

Relativistiske eksperimenter

Hver eneste dag udfører fysikere eksperimenter, der kun kan forklares ved hjælp af Einsteins relativitetsteori. Teorien er gennem snart hundrede år blevet testet i stor detalje, indtil videre uden at udvise mangler eller fejl.

Af Ulrik I. Uggerhøj

I de hundrede år, der er gået siden Einstein publicerede den første del af sin relativitetsteori, har forskere verden over forsøgt enten at modbevise teorien eller postulere små korrektioner til teorien, som kan eftervises med eksperimenter. Det er endnu ikke lykkedes at finde mangler. Teoriens mange konsekvenser har været afprøvet i stor detalje, uden relativitetsteorien endnu har vist svaghedstegn.

Nogle af de eksperimenter, der gennem tiden er blevet gjort for at bekræfte relativitetsteorien har selvsagt været meget spidsfindige. Men også med simpelt udstyr kan man måle fænomener, der kun kan forklares ved hjælp af Einsteins relativitetsteori.

For at tage et helt grundlæggende eksempel, kan noget så hverdagsagtigt som at Solen skinner forklares ud fra Einsteins berømte formel $E=mc^2$. Solen taber nemlig mere end fire millioner tons per sekund ved at omdanne masse til energi. Selv når du tager solbad spiller relativitetsteorien altså med!

Myonens levetid

Nu kan en solbrændt krop næppe tjene som et eksperimen-

Tid og rum er relative

A

B

C

En myon er en tung udgave af en elektron, der dannes ca. 10 km oppe i Jordens atmosfære. Myoner er så energirige, at de bevæger sig nær lysets hastighed. Deres levetid i hvile er kun 2,2 milliontedele af et sekund, og hvis denne levetid var identisk med deres levetid i bevægelse, ville myonen kun nå ca. 1 km. fra det sted, de blev dannet (som vist i A).

En konsekvens af Einsteins relativitetsteori er imidlertid, at et ur i bevægelse går langsomt i forhold til et ur i hvile. Myonen bevæger sig så hurtigt i forhold til os, at dens "indre ur" går langsomt, og derfor kan myonen godt nå ned til os ved jordoverfladen på trods af dens korte levetid, som vist på B.

Den sidste figur C viser det tankeeksperiment, at observatøren rider på ryggen af myonen. Set for observatøren forkortes rummet nu, så myonen stadig kan nå ned til jordoverfladen inden for dens levetid på 2,2 milliontedele af et sekund.

telt bevis for relativitetsteorien, og jeg vil derfor nævne et mere overbevisende eksempel.

Mange har sikkert oplevet, at fysiklæreren har brugt en almindelig Geiger-tæller i undervisningen til at måle baggrunds-

strålingen. Omkring 25% af de klik, Geiger-tælleren giver fra sig, stammer fra kosmisk stråling – hovedsageligt fra partikler kaldet myoner, der løber gennem tælleren.

En myon er en tung udgave

af en elektron: den vejer ca. 130 gange mere og er derfor radioaktivt ustabil – dvs. den henfalder til en elektron (og nogle flere, i denne forbindelse irrelevante, partikler kaldet neutrinoer). Myonens levetid i hvile er

ultrakort, kun 2,2 milliontedele af et sekund.

Det interessante er i denne forbindelse, at relativitetsteorien er nødvendig for at forklare disse klik fra myoner i geigertælleren. Myoner bliver dannet højt oppe i Jordens atmosfære, omkring 10 kilometer fra jordoverfladen. De bliver dannet med så høj energi, at de bevæger sig med en fart meget nær lysets. Hvis deres levetid i bevægelse var identisk med deres levetid i hvile ville de nå knapt en kilometer fra det sted, de blev dannet, idet lys bevæger sig godt 660 m på 2,2 milliontedele af et sekund. De ville altså aldrig nå frem til en tæller eller et menneske placeret ved jordoverfladen.

Når det alligevel kan lade sig gøre at måle myoner ved jordoverfladen, skyldes det, at objekter, der bevæger sig med en fart nær lysets, bliver relativistiske. Hermed menes, at deres bevægelsesenergi bliver sammenlignelig med – eller større end – den energi, de besidder i form af masse ud fra Einsteins berømte $E=mc^2$.

