

Tidens relative gang

Af Ulrik Uggerhøj, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Tidens gang ændres ved bevægelse og under påvirkning af tyngdekraften. Det medfører en række forunderlige fænomener. Hvis man eksempelvis sender et ur rundt om jorden i et rutefly, vil det gå langsommere i forhold til et ur, der er blevet tilbage i lufthavnen. Og Jordens centrum er et par år yngre end overfladen. Sådanne fænomener – og mange andre, der strider mod intuitionen – behandles i denne artikel¹, hvor Einsteins relativitetsteori er det grundlæggende tema.

Et ur i bevægelse går langsomt

“Bang” siger det fra startpistolen, og løbet er i gang. Sprinterkongen Usain Bolt springer ud af startblokken, og hans atletiske krop yder maksimalt på vej mod mål. Efter 9,58 sekunder passerer han mållinjen, og han har dermed sat ny verdensrekord på 100 meterdistancen.

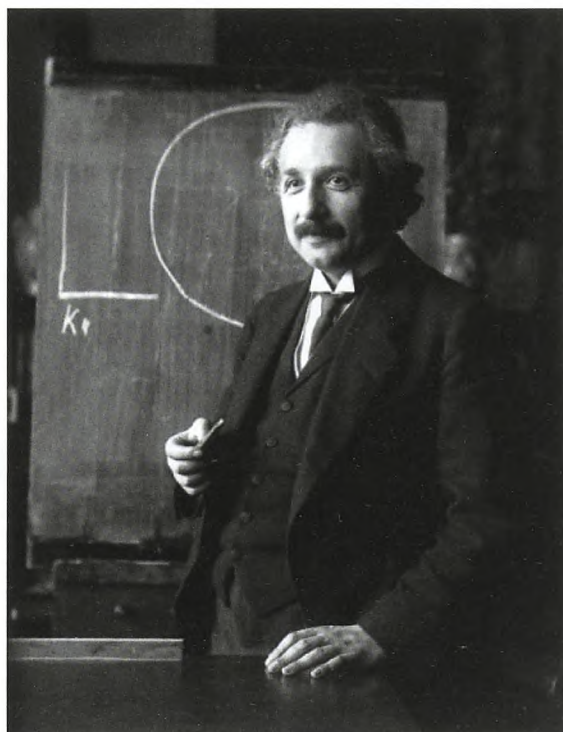
Man afgør altså sprintkonkurrencer med tidtagninger, der er præcise inden for hundrededele af et sekund. Omsat til distance, med *Lightning Bolts* fart, svarer en hundrededel sekund nogenlunde til halvdelen af hans fods længde, godt og vel 10 centimeter. Så der skal ikke meget til at afgøre konkurrencen.

Men hvis nu Usain Bolt havde armbåndsur på, mens han løb, ville det faktisk ikke vise præcist det samme som stadionuret.



Figur 1. Usain Bolt, verdensrekordholderen i 100 m sprint, løber med en topfart på ca. 44 km/t eller godt 12 meter i sekundet. Hans ur går langsomt – en effekt, der kan måles for tilstrækkeligt præcise ure med denne fart – set fra synspunktet for en tilskuer på stadion.

Det ville gå langsommere. Så hans rekordtid ville afhænge af, om det var hans eget ur, der målte, eller om det var et andet ur, fx stadionuret. Forskellen er ikke stor, men nok til at den kan måles med meget præcise ure, selv for hastigheder svarende til Usain Bolts løb. Hvorfor nu det? Det skyldes, at tid er en *relativ* størrelse. En tur over Atlanten med rutefly betyder eksempelvis, at du er ældet ca. 4 milliarddele sekund mindre end familien derhjemme. For ure om bord på rutefly blev forskellen målt for næsten 40 år siden (som diskuteres i detaljer nedenfor), og i dag kan man måle den for hastigheder, der er relevante for løbende mennesker.



Figur 2. Foto af Albert Einstein fra ca. 1921 – det år, hvor Einstein modtog Nobelprisen i fysik for opdagelsen af den fotoelektriske effekt (en af hans store opdagelser fra 1905) og for sine bidrag til den teoretiske fysik, underforstået relativitetsteorien. Foto: Ferdinand Schmutzer.

Uret måler nemlig ikke tiden som en fast størrelse, der altid er den samme. Tid kan ikke defineres endeligt og afhænger af faktorer som bevægelse og tyngdekraft. Hvis Usain kunne løbe med lysets hastighed – 300.000 km pr. sekund – ville uret ikke bare gå langsomt. Det ville gå helt i stå.

At tiden ikke går på absolut måde, men netop afhænger af bevægelse, var en af Albert Einsteins store opdagelser i den såkaldte specielle relativitetsteori, der blev publiceret i 1905.

Man kan spørge, hvad der ville ske, hvis nu Usain kunne løbe lidt hurtigere, end lyset bevæger sig? Men den går ikke: Et ur kan ikke gå langsommere end i stå (så ville det gå baglæns!), og det kan det ikke, fordi lysets hastighed ikke kan overskrides.

