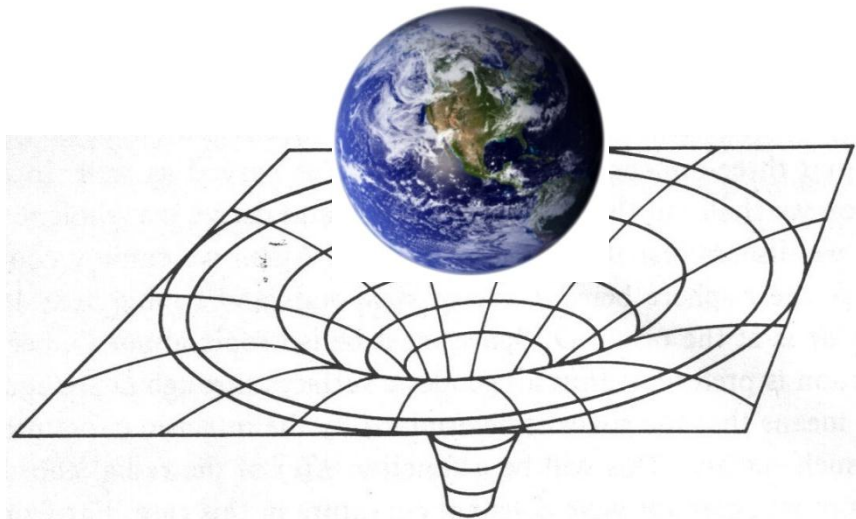
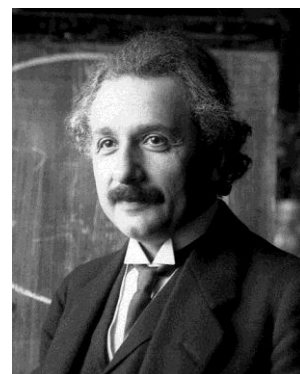


GRAVITATION

HAS-KURS 2/10 -12

Anteckningar efteråt



Sida 1

3

7

1.1 Till Newton

1.2 Gravitationslagen

1.3 Gravitationen i nytt ljus

Arne Sikö

Föreläsning 1

GRAVITATION

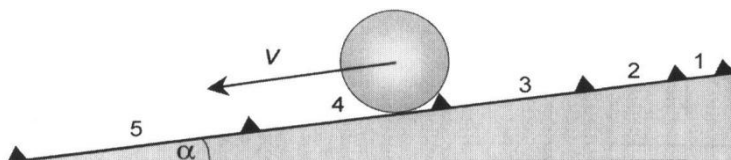
Arne Sikö 2012.

1.1 Till Newton

Idén att föremål dras mot varandra på grund av sina massor är inte gammal, historiskt sett. För Aristoteles, Antikens gigant, föll föremål mot jorden för att det var deras natur, och snabbare desto tyngre de var. Lättare ämnen drog sig däremot i stället uppåt. Allt tillhörde något av de fyra elementen, jord, vatten, luft och eld; att det senare vill gå uppåt vet ju var och en som studerat ett ljus eller en lägereld.

Man kunde tänka sig någon filosofer över vad som skulle hända om ett föremål kastades mot månen, men inga sådana tankar tycks någonsin ha dykt upp. Jorden var centrum för all rörelse i universum. De onåbara himlakropparna var inte av samma materia som jorden, utan perfektare allt högre upp, så där förekom inga förändringar, inklusive sådant som mer eller mindre oordnad rörelse.

Det sättet att se på naturen anammades både av filosofer och den allt mäktigare, kristna kyrkan och blev så norm i närmare tvåtusen år. Brytningen kom fram emot 1500-talet med Nicolaus Copernicus, Tycho Brahe, Johannes Kepler och Galileo Galilei som framträdande figurer. Nu var ju inte längre jorden i universums centrum, utan solen, vilket fick både Kepler och Galilei att fundera över att den kanske på något vis drar till sig planeterna.



Figur 1. Hur Galilei studerade tyngdaccelerationen. (Bilden tagen ur Malcolm Longair: Theoretical Concepts in Physics.) Han placerade små upphöjningar i planet och justerade deras inbördes avstånd så att det tickande ljudet när kulan rullade ned blev till en jämn rytm. Det var lätt att höra och gav därför en rätt noggrann tidsskala (fast relativ). Galilei var en god lutenist och bör alltså in ta ha haft svårt att få rätt på detta. v är hastigheten., vars ökning efter hand gav besked om accelerationen.

Det var bara vaga idéer och kunde väl knappast heller bli mycket mer under omständigheterna. Idén om en universell gravitation kom först ett sekel senare med Isaac Newton, men då med hjälp av det som Kepler och Galilei mer konkret hade lyckats komma fram till. För Galilei stod det klart att alla föremål faller lika snabbt mot jorden, åtminstone om man kan bortse från luftmotståndet. Han kunde alltså tänka sig ett lufttomt rum, något som varit otänkbart för Aristoteles, för vilken vacuum inte kunde finnas eftersom sådant skulle sakna ändamål i Natu-

ren. Galilei lät bronskolor rulla nedför svagt sluttande plan och kunde på så vis i godan ro studera hur deras hastigheter ökade på grund av dragningen mot jorden. (Noggrann tidmätning var svårt på grund av bristen på bra klockor.) Så blev Galilei fader till den moderna kinematiken, vårt sätt att se på fart och acceleration, något som Newton kunde ta över.

Han kunde också utnyttja Keplers monumentala insats, hans tredje lag, som anger sambandet mellan planeternas omloppstider kring solen – perioden – och deras medelavstånd. Tabell 1 förklarar.