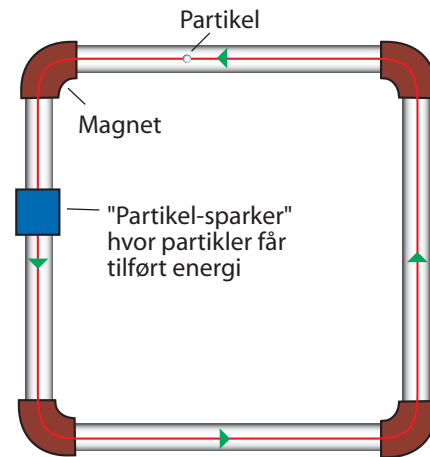
En konsekvens af Einsteins relativitetsteori er, at et ur i bevægelse går langsomt set i forhold til en observatør i hvile. Myonen bevæger sig så hurtigt i forhold til os, at dens levetid forlænges ganske betydeligt, fordi dens "indre ur" går langsomt. Og det er dette "indre ur", der bestemmer hvornår partiklen henfalder. Myonen kan altså kun sige klik i vores tæller, hvis det er rigtigt, at et ur i bevægelse går langsomt.

Hvert klik fra en myon i en Geiger-tæller kan dermed tages som "bevis" for relativitetsteoriens rigtighed.

Rummet forkortes

Vi kan nu lave det tankeeksperiment (Einstein var en stor tilhænger af tankeeksperimentet), at jeg som observatør rider på ryggen af en myon. Så ligger den jo stille i forhold til mig og må dermed have sin normale levetid i hvile på 2,2 milliontedele af et sekund. Hvordan forklarer man så, at myonen kan nå ned til Jordoverfladen? Er der tale om et paradoks? Nej, for-

Fart øger massen



	Tilført energi	Hastighed af partikel	Styrke af magnetfelt
A			
B			
C			

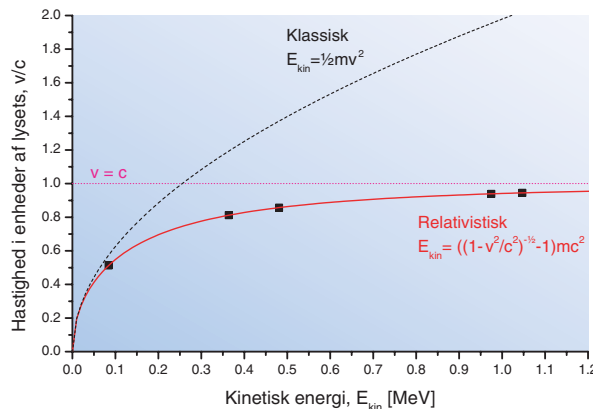
I en ringformet accelerator kan man bringe partikler op på en fart nær lysets. Et magnetfelt sørger for, at partiklerne bliver inde i ringen, så de ikke fortsætter ud af ringen pga. centrifugalkraften. Dette magnetfelt må øges i takt med, at partiklerne tilføres mere energi, og deres hastighed stiger (som vist med "målerne" fra

situation A til B). Når partiklerne har nået en hastighed nær lysets øges farten ikke længere nævneværdigt, men man må stadig øge magnetfeltets styrke for at holde partiklerne inde i ringen, hvis der tilføres yderligere energi (fra situation B til C). Dette kan kun forklares ved, at partiklernes masse øges, hvilket er i overens-

stemmelse med Einsteins relativitetsteori.

Når partiklerne bliver relativistiske, går energiforøgelsen altså til at gøre dem tungere frem for hurtigere. Således kan der fart aldrig overstige lysets.