Det er dog en teoretisk mulighed, at der findes elementarpartikler, de såkaldte tachyoner, der er “født”

¹ Artiklen er oprindeligt skrevet til bogen “25 Søforklaringer – Naturvidenskabelige fortællinger fra Sjøauditorierne”, udgivet af Aarhus Universitetsforlag i 2014. Den er her gengivet med velvillig tilladelse fra forfatteren og forlaget.

med en hastighed større end lysets og altså ikke overskrider den. Hvis man kunne sende sådanne partikler af sted med en hastighed større end lysets, ville man ifølge den konventionelle udgave af relativitetsteorien i princippet kunne sende beskeder bagud i tid. Og kan man sende beskeder bagud i tid, åbner der sig et virvar af bizarre muligheder: Man kunne fx sende lørdagens Lotto-tal tilbage til onsdag, hvor man ville kunne nå at satse penge, der ville udløse den store gevinst.

Faktisk havde man en del spekulationer i den retning, da forskere fra det fælleseuropæiske partikelfysiklaboratorium, CERN, i efteråret 2011 annoncerede, at de havde målt såkaldte neutrinoer, der bevæger sig hurtigere end lyset. I tråd med min egen og mange andres skepsis viste det sig dog, at der var tale om en målefejl.

Er du bevæget?

Et ur i bevægelse går altså langsomt. Sådan ser det i det mindste ud for os, der står stille på stadion og betragter Usain komme susende forbi med uret siddende på armen. Men principielt kan vi ikke vide, hvem der er i bevægelse, og hvem der står stille (vi glemmer her forsætligt, at Usains muskler skal yde noget for at overvinde luftmodstand osv.). Det er nemlig umuligt at måle, at man er i jævn bevægelse, medmindre man sammenligner med noget, man bevæger sig i forhold – relativt – til. Og selv da kan man med fuld ret sige, at det er det andet, som man sammenligner med, der bevæger sig, mens man selv er i hvile.

Det siges om Albert Einstein, relativitetsteoriens “fader”, at han under en togrejse spurgte konduktøren: “Standser Oxford ved dette tog?” Om anekdoten er sand, er ikke så vigtigt, men du kender sikkert selv fænomenet, når du sidder i toget ved perronen, og der holder et tog ved siden af. På et tidspunkt sætter toget i gang og kører jævnt fremad. Men er det nabotoget, der kører, eller er det dit? Hvis der kun var de to tog i hele verden, kunne man ikke afgøre, om det var det ene, der bevægede sig i forhold til det andet, eller det andet, der bevægede sig i forhold til det ene. Så man kan normalt afgøre det ved at sammenligne med en tredje ting, nemlig perronen, skinnerne eller Jordkloden.

Bevægelse sker altså altid i forhold (relativt) til noget andet, og hvis der kun er to togvogne i hele verden, kan man derfor ikke sige, hvem der bevæger sig. Kun at de to togvogne har indbyrdes bevægelse.

Man kan også tage et andet eksempel: Hvis piloten på charterflyet til Gran Canaria melder om “roligt flyvevejr uden turbulens”, kan man roligt bestille en kop kaffe hos stewardessen, selvom flyet bevæger sig med en hastighed på over 800 km/t. Når man er i jævn bevægelse, kan man nemlig ikke se eller mærke kaffen anderledes, end hvis man holder stille på landingsbanen. Det er en helt anden sag med kaffen – og alt andet i flyet – hvis der er lufthuller.

Denne observation – at man ikke kan måle jævn bevægelse uden at “kigge udenfor” – kaldes relativitetsprincippet og blev fremført af bl.a. den italienske naturvidenskabsmand Galileo Galilei for knap 400 år siden. Begrebet jævn bevægelse giver altså ikke mening

i sig selv, men kun hvis man refererer, hvad det er i forhold til.



Figur 3. Galileo Galilei malet af Justus Sustermans i 1636. Galileo betragtes som en af den moderne naturvidenskabs grundlæggere. Han var en af de første, der med sikkerhed har tænkt over begrebet relativitet.

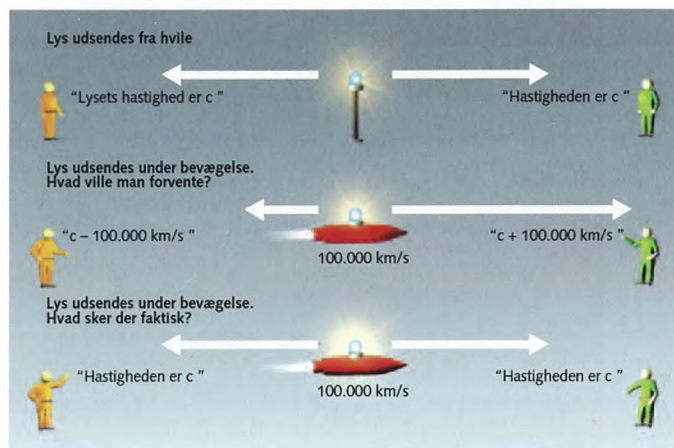
Lysets hastighed er altid den samme

Fundamentet i Einsteins specielle relativitetsteori er, at lysets hastighed altid er den samme. Det lyder måske ikke umiddelbart så mærkværdigt, men lad os se lidt nærmere på det. Vi begynder med noget mere håndgribeligt: En spydkaster løber med 10 km/t på et stadion og kaster sit spyd med 20 km/t i samme retning, som hun løber. Med hvilken fart bevæger spyddet sig i forhold til stadion? Det bevæger sig med summen af hastighederne, dvs. $10 \text{ km/t} + 20 \text{ km/t} = 30 \text{ km/t}$. Hun kan altså sætte ekstra fart på sit spyd ved at løbe, mens hun kaster.