Planet	Period (år) P	Medelavstånd (ua) a	P ²	=	a ³
Merkurius	0,241	0,387			
Venus	0,615	0,723	0,378		0,378
Jorden	1	1	1		1
Mars	1,88	1,52	3,53		3,51
Jupiter	11,9	5,20			
Saturnus	29,4	9,55			
Uranus	83,7	19,2			
Neptunus	164	30,1			

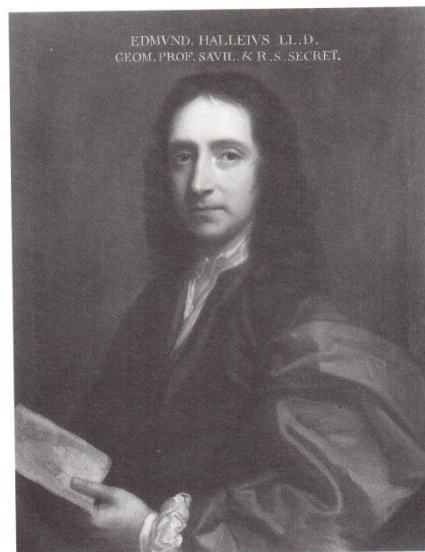
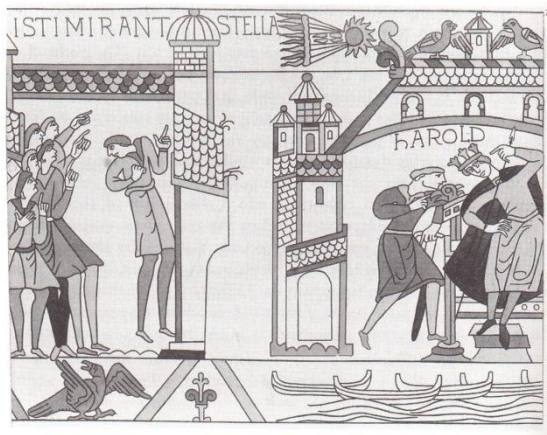
Tabell 1. Bandata för planeterna (från kompendiet). Perioden P är omloppstiden kring solen. Medelavståndet a är i astronomiska enheter. Det är 1 för jorden eftersom jordens medelavstånd är den astronomiska enheten. Den lilla skillnaden för Mars beror på avrundningsfel. (Mer ingående matematiskt gäller att $P^2 = \text{konstant} \cdot a^3$, men om jordens bandata tas som enheter blir konstanten lika med 1 och alltså $P^2 = a^3$.)

I tabellen multiplicerar vi först Venus period med sig själv och får $0,615^2 = 0,378$. Sedan tar vi avståndet gånger sig självt tre gånger, vilket ger $0,723^3 = 0,378$, samma resultat. Detsamma för jorden och för Mars, och för de övriga stämmer det också. Det visar att perioden i kvadrat är lika med medelavståndet i kubik, vilket är Keplers tredje lag i sin enklaste form och som tog honom åtta år av mödosamt räknande att få fram.

Keplers tredje lag säger ingenting om vad det är för kraft som verkar, men blev Newtons språngbräda till att få reda på det. Rätt rimligt, därför, det som Newton skrev i ett berömt brev, att han fått möjlighet att se långt då han suttit på jättars axlar.

Vid den tiden – andra halvan av 1600-talet – stod det klart att det var en kraft som utgick från solen som höll planeter, kometer m.m. i sina banor. Newtons vän Edmond Halley studerade kometer och kom att särskilt intressera sig för dem som uppenbarade sig åren 1532, 1607 och 1682. De låg på samma tidsavstånd, ca 75 år, vilket fick Halley att misstänka att det i verkligheten rörde sig om samma komet. För det studerade han deras banor, men det blev också viktigt

att veta hur solens kraft på dem ändrades med avståndet. Detta frågade han därför Newton om 1684 och fick svaret att det var ett problem som han hade löst för tjugo år sedan!



Figur 2. Edmond Halley (1656-1742) och kometen på Bayeuxtapeten, som fått hans namn. Den latinska texten lyder: "Alla beundrar stjärnan." (Jämför engelska "esteem" = uppskatta, högakta.)

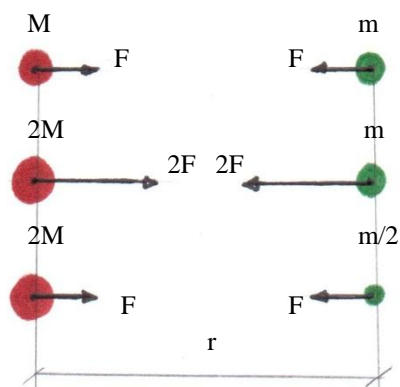
Halley var astronom och sysselsatte sig bl.a. med kometer, men gjorde också stora insatser för att med astronomiska metoder lösa problemet med finna longituden till havs. Han var också den som övertalade Newton, som annars var mycket ovillig att publicera sina resultat, att ge ut sitt epokgörande verk *Principia*, som kom 1687.

Efter diskussionerna med Newton blev Halley säker på att de tre kometerna var samma himlakropp och förutsade att den skulle återkomma ungefär 75 år efter 1682, vilket den också gjorde och döptes efter den då döde Halley. Kometen, som senast syntes 1986, är också den som avbildas på Bayeuxtapeten.

Det som Newton hade kunnat bevisa med hjälp av Keplers tredje lag var att dragningskraften avtar med kvadraten på avståndet från solen, d.v.s. att dubbelt avstånd ger fyra gånger så liten kraft, trefaldigt avstånd nio gånger mindre kraft, fyrfaldigt sexton gånger mindre o.s.v. Detta var ett betydelsefullt resultat som ledde till den fullständiga gravitationslagen, som sedan kunde användas för att förstå och förutsäga rörelseförhållandena i solsystemet och efter hand i hela universum.