Grafen viser hastigheden – i enheder af lysets – af elektroner udsendt fra standard radioaktive kilder som funktion af deres kinetiske energi. Den stiplede sorte linie viser den forventede værdi ifølge klassisk fysik. Den røde kurve viser den forventede værdi iflg. Einsteins relativitetsteori, hvor elektronerens hastighed nærmer sig lysets, men aldrig overstiger den. De sorte firkanter repræsenterer egentlige målinger, og det er tydeligt, at de ligger på den "relativistiske" kurve. At lysets hastighed ikke er uendelig, blev i øvrigt påvist af den danske astronom Ole Rømer allerede i 1676. Hans epokegørende måling var den første observation af en naturkonstant nogensinde



klaringen er den, at ikke bare ændrer tidens gang sig for ting i bevægelse, rummets udstrækning ændres også. Således synes afstanden til Jorden for myonen at være forkortet med samme faktor, som tiden før blev forlænget med, og den kan derfor igen nå ned til jordoverfladen. Længder af ting i bevægelse forkortes altså på samme måde som ures gang "sløves".

En måling af myonens levetid i hvile er i dag et standard-eksperiment, der udføres mange

steder verden over, bl.a. af de nye studerende på Aarhus Universitet.

Ting i bevægelse bliver tungere

Som vi har set, ændres tid og længde for ting i bevægelse. Men ikke nok med det: ifølge relativitetsteorien ændrer massen sig også. Det mest iøjnefaldende eksperiment i denne forbindelse – i øvrigt et eksperiment, der ligeledes udføres dagligt mange steder verden over – foregår i cir-

kulære accelerators (se boks).

I accelerators kan man bringe partikler som f.eks. protoner eller elektroner op på en hastighed meget tæt ved lysets. Dette gøres ved at give dem "et spark" hver gang de passerer et bestemt punkt i ringen, hvorved de øger deres bevægelsesenergi. På samme tid er man nødt til at øge magnetfeltet i ringen for at holde partiklerne inde i maskinen. Det skyldes, at kraften fra magnetfeltet skal kompensere centrifugalkraften, som afhæn-

Tvillingeparadokset

En af konsekvenserne af relativitetsteorien er, at et ur i bevægelse går langsommere set i forhold til et ur i hvile. Denne konsekvens har givet anledning til det såkaldte tvillingeparadoks, der ikke er et paradoks, men hedder sådan, fordi det umiddelbart virker som et paradoks.

Vi forestiller os, at du har en tvillingebror. Du udstyrer ham med et ur og en tilpas kraftig rumraket og sender ham ud i rummet med en fart, der er sammenlignelig med lysets. Nu går hans ur langsomt, idet han bevæger sig hurtigt væk – og tilsvarende på tilbageturen. Dette resulterer i, at han ved det glædelige gensyn 10 år senere (målt med dit ur) kun er blevet 5 år ældre. Det virker måske underligt, men det er endnu ikke et paradoks.

Men hvad nu, hvis vi ser det fra hans perspektiv? Så bevæger du dig væk og dit ur går langsomt set for ham, og så optræder paradokset. Der kan kun være eet resultat – enten er hans ur bagefter, foran eller enslydende med dit, når I mødes igen – hvad er svaret? Grunden til, at der ikke er et paradoks er, at din tvillingebror under sin rejse er nødt til at accelerere for at kunne vende sit rumskib, så han kan komme tilbage. Han vil altså under afrejsen, kursændringen og hjemkomsten blive påvirket af målelige kræfter, hvorimod du kan forblive i hvile. Denne forskel i kraftpåvirkning bryder symmetrien mellem dit og hans system og gør det lettest at beskrive fra dit synspunkt (i et såkaldt inertialsystem). Og det er netop, hvad den første version ovenfor gør. Derimod laver man en fejl i anden version, når man siger at »nu bevæger du dig væk og dit ur går langsomt set for ham« – man benytter hans kraftpåvirkede system som om der ingen kræfter virker og så går det galt: En acceleration svarer til et tyngdefelt, hvori uret går langsomt set udefra. Regnes der rigtigt på accelerationen, fås det korrekte svar, at din tvillingebror kommer hjem yngre end dig selv.