Det samme kan man gøre med mange andre ting, fx bolde og sten, og hvad man nu ellers kan finde på at kaste med. Men hvad med lys? Kan man sætte ekstra fart på lys ved at bevæge sig hurtigt? Nej, det kan man ikke. Det er et mystisk, men meget velafprøvet faktum, at lys altid har samme fart, ca. 300.000 kilometer i sekundet, gennem det tomme rum.

Vi kan forestille os et rumskib, der passerer med en fart på 99 % af lysets hastighed. Når kaptajnen tænder forlygterne, mener han, at dette lys udbreder sig med... ja, lysets hastighed. Men eftersom han allerede bevæger sig i forhold til os – endda ret hastigt – vil vi så modtage lyset fra ham med en fart, der er summen af hans og lysets, dvs. 1,99 gange lysets “normale” hastighed? Nej, med lys forholder det sig anderledes end med spyd, sten og bolde: Vi modtager det lys, han med høj fart udsender, med præcist lysets normale hastighed.

Den slags ultrahurtige rumskibe kan man ikke konstruere, men man kan alligevel lave eksperimentet ved at tvinge elektroner med hastigheder uhyre tæt på lysets, 99,9999999998 %, til at udsende lys. Og man kan måle, at elektronerne udsender lyset med netop den normale lyshastighed. Jeg har også selv udført sådanne forsøg og kan bevidne, at det er korrekt. Man kan altså ikke forøge lysets fart. Omvendt kan man heller ikke bremse det – så længe vi taler om lys i det tomme rum. Man skulle jo ellers tro, at lys udsendt baglæns fra det førnævnte rumskib ville bevæge sig med kun 1 % af den normale fart, men det gør det altså ikke.



Figur 4. Figuren illustrerer det faktum, at lysets hastighed altid er den samme. Selvom lyset bliver sendt af sted fremad fra et rumskib, der flyver med en hastighed tæt på lysets, vil lyset ikke få mere fart på. Illustration: Troels Marstrand.

Det er et meget velafprøvet eksperimentelt faktum, at lys højst kan "overtage" en milliarddel af udsenderens hastighed, og teorien siger, at den virkelige andel, det kan arve, er lig med nul. Sat lidt på spidsen kan man sige, at dette faktum er det eneste mærkelige i relativitetsteorien – resten er logik. Det kan indimellem være kompliceret logik, helt bestemt, og specielt kan konsekvenserne være svære at forlige sig med, men det mystiske ligger altså blot i, at lysets fart altid er den samme. Og det ved vi med stor sikkerhed.

Hvilket ur går langsomt?

Lad os nu vende tilbage til Usain Bolt, hvis ur går langsommere end stadions, når han spurter af sted. Men så må Usain da mene, at stadionuret går hurtigt? Nej, den går ikke, for så kan man jo afgøre, hvem der er i bevægelse, og hvem der er i hvile – den, hvis ur går langsomt, er i bevægelse. Og det dur ikke, for Usain har ret til at sige, at det er ham, der er i hvile (vi glemmer her igen, at hans muskler skal yde noget), og stadion, der bevæger sig forbi. Samme ret som vi på stadion har til at sige, at vi er i hvile, og han bevæger sig jævnt forbi. Det fortæller eksemplet med kaffen på vej til Gran Canaria os: Jævn bevægelse kan ikke måles uden at sammenligne med noget "udenfor". Aha, så Usain må også mene, at stadionuret går langsomt, selvom vi på stadion mener, at det er Usains ur, der går langsomt.

Så hvis ur går langsomt?

Der er kun tre muligheder: Usains ur går langsomt i forhold til stadionuret, de går lige hurtigt, eller stadionuret går langsomt i forhold til Usains. Men hvis

vi forudsætter *jævn* bevægelse hele vejen, er det et spørgsmål, der ikke kan afgøres: To ure kan kun passere hinanden én gang, hvis de bevæger sig jævnt i forhold til hinanden. Og hvis man skal finde ud af, hvilket ur der går langsomt, er man nødt til at sammenligne dem to gange. Forestil dig, at du står ved stadionuret, og Usain med sit eget ur er klar til signal i startblokken lige ved siden af. Idet startskuddet affyres, nulstilles begge ure, og Usain sprinter fremad. Men hvis I skal afgøre jeres tvist om, hvis ur der går langsomt, er han nødt til at vende om – enten ved at standse op og løbe tilbage eller ved at løbe hele vejen rundt på stadion. Men så er hans bevægelse ikke længere jævn hele vejen – han vil kunne mærke kræfter, der påvirker ham, mens han ændrer hastighed (fart og/eller retning).

Det er den slags kræfter, der gør børnelegen æggeløb svær og sjov – når man løber med et æg på en ske frem og tilbage. For den, der løber, virker det, som om noget trækker i ægget, når hun vender om. Hvis du her får associationer til kaffen, der løber ud af koppen pga. lufthuller på vej til Gran Canaria, er du på rette spor.

Det er altså ikke muligt at sammenligne to ure to gange under betingelsen af jævn bevægelse hele vejen. Derfor fører det ikke til en modstrid, at begge parter mener, at det er modpartens ur, der går langsomt.