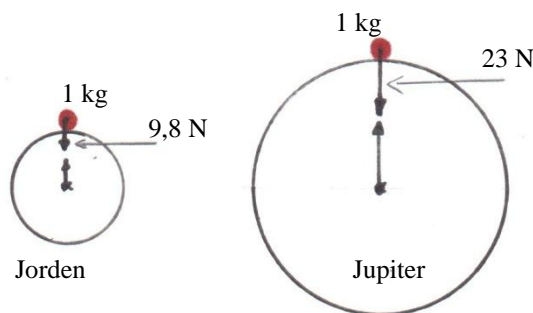
1.2 Gravitationslagen

Gravitationslagen (ibland kallad "tyngdlagen") säger att kraften mellan två kroppar också beror på deras massor och ökar/minskar i proportion med dem. Om en massa dubblas blir också kraften dubbelt så stor o.s.v. Som figur 3 visar är kraften lika stor på båda kropparna. Överst är den F , men därunder har den vänstra massan dubblats så att den ömsesidiga kraften nu är $2F$. Underst har den högra massan halverats så att kraften åter är F .



Figur 3 Gravitationslagen. Två massor M och m på avståndet r . Krafterna utgår från de klotformiga kropparnas mittpunkter. Kraften är $F = 6,7 \cdot 10^{-11} \cdot Mm/r^2$, med massorna i kilo, avståndet r i meter och kraften F i Newton.

Hur stor är då gravitationskraften mellan två kroppar? Om två personer står intill varandra är den mycket mindre än vad den mest obetydliga vindpust skulle kunna åstadkomma och gick inte att mäta på Newtons tid. En geolog föreslog ett sätt – vi ska se varför idén kom från just den yrkesgruppen – som lyckades mot slutet av 1700-talet, då man fick fram ett talvärde på den s.k. gravitationskonstanten (som finns i texten till figur 3.) Det visade sig att gravitationen, som vi nu vet, är den svagaste av alla krafter trots att det är den som håller samman universum. Den ömsesidiga gravitationskraften mellan två villor på hundra meters avstånd kan uppskattas till 0,1 miljondels Newton, vilket är tyngden på jorden av ett föremål med massan en hundratusendels gram!

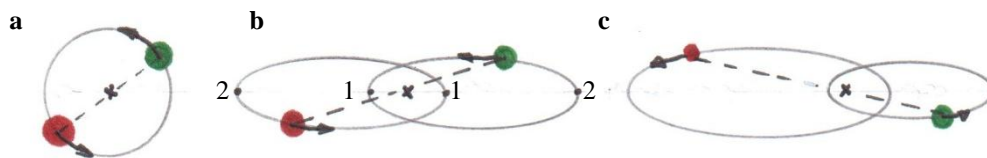


Figur 4 Tyngd. På jorden har ett föremål med massan 1 kg tyngden 9,8 N (ofta avrundat till jämnt 10). På Jupiter är den 2,3 gånger större, d.v.s. 23 N. Jordan dras mot föremålet med samma kraft, som också är ritad. För ett sfäriskt föremål fungerar det som om kraften utgår från centrum. Jupiter har 318 gånger större massa än jorden, så man kunde tro att tyngden av ett kilo där skulle vara lika mycket större. Men Jupiter är större än jorden, vilket gör att avståndet mellan föremålet och planetens centrum är större på Jupiter, vilket ju minskar gravitationskraften.

Den tyngd man känner, t.ex. av sin kropp som dras mot jorden, är en gravitationskraft. Ett uttryck som ”tyngdkraft” är därför tokigt och närmast vad som

brukar kallas tårta på tårta. (Ord som CD-skiva och IC-krets är av samma slag.) Ett föremåls tyngd varierar, är mindre på månen, där man skulle känna sig lättare än på jorden, och större på Jupiters yta. Massan ändras däremot inte, ett kilo är ett kilo var det än befinner sig och är ett mått på en kropps materieinnehåll, antalet ingående atomer, kan man säga (drygt 10^{25} i ett kilo järn).

Åter till geologen och jorden i figur 4. Att kraften på föremålet på ytan är så mycket större än den mellan villorna beror, som man förstår, på jordens oerhört mycket större massa. Eftersom vi vet jordradien skulle man kunna räkna ut kraften med hjälp av gravitationslagen om jordens och föremålets massa är kända. Men kraften på ettkilosmassan vet vi ju – den är 9,8 Newton – så i stället har vi möjlighet att räkna baklänges och på så vis få reda på jordens massa. Det var vad geologerna var ute efter. När det var gjort var det inte svårt att beräkna jordens medeldensitet, som gav dem anvisningar om vad jorden kunde tänkas bestå av. På samma sätt kunde solen ”vägas” med hjälp av jorden, allt i allt framgångar som effektivt skingrade eventuella tvivel på gravitationslagens användbarhet.



Figur 5 Dubbelstjärnor. Kryssen markerar stjärnsystemens tyngdpunkter. De båda i a har samma massa, liksom de i b, men i c har den gröna större massa än den röda.