Nu kan det jo endnu ikke lade sig gøre at sende mennesker ud i rummet med en fart tæt på lysets, men i 1971 udførte amerikanerne Keating og Hafele et lignende eksperiment. De sendte fire atomure med almindelige rutefly to gange Jordan rundt og observerede, om urenes gang var påvirket som forudsagt af relativitetsteorien i forhold til stillestående ure. Inden for målenøjagtigheden passede teori og måling perfekt! Der er altså ingen tvivl: Et atomur i bevægelse går langsomt. Og da ethvert ur (inklusive dine aldringsprocesser) til syvende og sidst stammer fra atomernes "tikken", ældes man langsommere (set for andre) ved at bringe sig i bevægelse.

ger af partiklernes masse og fart samt radius af deres bane rundt i acceleratoren.

I begyndelsen af accelerationsfasen øges omløbsfrekvensen – dvs. det antal gange partiklerne når rundt i accelerato-

ren pr. sekund – i takt med, at partiklernes energi stiger. Men når partiklen har opnået en bevægelsesenergi svarende til dens masse gange lysets fart i anden potens ($E=mc^2$ igen), øges omløbsfrekvensen ikke

længere nævneværdigt, selvom man vedbliver med at tilføre energi. Til gengæld er det stadig nødvendigt at øge magnetfeltet i takt med, at energien stiger for at holde partiklerne inde i acceleratoren. Partiklernes fart må jo være næsten konstant, da omløbsfrekvensen ikke øges, og radius i banen er også uændret ellers ville man tabe partiklerne, så den eneste mulige forklaring på, at man bliver nødt til at skrue op for magnetfeltet, er, at partiklens masse øges i takt med energien.

Ting i bevægelse bliver altså tungere – nøjagtigt som forudsagt af Einsteins relativitetsteori.

Relativitet og GPS

I modsætning til andre vigtige teorier inden for fysikken, som f.eks. kvantemekanikken, har Einsteins relativitetsteori ikke umiddelbart åbnet op for et industrielt eventyr. Men der findes dog et eksempel på en teknologi, der kun fungerer, hvis man tager hensyn til relativitetsteorien – nemlig navigationssystemet GPS (Global Positioning

System).

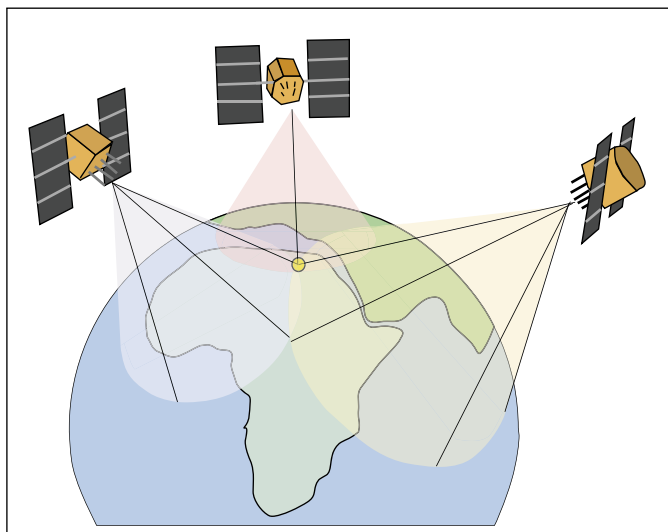
GPS-modtagere er efterhånden ved at blive standardudstyr i nyere biler, og ses i dag i de fleste taxaer. Princippet i GPS er egentlig ganske enkelt: Modtageren kommunikerer med minimum fire satellitter, og kan dermed finde den nøjagtige position med en opløsning på en snes meter (vha. tre af satellitterne) samt det nøjagtige tidspunkt med en præcision på nogle få milliard-dele af et sekund (vha. den sidste af satellitterne). To ting er nødvendige for at systemet virker. For det første, at fundamentet for relativitetsteorien er korrekt – nemlig, at lysets hastighed er endelig og uafhængig af afsenderens hastighed.

For det andet, at hver af satellitterne bærer et ur med en relativ nøjagtighed, som er bedre end en ud af titusind milliarder, svarende til eet sekund per 300.000 år. Dette kan lade sig gøre med atom-ure.

For GPS-systemet er der to relativistiske effekter, der viser sig at være helt afgørende (mange tusinde gange for store til, at man kan ignorere dem), og de har begge at gøre med urens gang. Som tidligere nævnt går et ur i bevægelse langsomt set i forhold til en observatør i hvile. Det samme gør sig gældende for et ur i et tyngdefelt – dette går også langsomt set i forhold til en observatør i hvile og langt fra tyngdefeltets centrum.