Foryngelseskur?

Begraver vi stridsøksen og holder fast i, at et ur i bevægelse, uanset hvis det er, går langsomt, dukker der nye, spændende spørgsmål op. Kan man så udnytte dette fænomen som en "foryngelseskur" – dvs. ved at lade ens ur gå langsomt ved at bevæge sig? Nej, man kan ikke på denne måde få sit eget ur, fx hjertets regelmæssige slag, til at gå langsomt. For man kan jo ikke bevæge sig i forhold til sig selv. Det er sådan set en ret trivial observation, men dens implikationer er alligevel vidtrækkende.

Man kan altså ikke få sit indre ur til at gå langsomt. Derimod får man, ved at bevæge sig jævnt i forhold til andre, deres ur – og deres hjerteslag, aldringsprocesser, antal fødselsdage osv. – til at gå langsomt. Dog skal man temmelig tæt på lysets hastighed, før det virkelig batter: Hvis man skal have vennerne til at fylde år halvt så tit, som man selv gør, skal man op på 87 % af lysets hastighed, svimlende 259.627.885 meter pr. sekund. Den højeste hastighed for objekter af størrelse sammenlignelig med mennesker, vi kender til tæt på os, er Jordens banehastighed omkring Solen. Den er ca. en titusindedel af lysets hastighed. Altså alt for lidt til at give betydelige justeringer, og i øvrigt irrelevant, da vi endnu ikke har fundet intelligent liv andre steder i universet, som vi kunne sammenligne fødselsdage med.

Men hvis den ene af de to rejsende vender om, må der være en løsning og måske en form for foryngelseskur. Det vender jeg tilbage til i afsnittet om tvillingeparadokset.

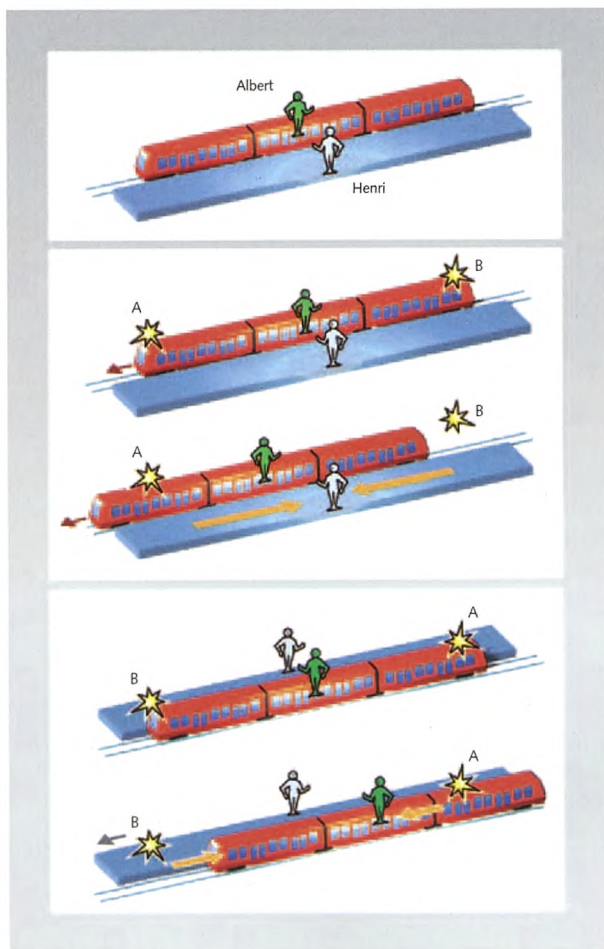
Samme tid, samme sted

Man kan strengt taget ikke sige noget om, hvad klokken er et andet sted, medmindre man angiver sin bevægelse i forhold dertil. Det har den behagelige konsekvens, at vi alle – du, jeg og Usain Bolt – har noget, der er helt vores

eget, nemlig “nu”. Vi deler det med alle dem, vi står stille i forhold til, men så snart vi bevæger os, adskiller vore opfattelser af begrebet sig.

Begivenheder, der sker samtidigt for den ene, gør det ikke nødvendigvis for den anden. Tid og rum hænger sammen i den såkaldte rumtid, og begge dele skal tænkes med, når vi vil sammenligne tidspunkter. Det bliver særlig tydeligt, når vi kommer op i så store skalaer, at lysets hastighed spiller ind.

Et lille tankeeksperiment kan vise, hvorfor samtidighed ikke er noget absolut, men afhænger af, hvem der spørger. Vi kigger på to personer, Albert og Henri: Albert placeret midt i et tog i hastig bevægelse, og Henri placeret på perronen udenfor, (se figur 5).



Figur 5. Henri og Albert passerer hinanden, den ene på perronen, den anden i tog. Ved passagen sendes der lysglimt ind mod Henri fra togets ender, og det samme lys kan registreres fra enderne af vognen i Alberts tog. Som forklaret i hovedteksten medfører det, at de er uenige om samtidigheden af lysglimtenes afsendelsestidspunkt. Den mellemste figur viser situationen set fra Henris synspunkt, og den nederste set fra Alberts, hvor – i begge tilfælde – de gule pile symboliserer lysets udbredelse. Illustration: Troels Marstrand.

