt (vid den så kallade rekombinationen, när fotonerna frikopplades från materia). Vad vi ser är små variationer som har sitt ursprung i kvantfluktuationer i universums tidigaste stadier. Dessa imponerande resultat tillåter oss att testa våra idéer om kosmos. När vi kombinerar all information med kosmologins ekvationer, som formulerades av Alexander Friedmann redan 1922, ser vi att vi behöver tre ingredienser för att förklara resultaten. Den minsta delen, ungefär 5%, är vanlig materia, atomer, molekyler, stjärnor, du och jag. Ungefär en fjärdedel är mörk materia, som vi inte ser men som vi vet behövs för att förklara observerad ljusavböjning från avlägs-

na galaxer. Den del som blir över, ungefär 70% av universum, är ett mysterium. Den har ett namn, mörk energi, men vi har ingen aning om hur den kan förklaras (Johansson, 2019). Vad vi vet är att den spelar samma roll som den kosmologiska konstanten, det är den ingrediens som ser till att universums expansion fortsätter att accelerera.

Samtidigt som vi gjort stora framsteg mot en tydligare bild av universum är det uppenbart att vi har många gåtor kvar att lösa. Svaren vi har idag är inte tillfredsställande eftersom vi bara kan förklara en liten del av universum. Det finns förslag på den mörka materian — troligen är det frågan om en ny partikel som vi än så länge inte lyckats fånga — så jakten går vidare efter 40 år av fruktlöst sökande. Den mörka energin är ännu mer förbryllande. Vi har i stort sett ingen aning hur vi ska förklara den, trots att frågan diskuterats i mer än 20 år (att vårt universum accelererar visades med hjälp av supernovaobservationer 1998 och ledde till att Brian Schmidt och Adam Riess fick dela 2011 års Nobelpris).

Så vad har vi egentligen lärt oss? Hade Einstein rätt? Det är klart han hade. Vi har sett hur hans krökta rumtid förklarar ett imponerande antal fenomen i detalj. Alternativa teorier måste förklara alla dessa experiment och det är inte lätt. Samtidigt är det klart att Einstein hade fel. Eller kanske det är bättre att säga att hans teori inte är det slutliga svaret. Med hjälp av hans teori kan vi förstå universum bättre — mycket bättre — men det finns fortfarande problem kvar att lösa. En välkänd fråga gäller relativitetsteorins relation till kvantfysiken. Trots att jakten på en kvantiserad gravitationsteori har pågått i nära 100 år verkar vi inte vara mycket närmare gåtans lösning. Det finns fortfarande mycket fysik kvar att klura ut.



Vidare läsning

- Andersson, N. (2019). *Gravitational-wave astronomy: Exploring the dark side of the Universe*. Oxford University Press.
- Bengtson, A. (1984). Mätning av ljushastigheten, *Kosmos 1984*, 117-125.
- Cattena, R. (2019). Vad är mörk materia?, *Kosmos 2019*, 12-29.
- Halpern, L. & Laurent, B. (1964). Experiment med gravitationen, *Kosmos 1964*, 13-36.
- Johansson, J. (2019). Universums accelererande expansion och den mörka energin, *Kosmos 2019*, 130-149.
- Oseen, C. W. (1921). Omkring relativitetsteorien, *Kosmos 1921*, 122-159.
- Oseen, C. W. (1932). Fysikens rumskonstruktion, *Kosmos 1932*, 141-162.
- Radhakrishnan, V. (2008). Olof Rydbeck och den tidiga svenska radioastronomin: En personlig reflektion, *Kosmos 2008*, 50-75.
- Will, C. & Yunes, N. (2020). *Is Einstein still right?*. Oxford University Press.
- Zelan, M. (2020). Optisk tid — en pågående revolution inom tidsmätning, *Kosmos 2020*, 132-146.