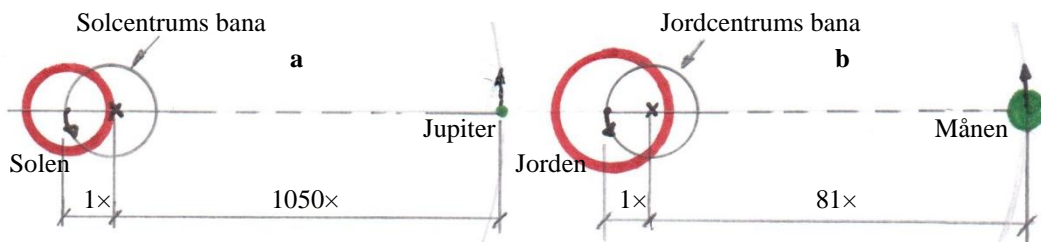
En hel del av stjärnorna är dubbelstjärnor, som i figur 5a, där två roterar kring varandra och den gemensamma tyngdpunkten p.g.a. den ömsesidiga gravitationen. Tyngdpunkten ligger i mitten eftersom båda antas ha samma massa, och deras gemensamma bana är en cirkel. Men i allmänhet är banorna ellipser som i b. Massorna är lika, även här, så tyngdpunkten ligger i mitten, men nu följer stjärnorna olika, men lika stora ellipser. Som närmast kommer de varandra i läge 1, där de är samtidigt, i periastron; jämför punkten där jorden är som närmast solen, perihelium. Sedan, efter en halv period medurs, kommer de till apastron i läge 2. Där rör de sig långsammast eftersom kraften mellan dem då är som minst.

Genom att mäta banor och perioder för dubbelstjärnor är det möjligt att bestämma deras massor med hjälp av gravitationslagen. Metoden kompliceras av att fördelningen av massa mellan de båda komponenterna är svår att beräkna, men är viktig eftersom det inte finns något annat sätt att direkt få fram stjärnmassor.

Solen påverkas av planeterna på samma sätt, allra mest av jätten Jupiter, vars massa är ca 1050 gånger mindre än solens. Det gör att solens centrum går runt i

en bana som har 1050 gånger mindre radie än avståndet till Jupiter. En uträkning visar att det är 740 000 kilometer, i det närmaste samma som solradien, så solen går runt sig själv i en bana med centrum nära solytan p.g.a. Jupiters inverkan. Också de övriga planeterna påverkar, men mycket mindre.

Från en annan stjärna vore det därför möjligt att se solen wobbla fram och tillbaka under ett Jupiterår, vilket skulle få en astronom därute att misstänka att stjärnan i sikte har åtminstone en planet. Det är en av metoderna att hitta extra-terresta planeter, men hittills huvudsakligen med jätteplaneter som resultat.



Figur 6. I solsystemet. a) Solen och Jupiter, b) Jorden och månen. Avstånden är starkt underdrivna. Kryssen markerar tyngdpunkterna.

Medelavståndet mellan jorden och månen är 384 000 kilometer och månen har 81 gånger mindre massa än jorden. Av det kan man räkna ut att månens gravitation får jordens centrum att gå runt i en bana med radien 4700 kilometer. Det är mindre än jordradien, så centrum för den rörelsen ligger inne i jorden, som figur 6b visar.

Rörelsen är för liten och långsam för att vi ska kunna märka den, utan det vi direkt märker av månens gravitation är tidvattnet. Om månen varit mycket mer avlägsen än vad den är hade dess gravitation varit praktiskt taget lika stark överallt på jorden, men den ligger bara sextio jordradier bort. Det gör att månen utövar lite större dragningskraft på den sida av jorden som är närmast, jämfört med medelvärdet, och lite mindre på motsatta sidan. Detta gör att vattenytan buktar ut och orsakar tidvattnet.

Det är troligt att Saturnus ringsystem också är en tidvatteneffekt. En måne nära den stora planeten skulle drabbas av så stora skillnader i dragningskraft på motsatta sidor att den inte kan hålla ihop, utan slits sönder. Alternativt blev den aktuella månen aldrig till eftersom de smådelar som den skulle bildas av inte kunde gå samman över en viss storlek. Vår måne känner också av sådana krafter, men avståndet till jorden är för stort och vår planet har för lite massa för att något dramatiskt ska kunna hända.

1.3 Gravitationen i nytt ljus

En av fyra krafter

Under senare delen av nittonhundratalet visade det sig att alla krafter i naturen kunde delas in i fyra sorter, bland dem gravitationen. De är, efter tilltagande styrka:

<u>Kraft</u>	<u>Relativ styrka</u>	<u>Räckvidd</u>
Gravitationen	1	Hela universum
Den svaga kraften	10^{33}	Atomerna
Elektromagnetism	10^{36}	Hela universum
Den starka kraften	10^{38}	Atomkärnor

Den svaga kraften är den som står för radioaktiva sönderfall och den starka håller samman atomkärnorna. Deras räckvidd begränsar sig till atomerna och till kärnorna. De elektromagnetiska krafterna, som t.ex. får motorer att fungera, räcker över hela universum och är, som sammanställningen visar, 10^{36} gånger starkare än gravitationskrafterna. Det är ju ett oerhört stort tal – en etta med tretiosex nollor – så man undrar varför det inte är de som styr i universum i stort. Svaret är att det finns precis lika mycket positiv som negativ laddning och att de tar ut varandra, men bara en sorts gravitation. I science fictionsammanhang händer det visserligen att negativ gravitation kopplas på för tyngdlöshet, men hittills bara i den branschen.

Gravitationen står alltså i särklass, men också på ett annat sätt: De tre andra krafterna har man lyckats förena i teoretiskt nätverk (med Nobelpris som följd), men inte gravitationen. Det antas att alla fyra var en enda, fundamental kraft alldeles i början av Ursmällen i den enorma hettan, men att de sedan separerades och nu verkar på olika sätt. De bör alltså kunna få plats i samma teori, men gravitationen gäcker alla försök i den riktningen.