Idet Henri og Albert passerer hinanden, sendes der lysglimt ind mod Henri fra togets ender, og det samme lys kan registreres i Alberts tog. Men i løbet af den tid, der går, fra lyset bliver sendt afsted, til lyspulserne krydser hinanden, har toget bevæget sig fremad. De mødes altså ikke i midten af toget, men tættere ved bagenden. Så selvom Henri mener, at de to lysglimt er afsendt samtidig, er Albert tvunget til at mene, at det fra forenden er afsendt først. Han kan jo ikke måle, at han

bevæger sig, og da han ser glimtet fra forenden først, og da glimtene har samme hastighed (nemlig lysets), må den forreste være afsendt først.

Hvis nu lysglimtene stammede fra ure, der viser kl. 12, vil Henri altså mene, at de to ure er synkroniserede, mens Albert vil mene, at det ur, der er bagest i Henris bevægelsesretning er foran: Albert ser det vise 12 før Henris forreste. Baseret på denne forskel i samtidighed, kan man altså konkludere, at et ur, der er bagved i bevægelsesretningen, er foran tidsmæssigt. Det kan man udtrykke kompakt: “Når man er bagud, er man foran”. Bare man er opmærksom på, at det ene refererer til en rumlig retning, det andet til tid. Taget for pålydende giver det jo ingen mening (og da slet ikke, hvis man benytter det i forbindelse med lektielæsning).

Faktisk kan to begivenheder, A og B, bytte rækkefølge, afhængigt af hvis ur der måler. Hvis de for den ene sker i rækkefølgen A derefter B, kan de ske i den omvendte orden, B fulgt af A, for den anden. Det kræver, at begivenhederne sker så tæt tidsmæssigt og så langt fra hinanden, at de umuligt kan være forbundne (intet, heller ikke lys, kan nå fra den ene til den anden). Det vender jeg tilbage til.

Tag fx spørgsmålet om, hvad klokken er i Andromeda-galaksen. Lad os sige, at klokken er 12 middag som på Jorden, hvilket vil sige, at Jorduret og Andromedauret er synkroniserede i hvile på Jorden (set for dig). Hvordan ser det ud for en, der går forbi dig, med retning mod Andromeda? For hende bevæger dit og Andromedas ur sig forbi med sidstnævnte bagest. Bevæbnet med “Når man er bagud, er man foran” kan hun konkludere, at uret i Andromeda er foran. Det viser altså noget andet, end du mener, fx kl. 15. Og da afstanden dertil gør effekten større, drejer det sig faktisk om fem dage ved almindelig gang, idet Andromeda ligger 2,5 millioner lysår herfra. Hvis der så sker noget ude i galaksen, fx en eksplosion, vil du mene, at det skete den 1. maj, mens den gående vil hævde, at det skete fem dage senere. Set fra dit synspunkt er hendes version af rækkefølgen fra fx 2. maj til eksplosionen forkert – og omvendt. Det er ikke (helt) kun af akademisk interesse: Forestiller vi os et ondsindet folk, der pønser på at udlette Jorden med en uhyre kraftig laser, kan afsendelsen af laserstrålen være en realitet for hende, men stadig fremtid for dig. Det piller med andre ord ved forestillingen om, at en begivenhed, der har fundet sted langt herfra, må have fundet sted i absolut forstand – med andre ord, at alle vil mene, at den *er* sket. Det er ikke tilfældet. Dit “nu” er dit eget og falder kun sammen med andres, hvis I er i hvile i forhold til hinanden.

Tvillingeparadokset

Lad os vende tilbage til sammenligningen af to ure i indbyrdes bevægelse. Hvis de altid er i jævn bevægelse, kan de, som vi har set, ikke sammenlignes to gange. Derimod kan man nulstille urene samme sted, lade det ene ur forblive i hvile og lade det andet rejse ud, vende om (hvilket nødvendigvis er en ujævn bevægelse) og rejse tilbage til det første. I dette tilfælde kan de sammenlignes to gange, så hvilket går langsomt? Det gør det, der rejste ud og vendte tilbage. Det er på trods af,

at både på ud- og hjemturen vil den rejsende mene, at det tilbageværende ur går langsomt.

Her er kimen til det såkaldte "tvillingeparadoks", fordi tvillingerne Albert og Marie i princippet kunne opleve det samme: Mens Albert bliver hjemme i sin hængekøje, rejser Marie ud i Mælkevejen med 60 % af lysets hastighed, vender om i løbet af et øjeblik (hun hopper fra det udgående rumskib over på et hjemgående rumskib – det kan ikke lade sig gøre, men gør eksemplet nemmere og indeholder ikke afgørende ændringer) – rejser tilbage med samme fart og returnerer, efter at Albert er blevet 20 år ældre. Men Marie er kun blevet 16 år ældre! Alligevel mener hun under hele sin tur, at Alberts tid går langsomt, for han bevæger sig jo i forhold til hende. Hvorfor er det så ikke ham, der er yngre end hende, når de mødes igen? Hvad er galt?

Det er tilsyneladende et paradoks. Løsningen er basalt set, at det kun giver mening at sige, hvad klokken er et andet sted, hvis man specificerer sin bevægelse hen mod (eller væk fra) det pågældende sted. For alle dagligdags formål er dette fænomen helt uden betydning, men som vi så ovenfor, kan to personer, der passerer hinanden med almindelig ganghastighed, være uenige om tiden – med en difference på godt 10 dage – i Andromeda.

