

Relativitetsteorien

Fundamentale begreber som tid, rum, samtidighed, masse, tyngdekraft og energi involverer alle relativitetsteorien. Teoriens mange konsekvenser har været afprøvet i stor detalje, uden at teorien endnu har vist svaghedstegn.

Af Ulrik I. Uggerhøj

■ Albert Einsteins (1879-1955) relativitetsteori har betydet en grundlæggende ændring i synet på nogle af de mest fundamentale begreber som tid, rum, samtidighed, masse, tyngdekraft og energi. Det er således resultater fra relativitetsteorien, at tidens gang ændres under bevægelse, at længder og samtidighed afhænger af hastigheden af observatøren, at energi er en form for masse og omvendt, samt at tyngdekraften kan opfattes som et geometrisk fænomen.

Den specielle og den generelle

I daglig tale taler man om relativitetsteorien, men der er i virkeligheden tale om to dele, udviklet hver for sig af Einstein i hhv. 1905 og derefter i perioden frem til 1915. Den første del, den *specielle* relativitetsteori, omhandler fænomener der optræder ved hastigheder, der er sammenlignelige med lysets.

Den anden del, den *generelle* relativitetsteori, omhandler fænomener i tyngdefelter, der f.eks. omgiver kompakte astronomiske objekter. Den specielle relativitetsteori er matematisk set (men ikke erkendelsesmæssigt) relativt simpel, mens den generelle teori derimod er ret



Einstein i 1905, da han arbejder på patentkontoret i Bern, og samtidig publicerede banebrydende artikler.

krævende matematisk. De to dele er bundet sammen af den bærende tanke, kaldet relativitetsprincippet, at naturens love må formuleres ens i forskellige koordinatsystemer – dvs. i referencerammer med forskel-

lige bevægelser eller tyngdepåvirkninger. De basale naturlove skrives med andre ord på samme måde hvad enten man er i bevægelse eller hvile, i et tyngdefelt eller ej. Det såkaldte ækvivalensprincip sammen-

holder desuden i den generelle relativitetsteori et accelereret referencesystem med et fastholdt referencesystem i et tyngdefelt. Dette princip var Einsteins "lykkeligste tanke" at hvis man falder frit kan man ikke mærke tyngdekraften – et fænomen der i dag er velkendt blandt astronauter.