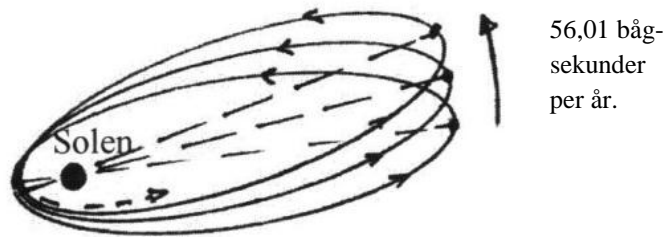
De tre förenade krafterna verkar alla med partiklar som förmedlare, t.ex. ljuspartiklar, fotoner, och inne i atomkärnorna s.k. gluoner ”klistertpartiklar”. Så man antar att gravitationen förmedlas av ett annat slags partiklar, gravitoner. Men några sådana har man ännu inte sett till, troligen just som följd av gravitationens överväldigande svaghet.

Problem

Trots att Newtons teori mycket snart visade sin styrka hördes tidigt kritiska röster. Ett problem var hur kroppar kan påverka varandra på avstånd utan något som förmedlar kraftverkan; tanken att partiklar skulle kunna vara inblandade

fanns ännu inte. Man frågade sig också med vilken fart gravitationsverkan breder ut sig kring en kropp, gick det måhända oändligt fort?

Figur 7 Mercurius bana. Tillplattningen, excentriciteten, är starkt överdriven.



Ett mer handfast och besvärande problem kom sig av den innersta planetens, Mercurius bana. Dess storaxel vrider sig sakta i rymden så att planetbanan blir som en rosett. Att det beror på störningar från de andra planeterna stod klart. De kunde beräknas med gravitationslagen till 55,58 bågsekunder per år, men med ökande mätnoggrannhet stod det klart att detta inte stämmer med det verkliga värdet, som är 56,01 bågsekunder per år. En bågsekund är en liten vinkel, $1/3600$ grad, men skillnaden, 0,43 bågsekunder per år, var ändå ett mysterium.

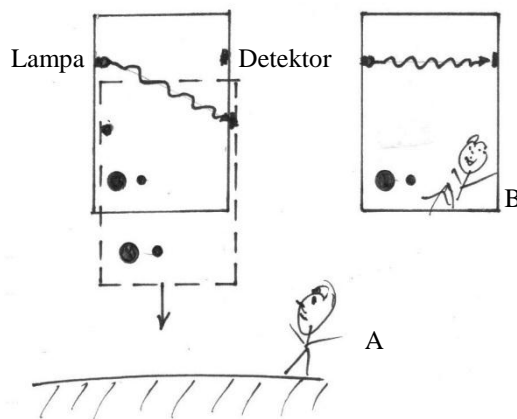
Samtidigt med ansträngningarna att komma till rätta med detta blev eter teorin alltmer bekymmersam. Det antogs att ljuset behövde något att röra sig i, liksom ljudet, som beror på svängande rörelser hos luftmolekylerna (eller annat ämne). Det var etern, som fyller upp hela universum, men inte gör motstånd mot rörelse och inte heller låter sig förnimmas på andra sätt. Något sådant kunde det vara som förmedlade gravitationen, så för att inte uppfinna en eter till antogs att det var samma som för ljuset.

Men sedan blev det bara besvärligare. Eftersom etern skulle ta hand om hela solsystemets gravitation hade den att bära upp alla planeternas massor, en egenartad egenskap hos ett oändligt tunt, omärkbart ämne. Ett mer filosofiskt spørsmål var om det rimliga i att anta att något finns, som inte låter sig mätas eller kontrolleras på annat sätt? Då kan det ju varken bevisas eller motbevisas, krav som är grundläggande för all sund vetenskap. Sådana teorier anses höra till metafysiken, ”på andra sidan fysiken” och kan på sin höjd vara intressanta eller roliga, men inte mer. Som roande exempel anförde filosofen Bertrand Russell påståendet att en tekanna befinner sig i omloppsbana kring solen mellan Neptunus och Pluto, något som förvisso inte så lätt låter sig motbevisas.

Einsteins idé

I den speciella relativitetsteorin, som Einstein publicerade 1905, förkastade han eter teorin, begreppen rum och tid fick ny betydelse och ljusets hastighet i vacuum, 300 000 km/s, visade sig vara en övre gräns för materia och energi att flytta sig. Dessutom suddades gränsen mellan materia och energi ut genom att de visade sig kunna övergå i varandra (enligt den berömda formeln $E = mc^2$)

Ljus och all annan elektromagnetisk strålning har ju energi, och om den kan uppträda som materia bör den böjas av i gravitationsfält, t.ex. kring himlakroppar. Det var också ett av resultaten av den allmänna relativitetsteorin, som Einstein efter mycket möda blev färdig med 1916. Han var då på Kaiser Wilhelm-institutet för Physik i Berlin, där man trots kriget kunde arbeta någorlunda ostört. (Det var för övrigt ett krig som både Einstein och Russell till allmän förargelse protesterade mot.)



Figur 8 Einsteins hiss.

Som en av sina bästa idéer betraktade Einstein tanken på en fritt fallande hiss med en observatör i, "Einstein hiss". Den kom upp på grund av ett annat problem, nämligen det, varför alla kroppar faller lika fort i ett gravitationsfält, förutsatt att inget luftmotstånd finns. Att det är så det ligger till stöd klart sedan Galileis tid och fick en teoretisk förklaring i Newtons mekanik. Men det är inte självklart, utan verkar på sätt och vis vara en mycket märklig tillfällighet, för varför måste t.ex. ett kilo bly falla lika fort som ett kilo guld? Frågeställningen har gjort att saken testats noga – alltså inte genom att bly och guld släppts från tornet i Pisa – med resultatet att det stämmer inom felgränser som är mindre än en miljarddel procent.