På samme måde som denne uenighed skyldes disse personers indbyrdes bevægelse, vil Maries opfattelse af, hvor gammel Albert er, også flytte med 7,2 år, lige idet hun vender om (svarende til, om man går den ene eller anden vej og tænker på Andromeda). Hun bevæger sig jo ret tæt på lysets hastighed, så man må regne med en betydelig effekt. Derfor vil hun i løbet af hele sin rejse ud og hjem se, at Albert bliver 12,8 år ældre. Det er betydeligt færre end hendes egne 16 år, men hun ved samtidig, at når hun skifter retning for at vende hjem, skifter hendes opfattelse af, hvor meget ældre Albert er blevet med 7,2 år. Så hun forventer, at han er $12,8 + 7,2 = 20$ år ældre, når de mødes igen, selvom hun selv kun er blevet 16 år ældre. Og de er enige om, hvor langsomt deres tvillings ur går: Albert mener, at Maries går langsomt med $20/16 = 1,25$, og Marie mener, at Alberts går langsomt med $16/12,8 = 1,25$. Så pengene passer. Et ur i bevægelse går langsomt – både set for Albert og for Marie. Men Maries ændring af bevægelsesretning (hendes "rumskibshop") medfører et skift i, hvad hun opfatter som "nu" et andet sted.

Albert Einstein var meget tidligt opmærksom på denne ejendommelige konsekvens, men mente ikke, at der var noget paradoksalt i det, hvad der også kun tilsyneladende er. I begyndelsen af 1970'erne efterviste fysikeren Joseph C. Hafele og astronomen Richard E. Keating netop dette fænomen (se figur 6): De havde fire meget præcise ure, som de lod gå synkront i et stykke tid for at bekræfte, at de gik lige hurtigt. Derefter sendte de to af urene med rutefly Jordan rundt og sammenlignede efterfølgende urene to og to. Inden for målesikkerheden fik de præcist den værdi, der blev forudsagt fra relativitetsteorien. De ure, der blev sendt Jordan rundt, *gik* langsomt. I dag eftervises fænomenet dagligt gennem GPS-systemet, som vi vender tilbage til senere.



Figur 6. Amerikanerne Hafele og Keating sendte i oktober 1971 atomure rundt om Jorden med almindelige rutefly, både vestpå og østpå. De sammenlignede dem med identiske ure, der ikke havde bevæget sig i forhold til Jorden. Det viste sig, at de rejsende ure pga. bevægelsen havde tabt godt hundrede milliardde sekunder i forhold til de ure, der ikke havde flyttet sig. Resultatet var i god overensstemmelse med relativitetsteorien. Foto: AP.

Sekundernes vægt

Bevægelse har altså stor betydning for tidens gang. Men det har tyngden faktisk også: Klokken vil ikke være det samme i bunden og i toppen af et tårn. Et ur placeret i bunden vil set udefra gå langsommere end et anbragt i toppen. Sætter vi tingene lidt på spidsen, betyder det, at din fætter i La Paz i Bolivia – 3.600 m over havets overflade, hvor tyngdefeltet er en anelse svagere – i løbet af 80 år lever en tusindedel af et sekund kortere end dig, der bor ved havoverfladen i flade Danmark.

Har du prøvet at gå ind i en elevator med en badevægt, stille dig op på den og trykke på knappen, der sender dig op til øverste etage? Sikkert ikke, men du kan nok forestille dig, hvordan det er: Man føler sig lidt tungere, idet elevatorstolen øger farten, og lidt lettere, når den bremser ned igen. Det vil vægten også vise. At øge sin fart, en ujævn eller accelereret bevægelse, er altså nært forbundet med at veje noget, dvs. at have tyngde.

Desuden er acceleration (som jo er ændring af hastighed i løbet af et tidsrum) og tyngde næsten ikke til at skelne. Hvis elevatoren kunne accelerere opad hele tiden, og man ikke kunne kigge ud fra den, ville man ikke kunne afgøre, om det skyldtes, at man befandt sig ved overfladen af noget, der var tungere end Jorden, eller om det skyldtes acceleration. Altså om de kræfter, man kunne mærke, skyldtes en tyngdekraft nedad eller en acceleration af ens masse opad. Denne lighed udnytter man faktisk meget tit i praksis: Enhver tøjvaskendes drøm er at kunne hænge tøjet op et sted, hvor tyngdekraften er meget større end på Jorden, for så drypper vandet hurtigt af, og tøjet tørrer i en ruf. Og det er faktisk en sådan kunstig tyngdekraft, man skaber, når man centrifugerer tøjet i vaskemaskinen. Accelerationen af tøjet rundt i cirkelbevægelsen inde i maskinen bevirker en tilsvarende tyngdekraft, som er flere hundrede gange den på Jorden. Vandet løber af på få minutter i stedet for mange timer.

Et andet eksempel er en ketchupflaske. Når flasken er ved at være tom, er der kun to ting, du kan gøre, efter at du har vendt bunden i vejret på den: Enten kan du væbne dig med tålmodighed og vente på, at Jordens tyngdekraft trækker den sidste sjat ketchup ud af flasken, eller du kan udnytte ligheden mellem acceleration og tyngde og ryste flasken i korte, bestemte ryk. Derved trækker den kunstige tyngdekraft, du skaber ved at ryste (som jo er en *ujævn* bevægelse), ketchuppen ud af flasken meget hurtigere. Ligheden mellem acceleration og tyngde kalder man også ækvivalensprincippet.