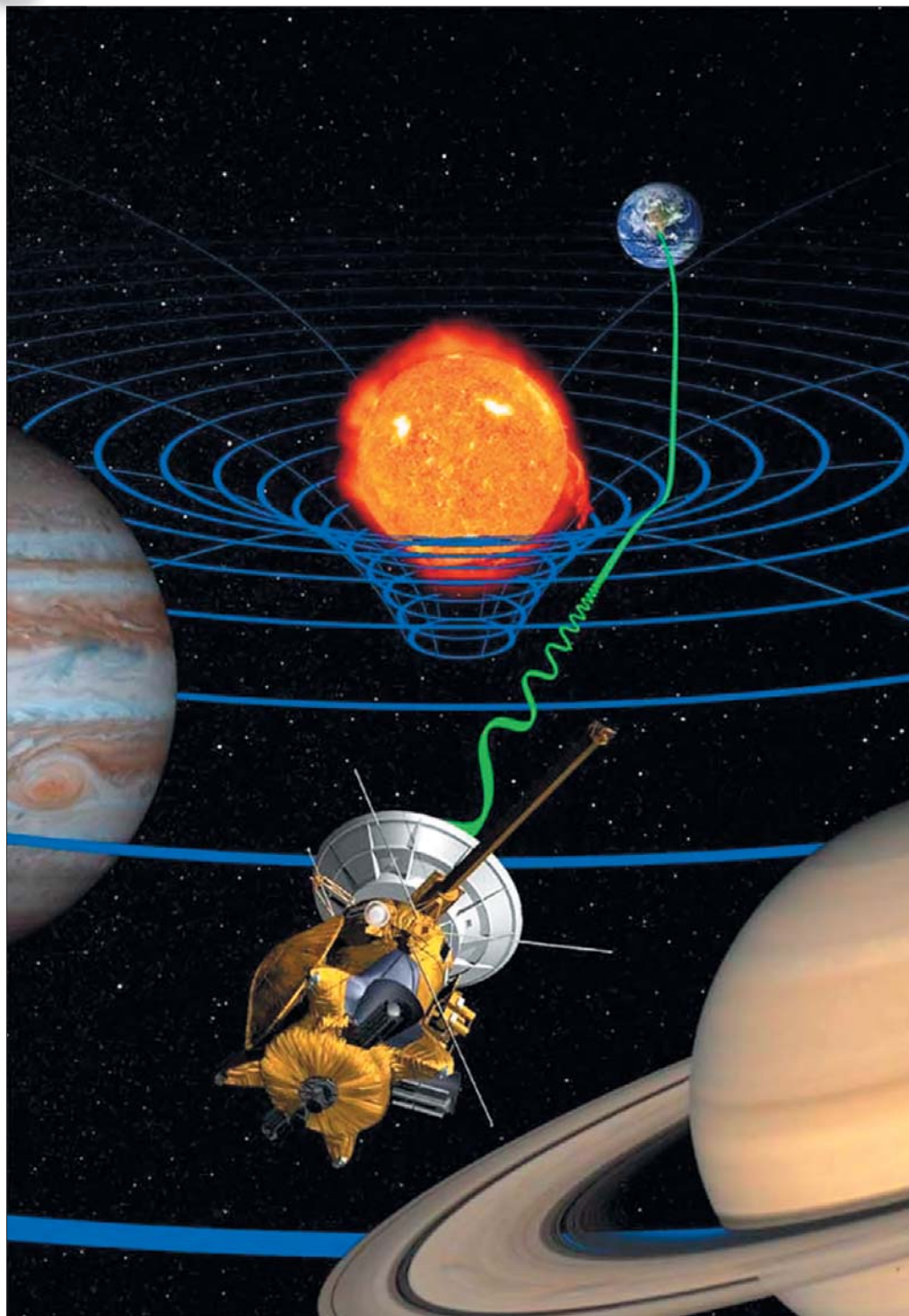
Et af grundlagene for den specielle relativitetsteori er, at lysets hastighed er endelig (dvs. ikke uendelig) og konstant. Denne erkendelse har betydet en skærpelse af opfattelsen af sammenhænge mellem årsag og virkning. Sådanne sammenhænge er helt centrale i naturvidenskaben, idet videnskabens fundament netop er en systematisk undersøgelse af årsag-virkningssammenhænge i erfaringer, opnået f.eks. ved kontrollerede eksperimenter eller ved astronomiske observationer. Da intet kan bevæge sig hurtigere end lyset, kan en årsag ét sted ikke øjeblikkeligt medføre en virkning et andet sted.

Den danske astronom Ole Rømer (1644-1710) var i øvrigt den første til at påvise, at lysets hastighed ikke er uendelig, baseret på observationer af Jupiters måne Io i årene frem til 1676.

Relativitetsteorien som redskab

Som et redskab har relativitetsteorien været afgørende for andre teoriers tilblivelse – f.eks. teorien om Universets udvikling, kosmologien (se boks), eller teorier om eksistensen af sorte huller og neutronstjerner. Sorte huller, hvis eksistens først i løbet af det seneste årti er blevet bekræftet, er objekter, der er så tunge og kompakte, at end ikke lys kan undslippe deres tyngdekraft – det er altså umuligt at få information direkte fra dem. Neutronstjerner, derimod, har været kendt i snart 40 år og kan betragtes som en enorm udgave af en atomkerne.

Ligeledes er teorier om elementarpartiklernes indbyrdes relationer og vekselvirkninger, de såkaldte kvantefeltteorier, kort sagt en blanding af den specielle relativitetsteori og kvantemekanik. Sådanne teorier er essentielle i nutidens opfattelse af bestemte typer radioaktive henfald, og til forståelsen af mangeartede observationer ved moderne partikelacceleratorer, og faktisk kan moderne partikelacceleratorer kun konstrueres under hensyntagen til den specielle relativitetsteori. Ligeledes kan bevæ-



Grafik: NASA, Jet Propulsion Laboratory, <http://saturn.jpl.nasa.gov>

Målinger foretaget med Cassini-rumskibet viser at den tidsforsinkelse som lyset pga. afbøjning i Solens tyngdefelt er udsat for undervejs fra Jorden til Saturn, passer utrolig godt med den generelle relativitetsteoris forudsigelse.