Einsteins hiss faller fritt i ett gravitationsfält, t.ex. jordens, där observatören A lätt bekymrad åser förloppet. Inne i hissen, utan kontakt med yttvärlden, sitter en annan observatör, B. Hon är viktlös, precis som folk på rymdstationer, men i övrigt är allt som vanligt. Klockan fungerar som den ska, en elektrisk motor går som man väntar sig och tandborstningen kräver samma kraft som på jorden, låt

vara att tandkrämen är svårhanterlig i munnen på grund av viktlösheten. Kort sagt, de fysikaliska lagarna gäller som på jorden. Att de mekaniska gör det stod klart på den tiden, men Einstein hävdade att de andra, elektriska, optiska etc. också gjorde det.

I hissen svävar två kroppar alldeles stilla på samma höjd över golvet. Eftersom de är viktlösa och inte påverkas av några inre krafter heller förblir de i stillhet där de är, allt enligt fysikens lagar. A ser hissen först i det övre läget, noterar att föremålen är på samma höjd, och sedan i det undre sedan hissen fallit en bit. Då måste de vara kvar på samma höjd över golvet, också för A, *som alltså ser dem falla lika fort!*

Med detta tankeexperiment och den avgörande förutsättningen att samma naturlagar, åtminstone de mekaniska, gäller i hissen som utanför kunde Einstein motivera att alla kroppar faller lika snabbt i gravitationsfält; att det inte spelar någon roll vilka massor de har eller vad de består av är klart. Man skulle kunna säga att han på så vis trollade bort gravitationsfältet från frågeställningen om hur snabbt föremålen faller. Principen om de fysikaliska lagarnas likvärdighet på båda ställena är *ekvivalensprincipen*.

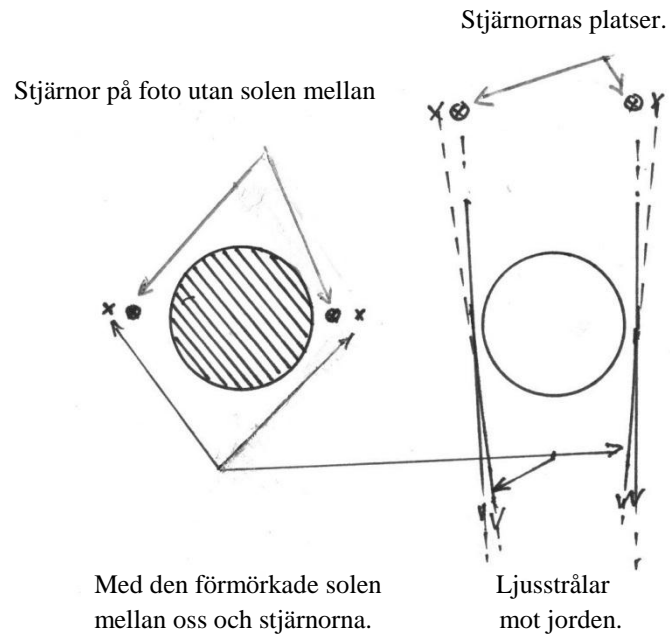
Det är viktigt att förstå att de båda föremålen inte stannar kvar på sina platser i hissen eftersom de skulle falla lika fort. Från hissinnevånarens synpunkt behöver det inte finnas något gravitationsfält alls, utan hissen skulle lika gärna kunna hålla till ute i rymden, långt från alla andra objekt. Ja, hissen kunde till och med vara det enda som finns i universum, ett universum i sig – där alltså de välkända fysiklagarna gäller.

Det här kan eventuellt verka oskyldigt nog, men nu skickar B ut en kort, horisontell ljussignal från en lampa på en av hissens väggar. På samma höjd över golvet, mitt emot, sitter en ljusdetektor som tar emot signalen ett ögonblick senare eftersom ljuset ju går i rät linje enligt optikens lagar. A, som observerar det hela, ser också ljusstrålen träffa detektorn, men vid det laget har hissen hunnit falla ett stycke, varför han konstaterar att ljuset böjts av nedåt mot jorden. *Ljus böjs av i gravitationsfält*, just som vi misstänkt! B känner ju inte av något sådant, varför hennes ljusstråle går rakt fram.

Tankeexperiment var en specialitet för Einstein så att de inte sällan, också i engelskspråkig litteratur, kallas ”Gedankenexperimente” på hans modersmål. Einstein använde gärna sin tids moderna fortskaffningsmedel, tåg, som exempel, något som gett upphov till anekdoten om en medpassagerare som frågade, troligen med tanke på relativitetsteorin: Vet professorn om Leipzig stannar vid det här tåget?

Tanken på ljusets avböjning var revolutionerande och svårsmält, vilket fick den Nyzeeländske fysikern och Nobelpristagaren Ernest Rutherford att utbrista: ”Here in Britain, we don’t believe in such things.” Men alldeles efter kriget, 1919, kunde saken provas vid en total solförmörkelse.

Figur 9 Eddingtons mätning 1919. T.v. den förmörkade solen med en stjärna på var sida. Kryssen markerar deras platser intill stjärnan under förmörkelsen. De fyllda cirkelarna är deras platser ca ett halvt år senare, när stjärnorna kunde fotograferas på natten eftersom solen då var på andra sidan himlen.