Lysets indre ur i tyngdefeltet

Tyngdens indflydelse på tidens gang har den konsekvens, at tiden går langsommere i et stærkt tyngdefelt end i et svagt. Man kan kort illustrere årsagen til dette fænomen ved at tænke på en person, der står med sin laserpegepind ved foden af Rundetårn og sender lyset op til toppen. Når lyset rejser opad, skal det, som alle andre objekter, tabe energi. Hvis der er tale om en bold, vil bolden vende om og falde ned igen fra det højeste punkt på dens bane, hvor den har tabt al sin bevægelsesenergi. Men da lys altid bevæger sig med lysets hastighed, kan det ikke tabe energi ved at ændre fart. Det må gøre det på anden vis: ved at ændre farve. Konkret bliver lyset mere rødt, idet rødt lys har en lavere frekvens og dermed en lavere energi end blå lys. Fænomenet kaldes rødforskydning, og da rødt lys "vibrerer" langsommere end blå, betyder det, at dets "indre ur" roterer langsommere set fra toppen.



Figur 7. Tilstanden "frit fald" kan betegne den situation, at centrifugalkraft (masse gange acceleration, målt af astronauten) og tyngdekraft ophæver hinanden. Da alle legemer falder med samme acceleration i det tomme rum – uafhængigt af hvad de vejer – kan man opfatte det som "hvile", når man er i frit fald. Alle objekter i nærheden af en selv falder jo med samme fart og er derfor i hvile i forhold til en selv (når man fraregner de såkaldte tidevandskræfter, der normalt er små). Foto: NASA.

Men den korte illustration viser ikke direkte forbindelsen til tidens gang, så her kommer en mere grundig og teknisk forklaring. Lad os for nemheds skyld antage, at der udsendes en lysbølge fra bunden af elevatorstolen, mens den er i hvile, og at elevatoren derefter øger

sin hastighed opad – at øge sin hastighed er jo netop acceleration. Så når lysbølgerne udsendt fra gulvet i elevatorstolen når frem til loftet, bevæger loftet sig væk fra lyset. Her indtræder den såkaldte Dopplereffekt, der blev opdaget i 1842 af den østrigske fysiker Christian Doppler (1803-1853). Doppler-effekten optræder for både lys og lyd, men er mest kendt i hverdagen fra lyd-fænomener, fx ambulancens sirene, der har en højere tone, når den nærmer sig, end når den fjerner sig. Forklaringen er, at man – så længe man bevæger sig hen imod lyd-kilden – modtager flere bølgetoppe pr. tidsenhed, end man gør, når man fjerner sig. Simpelthen fordi man i første tilfælde bevæger sig hen imod bølgetoppene i et tempo, der i nogen grad er sammenligneligt med deres udbredelsesfart. Det er antallet af bølgetoppe pr. tidsenhed, der afgør lydets tonehøjde – hvis man i løbet af et sekund modtager flere bølgetoppe, vil tonen være højere. For lys findes der et lignende fænomen, der kaldes henholdsvis rødforskydning (når kilde og modtager fjerner sig fra hinanden, farven tenderer mod det røde) og blåforskydning (når kilde og modtager nærmer sig hinanden, farven tenderer mod det blå). Idet den røde farve har en længere bølgelængde end blå, svarer rød og blå til henholdsvis færre og flere bølgetoppe pr. tidsenhed i lysbølgen.

I elevatoren måler man altså en rødforskydning, idet modtageren – toppen af elevatoren – fjerner sig fra kilden. Og da en acceleration opad svarer til en tyngdekraft nedad, bliver lys altså rødforskydet, dvs. trukket i retning af det røde, når det sendes opad i et tyngdefelt. Der kommer altså færre bølgetoppe pr. sekund frem til toppen af Rundetårn – målt med et ur i toppen – end der bliver afsendt pr. sekund fra bunden (målt med et identisk ur placeret i bunden).



Figur 8. Ure går forskelligt afhængigt af, hvor de er placeret i tyngdefeltet. Det betyder, at et ur ved foden af Rundetårn faktisk vil gå en smule langsommere end et ur placeret på toppen. Illustration: Troels Marstrand.

Lad os forestille os Marie i bunden af Rundetårn, der sender 9.192.631.770 bølgetoppe fra atomet Cs-137 (som er definitionen på et sekund) afsted mod toppen.

Da Rundetårn er stabilt, bevæger den ene del sig ikke i forhold til den anden, så alle bølgetoppene bevæger sig med samme fart fra bunden til toppen, og det afsendte antal bølgetoppe må være lig det, der bliver modtaget. Der forsvinder ikke noget undervejs. Da der er færre bølgetoppe pr. sekund i toppen af Rundetårn end i bunden, må forklaringen være, at tiden mellem hver bølgetop er længere i toppen end i bunden. Så Albert i toppen modtager også 9.192.631.770 bølgetoppe, som han ved er Maries sekund, men i løbet af et tidsrum som på hans eget ur er længere, fx to sekunder. Maries ur er altså kun gået ét sekund i den tid, hans eget er gået to, og da begge ure benytter den samme definition af ét sekund er konklusionen uundgåelig: hendes ur går langsomt.