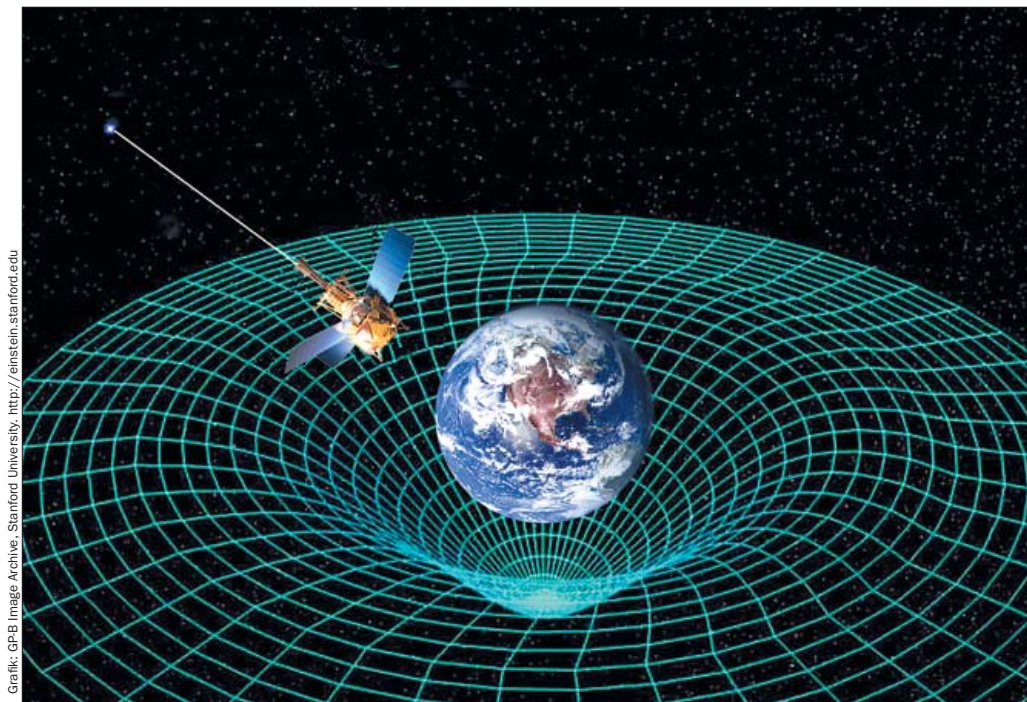
gelsen af Solsystemets inderste planet, Merkur, kun beskrives præcist ved anvendelse af den generelle relativitetsteori, og den fine overensstemmelse mellem teori og observationer spillede en afgørende rolle for Einstein.

Moderne målinger foretaget med Cassini-rumskibet viser, at

den tidsforsinkelse, som lyset pga. afbøjning i Solens tyngdefelt er udsat for undervejs fra Jorden til Saturn, passer med den generelle relativitetsteoris forudsigelse inden for en mulig afvigelse på bare 0,002 procent. Det er den krumme geometri forårsaget af Solen, der indvirker på Jorden, således at

den forbliver i banen omkring Solen, og det er selvsamme krumning, der forsinker lyset under passagen nær Solens overflade.

Som mere dagligdags relevante fænomener af relevans for relativitetsteorien kan nævnes vores forståelse af Solens lys, det basale princip i kernekraft og



Gravik: GP-B Image Archive, Stanford University. <http://einstein.stanford.edu>

Figuren viser rumsonden Gravity Probe B (opsendt 2004), som er designet til at måle rumtidens krumning forårsaget af Jorden og det fænomen, at Jordens rotation "trækker rumtiden med sig". Begge dele er forudsagt af Einsteins relativitetsteori, men er endnu ikke påvist.