GPS-satelliternes fart er ca. fire km/s svarende til, at deres ur – set fra Jordan – går unøjagtigt med et sekund per 300 år. Effekten af tyngdekraften er, at satellittens ur går for hurtigt – en korrektion, der er større med ca. en faktor fem sammenlignet med den forårsaget af farten. Konverteret til en afstand ville sådanne fejl tilsammen løbe op i 11 kilometer pr. dag, hvilket f.eks. ville gøre systemet ubrugeligt for taxa-chaufføren (for ikke at nævne militæret, eftersøgningstjenester, skibsnavigation etc.).

Hvis GPS-systemet skal kunne give os nøjagtige positioner, er det altså nødvendigt dels



Princippet i GPS. De tre satellitter giver i deres signalers fælles skæringspunkt den præcise position af modtageren ved at benytte tiden givet fra en fjerde satellit.

at benytte relativitetsteoriens ene grundsten – lysets konstante hastighed, dels at korrigere for effekterne på ures gang forklaret af samme teori. Der er altså ingen tvivl om, at relativitetsteorien faktisk har betydning i vores hverdag!

Inden for de kommende få år regner man i øvrigt med, at udvidelsen af GPS-systemet vil kunne føre til en præcision på omkring en halv meter. Et sådant system vil f.eks. kunne udnyttes til automatiserede landinger af fly ved meget lav sigtbarhed.

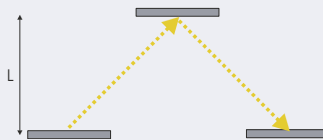
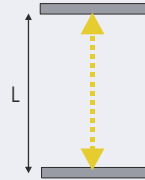
Teorien har stået sin prøve

De nævnte eksempler er blot et lille udpluk af de mange fænomener, der dagligt observeres og som kun kan forklares ved hjælp af relativitetsteorien. Der er altså massevis af eksperimenter, der viser, at alt er – ikke relativt – men relativistisk i større eller mindre grad.

Der er dermed ingen tvivl om, at denne enestående teori, som blev påbegyndt af en ung mand på et schweizisk patentkontor og afsluttet ti år senere, har stået sin prøve. ■

Et ur i bevægelse går langsomt

Vi konstruerer et yderst simpelt ur – et lysur – bestående af to parallelle spejle og en lyspuls, der bevæger sig frem og tilbage mellem spejlene (se figur 1). Tiden kan måles ved at tælle, hvor mange gange lyspulsens har ramt det nederste spejl. F.eks. kan vi vælge afstanden L mellem spejlene til at passe med, at det tager lyset en milliontedel sekund at løbe frem og tilbage ($L = 150$ m). Nu sætter vi så lysuret i hurtig bevægelse på tværs af lyspulsens bevægelsesretning. Hvordan ser bevægelsen af lyset og spejlene så ud? Nu bevæger lyset sig – set for den stillestående – skråt, idet lysets og lysurets hastigheder skal adderes (hvis ikke lyset bevægede sig skråt kunne det ikke reflekteres fra det



øverste spejl, der jo har flyttet sig i den tid det tog lyset at bevæge sig derop). Tilsvarende når lyset løber nedad, se figur 2.

Men nu skal lyset jo løbe noget længere for at vende tilbage idet ifølge Pythagoras' sætning $x^2=L^2+s^2$. Lyset løber altså længere, men med samme hastighed (fundamentet er jo at lysets hastighed er den samme for alle). Målt med et stillestående ur tager det derfor længere tid for lyspulsens på lysuret i bevægelse at løbe én gang frem og tilbage – altså går uret langsommere!

Om forfatteren:



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

Tlf.: 89 42 37 38

E-mail: ulrik@phys.au.dk

Videre læsning

Om GPS: N. Ashby, *Physics Today*, May 2002, s. 41

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

Om lysets fart:

www.phys.au.dk/~ulrik/lysets_fart_v10.pdf

Om Ole Rømers måling:

www.phys.au.dk/~ulrik/ole_roemer.htm