Det ur, der ligger lavt i tyngdefeltet – svarende til det, der er på gulvet i elevatorstolen – må derfor gå langsommere end det, der ligger højt. Denne effekt har faktisk den morsomme konsekvens, at Jordens centrum er et par år yngre end overfladen!

Den hidtil mest præcise måling af tyngdens påvirkning af ures gang er ikke – som man skulle tro – foretaget over stor højdeforskel, men ved at lave en uhyre præcis måling over højdeforskelle på op til en millimeter, hvor man tager hensyn til afgørende, kvantemekaniske effekter på atomer. Faktisk er én af deltagerne i dette eksperiment den amerikanske nobelpristager og energiminister, Steven Chu, der ovenikøbet fandt tid til at skrive videnskabelige artikler, mens han var en del af regeringen i USA.

Den relativistiske stifinder

Al denne snak om tid, bevægelse og tyngde kan måske forekomme uden praktisk betydning for almindelige mennesker. Men det er ingenlunde tilfældet. De fleste mennesker i Danmark har formentlig stiftet bekendtskab med en GPS-modtager. Men det er nok de færreste, der er klar over, at systemet ikke virker, hvis man ikke tager hensyn til relativitetsteorien.

Hvis GPS skal virke, er to ting nødvendige: For det første skal fundamentet for relativitetsteorien være korrekt, nemlig at lysets hastighed er uafhængig af afsenderens hastighed. For det andet skal hver af GPS-satellitterne bære et ur med en relativ nøjagtighed svarende til højst et sekund pr. 300.000 år. Men det er forholdsvis uproblematisk at fremstille i dag.

For at kunne beregne en korrekt position må man yderligere tage hensyn til de to ovenfor nævnte, afgørende relativistiske effekter, nemlig at et ur i bevægelse går langsomt set fra et andet ur i hvile, og at et ur i et stærkt tyngdefelt går langsomt set fra et andet ur i et svagere tyngdefelt. GPS-satellitternes fart er ca. fire kilometer pr. sekund, og det svarer til, at deres ur (set fra Jorden) går *for langsomt* med omkring 1 sekund pr. 300 år. Det er mere end rigeligt til, at det kan måles. Effekten af tyngdekraften er, at satellittens ur går *for hurtigt* set fra Jordens overflade (hvor tyngdekraften er stærkere end oppe ved satellitten), en korrektion, der er større med ca. en faktor fem sammenlignet med den forårsaget af farten. De to effekter trækker altså hver sin vej, men er ikke lige store, så netto-effekten er, at satellitternes ure går for hurtigt med cirka 4 sekunder pr. 300 år, dvs. knapt en halv milliarddel.

Inden opsendelsen af GPS-satellitterne var der en del diskussion om, hvorvidt man havde så stor tillid til Einsteins teorier, at man turde indarbejde korrektionerne i systemet. Det blev dog besluttet, at satellittens ur skulle kunne nedjusteres fra at svinge 10,23 millioner gange i sekundet, til at svinge 10,22999999543 millioner gange – en korrektion på knapt en halv milliarddel af frekvensen. Det lyder jo ikke af meget, men det relevante tal, man skal bruge for at omsætte denne justering til noget, der er relevant for brugeren, er den afstand, lyset tilbagelægger pr. døgn. Da der er 24 timer i døgnnet, 60 minutter pr. time og 60 sekunder pr. minut, bevæger lyset sig med $299.792.458 \text{ m/s}$ en afstand på $24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \cdot 299792 \text{ km/s} = 25,9$ milliarder kilometer pr. døgn. Og så er knap en halv milliarddel pludselig meget: Omsat til en afstand ville sådanne fejl tilsammen løbe op i 11,6 kilometer pr. døgn, eller 8 meter pr. minut, hvilket fx ville gøre systemet ubrugeligt for taxachaufføren – for ikke at nævne militæret, eftersøgningstjenester, skibsnavigation osv.

Det var altså godt, at GPS-konstruktørerne havde tiltro til Einsteins teorier. Man kan derfor med lidt god vilje sige, at når man benytter GPS, er det med Einstein bag rattet. Og det er da en behagelig tanke.



Figur 9. Princippet i det Globale Positionerings-System (GPS). De tre satellitter giver modtagerens præcise position i deres signalers fælles skæringspunkt med Jordkloden. Illustration: Troels Marstrand.

Litteratur

- [1] Gamow, G. (1942). Mr. Tompkins i drømmeland. Gyldendals Uglebøger.
- [2] Uggerhøj, U. (2005). Tid den relative virkelighed. Aarhus Universitetsforlag.
- [3] Uggerhøj, U. (2014). Tid. I serien Tænkepauser, Aarhus Universitetsforlag.
- [4] http://www.denstordanske.dk/It_teknik_og_naturvidenskab/Fysik/Relativitetsteori_og_gravitation/relativitetsteori



Ulrik Uggerhøj er eksperimentalfysiker og beskæftiger sig med den måde, partikler med meget høj energi opfører sig på, når de gennemtrænger forskellige materialer samt intense elektriske og magnetiske felter. Han underviser bl.a. i relativitetsteori for studerende på første år på Aarhus Universitet. Foto: Lars Kruse.