Relativitetsteori i kosmologi

Det er fascinerende i sig selv, at der eksisterer en disciplin, der beskæftiger sig med "alt". Det er egentlig hvad den fysiske kosmologi er – læren om Universet som et hele, specielt dets tidlige udvikling og nuværende struktur over store afstande. Nogle af de helt basale elementer i den moderne kosmologi er de såkaldte Einstein-ligninger fra den generelle relativitetsteori, der i kort form beskriver sammenhængen mellem rummets krumning og stof (masse eller energi).

Stoffet fortæller rummet, hvordan det skal krumme, og rummets krumning fortæller stoffet, hvordan det skal bevæge sig. Allerede i den sproglige fortolkning af ligningerne fremgår det, at der er tale om en kompliceret sammenhæng. For en givet fordeling af stof antager rummet en bestemt krumning. Denne krumning giver anledning til at stoffet bevæger sig på en bestemt måde, hvorefter rummets krumning vil antage en ny form, der giver anledning til en ny bevægelse og så videre. Det viser sig dog, at under antagelsen »at Universet over tilstrækkeligt store afstande er homogent og isotropt, dvs. ens i alle retninger,« kan ligningerne løses, hvorved man finder, at Universet næsten nødvendigvis må udvide sig eller trække sig sammen.

At Universet udvider sig er i dag observationelt velfunderet og har været det siden den amerikanske astronom Edwin Hubble (1889-1953) i 1929 formulerede sin empiriske lov om »fjernere objekters hurtigere fjernelse«, men var det ikke da Einstein fandt sine ligninger. Det fik Einstein til at indføre et ekstra led i ligningerne, den såkaldte *kosmologiske konstant*, for at vise, at Universet måtte være statisk, i overensstemmelse med hans overbevisning. Han betegnede senere dette som sin største fejltagelse. Men i løbet af det seneste årti har det vist sig, at der måske alligevel er noget om snakken.

Fra Einsteins relativistiske ligninger kan man endvidere konkludere, at da Universet i dag udvider sig, må det til et bestemt tidspunkt i fortiden have haft en udstrækning på nul – det tidspunkt og den tilstand, vi normalt betegner *Big Bang*.

udviklingen af GPS-navigation, i alle tilfælde videnskabeligt forankret i relativitetsteorien.

Teorier om alting

Der findes også mere spekulative teorier, som f.eks. superstrengteoriene, der ligeledes er baseret på relativitetsteorien. Og så indgår relativitetsteorien selvfølgelig også i bestræbelserne på at udvikle en "teori om alt". Det er dog endnu ikke lykkedes at udvikle en fuldstændig og entydig teori, der indeholder både kvantemekanik og den generelle relativitetsteori.

Det er muligt, at sådanne fremtidige teorier vil afløse relativitetsteorien. Disse teorier vil dog formentlig ikke tilbagegive relativitetsteorien, men snarere udvide dens gyldighedsområde til at indeholde en beskrivelse af fænomener, der på nuværende tidspunkt ikke kan beskrives.

Relativitetsteorien er afprøvet i snart hundrede år uden at vise fejl eller mangler, og det virker meget usandsynligt, at den vil forsvinde ud i historiens glemsel, om end den kan vise sig at være et grænsetilfælde af en mere omfattende teori. ■

Om forfatteren:



Ulrik I Uggerhøj er lektor og underviser i relativitetsteoriens eksperimenter på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Tlf.: 89 42 37 38

E-mail: ulrik@phys.au.dk

www.phys.au.dk/~ulrik/formidling

Videre læsning

Ulrik Uggerhøj: *Tid - Den relative virkelighed*. Aarhus Universitetsforlag 2005.

Tor Nørretranders: *Einstein, Einstein*. Politikens forlag 2005.

3 artikler i *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2 - 2005: *Relativistiske eksperimenter; Relativitetsteorien samt Albert Einstein - Naturfilosof og Menneske*.

Aktuel Naturvidenskab nr. 2 - 2004: *Den relativistiske tommestok*.

(GPS) P. Enge, *Scientific American*, May 2004, s. 65