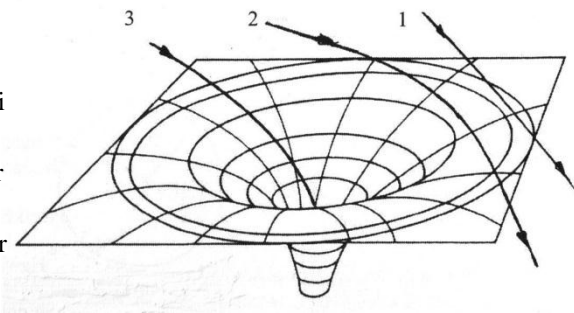
Under förmörkelsen togs foton av området kring solen, där stjärnorna syntes kring den mörka solskivan. Figur 9 visar skissartat två av stjärnorna. Ca ett halvt år senare fotograferades stjärnorna igen, men nu utan solen i närheten. Efter noggrann mätning av stjärnornas lägen på de fotografiska plåtarna fann man att de hade ändrats en aning. Inte mycket, men det stod klart att solen hade böjt av strålarna knappt två bågsekunder, i rätt bra överensstämmelse till vad Einstein hade beräknat. Det hela blev en världsnöhet och en av de första bekräftelserna av den allmänna relativitetsteorin.

Den allra första stod fysikern själv för, då han kunde beräkna Merkuriusbanans årliga vridning. Einstein har berättat om sin uppjagade sinnesstämning under räknandet, som gav ett resultat mycket nära det uppmätta, varmed det sekelgamla problemet var löst.

Figur 8 visar också en annan intressant sak. Ljusstrålen har längre väg att gå enligt A än för B, vilket visar att de uppfattar sträckor olika. En närmare analys visar att de också har olika uppfattningar om tiden. I vår vardag är skillnaderna så små att de inte märks och i själva verket kräver mycket noggranna mätningar för att märkas alls. Newtons mekanik fungerar alltså bra, men ett undantag är GPS-systemet. För dess precisa positionsbestämningar är det nödvändigt att hänsyn tas till att tiden går en liten aning långsammare på jordytan än där GPS-satelliterna håller hus.

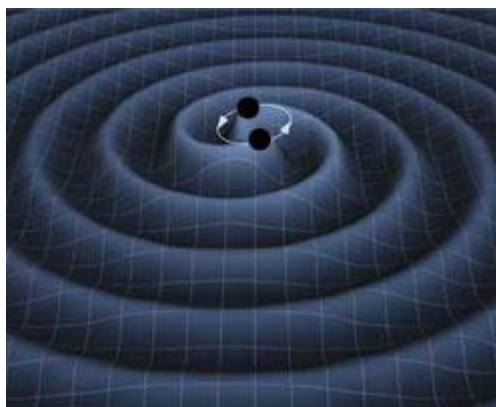
En grundläggande förutsättning både i den speciella och i den allmänna relativitetsteorin är att ljuset i vacuum alltid och för alla går fram med samma fart, mycket nära 300 000 km/s. Det rör sig också i rät linje, något som inte precis verkar vara fallet för den jordiske observatören A i figur 8. Här är Einsteins tolkning att ljuset går rakt fram, men i en *krökt rymd*. Det som påverkar rymden på det sättet är materien. Gravitationen är alltså inte en avståndsverkan utan förmedlande medium, utan det mediet är själva rymden som påverkar materien omkring, liksom den i sin tur påverkar rymden. Rymden och tiden är inte som för Newton något för evig fast och oberoende tickande, utan en del av de fysiska tingens och lyder fysikaliska lagar i ömsesidig samverkan med materien och energin.

Figur 10 Illustration av krökt rymd. (Ur Berry: Principles of cosmology and gravitation.) Man kan tänka sig rymden i två dimensioner som en gummiduk. När en massa läggs på böjs duken nedåt, mer ju större massan är. Banorna för passerande föremål eller ljusstrålar böjs därför av mer närmare massan. Det i bana 3 kommer troligen att kollidera med den.



Gravitationsvågor

Om massan i figur 10 rör sig återverkar det på gummiduken, och skulle den t.ex. svänga fram och tillbaka kommer svängningar att gå ut längs duken som krusningar. Motsvarande i rymden kring en massa är variationer i krökningen, som fortplantar sig utåt med ljushastighet. Ändringarna påverkar också tiden, så att man säger att den rörliga massan gör krusningar i rumtiden, *gravitationsvågor*.



Figur 11. Överst gravitationsvågor kring två massor i bana kring varandra. Till höger Joseph Weber vid sin aluminiumcylinder.

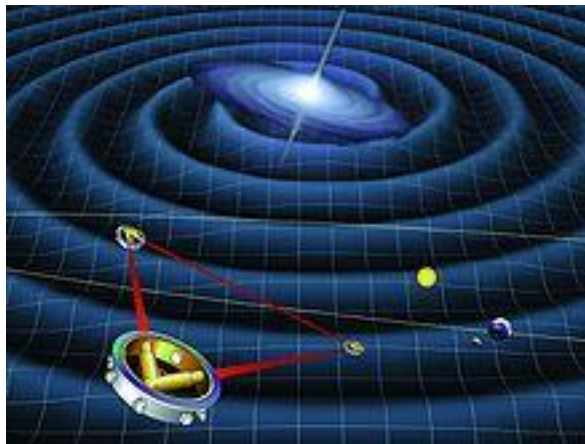
När gravitationsvågor passerar ett område i rymden kommer föremål där att deformeras i takt med vågorna, något som skulle ge möjlighet att detektera dem. De första försöken gjordes på 1970-talet av Joseph Weber. När vågor passerade hans kubikmeterstora cylinder av aluminium skulle den komma i skakningar som känselkroppar på ytan känner av och ger signal om. Han kunde rapportera ett och annat misstänkt fall, men de berodde troligen på störningar. Apparaturen var inte känslig nog att urskilja de väntade deformationerna, som antogs vara av atomkärnestorlek.

Figur 12 Den japanska, underjordiska anläggningen KAGRA.



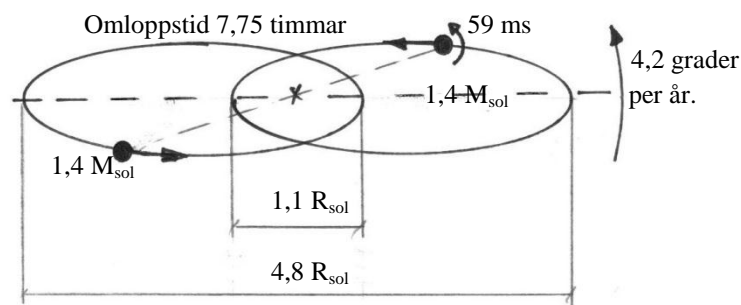
För direkt detektering av gravitationsvågor används nu i stället en annan metod, som figur 12 ger uppvisar senaste exemplet på. I centrum finns en stark laser, som skickar strålar i två vinkelräta riktningar. Tre kilometer bort reflekteras de och jämförs vid återkomsten. Om gravitationsvågor kommer in med lämplig våglängd kan de påverka rumtiden olika i de båda trekilometers armarna, vilket ger utslag när de återkommande strålarna jämförs. Metoden kallas interferometri, en i många sammanhang noggrann och väl beprövad teknik. En äldre anläggning finns i USA, LIGO, Laser Interferometry Gravitational Wave Observatory.

Figur 13 LISA, Laser Interferometry Space Antenna Observatory.



Inga positiva resultat har hittills rapporterats från LIGO eller KAGRA. En än mer ambitiös satsning, LISA, har lovat bättre möjligheter. Den består av tre satelliter i bana kring solen, 5 miljoner kilometer från varandra. Lasersignaler skickas mellan satelliterna och jämförs på liknande sätt som i de förstnämnda, men de mycket större sträckorna ökar känsligheten. Med LIGO ska gravitationsvågor från tio- till hundratals kolliderande svarta hål kunna upptäckas mycket långt ut i universum, likaså de från tiotusentals dubbelstjärnor i Vintergatan och från stjärnor som sväljs av svarta hål. Det är ett samarbetsprojekt mellan NASA och ESA, men tyvärr har NASA ansett sig nödgat av dra sig ur av ekonomiska skäl.

Så en direkt bekräftelse av gravitationsvågornas existens kan låta vänta på sig ett tag till. 1974 gjordes emellertid en upptäckt som blev till en sensationellt noggrann, indirekt bekräftelse av teorin för gravitationsvågor och gav upptäckarna, Hulse och Taylor, 1993 års Nobelpris i fysik.



Figur 14 Hulse och Taylors dubbelpulsar PSR B19B+16. De båda neutronstjärnorna har samma radie, ca 10 kilometer, och massa, 1,4 solmassor, $1,4 M_{\text{sol}}$.

Med hjälp av trehundra meters radioteleskopet i Arecibo, Peru, upptäckte de en pulsar i stjärnbilden Örnén, på 21 000 ljusårs avstånd. Radiopulserna därifrån kom med 59 millisekunders intervall, varför den antogs rotera ett varv på 59 ms, d.v.s. med 17 varv/sekund. Sådana pulsarer är neutronstjärnor och det som återstår på platsen efter supernovautbrott. De är små och kompakta och brukar rotera snabbt. Radiostrålningen skickas ut som ljuset från en fyr, så bara om rotationsaxeln är riktad åt rätt håll sveper strålningen över jorden.

Den här pulsaren hade också en fram- och återgående rörelse, som visade att den har sällskap av en annan stjärna med vilken den bildar ett dubbelstjärnsystem där de båda komponenterna rör sig i ellipsbanor kring varandra. Här visade sig också den andra vara en neutronstjärna, så innan supernovautbrotten har de utgjort ett system av två heta, massrika stjärnor. Det är inte särskilt förvånande eftersom dubbelstjärnor är vanliga.

Avståndet mellan sådana kan vara rätt stort, men de här båda går i mycket täta banor, som figur 14 visar. Som närmast, i periastron, är de 1,1 solradie från varandra och som fjärmast 4,8 solradie. De går ett varv kring varandra på 7,75 timmar, vilket betyder en medelfart på omkring 1500 kilometer per sekund. Det är bl.a. den sortens täta, massrika objekt i häftig rörelse vars gravitationsstrålning kan väntas vara möjlig att upptäcka.

Gravitationsstrålningen tar med sig energi från dubbelpulsaren, som därför avger en effekt som Hulse och Taylor kunde beräkna till knappt två procent av vad solen avger som ljus och annan strålning (dess luminositet). En så svag stjärna skulle vara omöjlig att se på 21 000 ljusår ens med de största teleskopen och inte heller är den gravitationsstrålningen möjlig att detektera här. Men på grund av dubbelpulsarens energiförlust kommer de båda komponenterna närmare varandra med 3,5 meter per år och samtidigt börjar de rotera snabbare så att tiden för ett omlopp minskar från nuvarande 7,75 timmar.

Bankrympningen går inte att mäta, men tider kan mätas förvånande noga och här visade mätningarna att omloppstiden minskade med 76,5 mikrosekunder per år. Det stämde i det närmaste perfekt med vad astronomerna hade räknat ut och gav ännu en bekräftelse av den allmänna relativitetsteorin och funderingarna kring hissar, stadda i fritt fall.

På försättsbladet: Aristoteles enligt Rafael i Sixtinska kapellet, Newton och Einstein.

Därunder jorden i solens gravitationsfält.