

Relativitetsteori

Einsteins revolusjon: tid, rom og energi

NAT1024 – Moderne fysikk og teknologi

Patentkontoret i Bern, 1905

I 1905 jobbet en 26 år gammel teknisk ekspert av tredje klasse på patentkontoret i Bern. Han hadde ikke fått noen akademisk stilling etter universitetet, og professorer hadde ikke akkurat løpt etter ham. Men i løpet av ett eneste år – som historikere kaller annus mirabilis – publiserte Albert Einstein fire artikler som fundamentalt endret fysikken. Den ene forklarte fotoelektrisk effekt (som ga ham Nobelprisen i 1921). En annen bekreftet atomenes eksistens gjennom Brownsk bevegelse. En tredje la frem spesiell relativitetsteori. Den fjerde inneholdt trolig den mest kjente formelen i historien: $E = mc^2$.

«Den eneste grunnen til at tid eksisterer er slik at alt ikke skjer på én gang.»

— Tilskrevet Albert Einstein

Einstein hadde lekt med et tankeeksperiment siden han var 16: Hva om man kunne ri på en lysstråle? Klassisk fysikk sa at man da ville "fryse" lyset – se det som stående bølger. Men Maxwells ligninger for elektromagnetisme tillot ikke stående lysbølger. Noe måtte gi etter. Einstein valgte å la rommet og tiden gi etter – ikke lysets hastighet.

De to postulatene

Spesiell relativitetsteori hviler på to enkle, men radikale antagelser:

Postulat 1 – Relativitetsprinsippet: Naturlovene er identiske i alle inertialsystemer (systemer som ikke akselererer). Det finnes ingen absolutt hvile. En vitenskapsmann i et lukket rom uten vinduer kan ikke gjennom noe eksperiment avgjøre om han er i ro eller beveger seg med konstant hastighet.

Postulat 2 – Lysfartens konstans: Lyshastigheten i vakuum $c \approx 299\,792\,458$ m/s er identisk for alle observatører, uavhengig av om kilden eller observatøren beveger seg. Dette bryter radikalt med Galileis relativitetsprinsipp, der hastigheter adderes: en ball kastet fra et tog går raskere for en observatør på plattformen. Lys gjør ikke det.

Konsekvensen av postulat 2 er svimlende: for at lysfarten alltid skal måles til c uansett referanseramme, MÅ tid og rom være elastiske. To observatører i relativ bevegelse vil ikke bli enige om lengder, tider – eller om to hendelser skjer samtidig.

Tidsdilatasjon: bevegelse bremser tid

Dette er den mest kontraintuitive konsekvensen av teorien, men den er grundig bekreftet. En klokke i bevegelse går saktere enn en klokke i hvile. Formelen er:

$$\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

der Δt_0 er tiden målt i bevegelsens referanseramme (egenlevetid) og v er hastigheten. Jo nærmere v er c , desto mer tøyes tid.

Beviset: muoner fra kosmisk stråling

Myoner er ustabile elementærpartikler som dannes 15–20 km oppe i atmosfæren når kosmisk stråling treffer luftmolekyler. Deres gjennomsnittlige levetid er 2,2 mikrosekunder (2,2 millionedels sekund). Med lysets hastighet som øverste grense burde de tilbakelegge maksimalt $c \times 2,2 \mu s \approx 660$ m – og aldri nå jordoverflaten. Likevel detekteres de i store mengder på bakken. Årsaken er tidsdilatasjon: myonene beveger seg med 99,7 % av lysfarten, og fra jordas referanseramme lever de 30 ganger lenger enn de ville gjort i hvile. Fra myonenes referanseramme er atmosfæren 30 ganger tynnere.

Hastighet (v/c)	Tidsdilasjon	Praktisk eksempel
0,1 c (10 % av lys)	0,5 % saktere	Neglisjerbart i hverdagen
0,5 c	15 % saktere	Fremtidig romfart?
0,9 c	229 % saktere	Partikkelakseleratorer
0,9997 c	4100 % saktere	LHC-protoner på CERN
1,0 c	Uendelig – umulig	Ingenting med masse kan nå c

E = mc²: masse er frosset energi

I Einsteins fjerde annus-mirabilis-artikkel, bare tre måneder etter relativitetsteorien, dukket det opp en liten konsekvens: masse og energi er to former av det samme. Formelen $E = mc^2$ forteller oss at selv en svært liten mengde masse inneholder en enorm mengde energi.

1 gram stoff tilsvarer: $c^2 \times 0,001 \text{ kg} \approx 9 \times 10^{13}$ joule. Det tilsvarer omtrent 21 kiloton TNT – energimengden i atombomben som ble sluppet over Hiroshima i 1945. Solen omdanner 4 millioner tonn hydrogen til energi hvert sekund via fusjon. Den lille masseforskjellen mellom reaktanter og produkter blir til den strålingen som gir oss varme og lys.

«Det er merkelig at nettopp denne lille artikkelen – som kom som et tillegg nesten som en ettertanke – skulle vise seg å endre verden mer enn noen annen naturvitenskapelig innsikt.»

— Abraham Pais, "Subtle is the Lord", biografi om Einstein (1982)

Generell relativitetsteori: gravitasjon som romtidskrumning

Spesiell relativitetsteori gjelder kun for jevn bevegelse. Ti år brukte Einstein på å utvide teorien til akselerasjon og gravitasjon. Resultatet – generell relativitetsteori (1915) – er en fundamentalt ny forståelse av gravitasjon: det er ikke en kraft, men en krumning av romtiden.

Tenk deg et stramt gummiteppe. Legg en tung bowlingkule i midten: teppet bøyer seg. Ruller du en liten kule forbi, følger den den buede overflaten – ikke fordi en kraft trekker i den, men fordi geometrien er endret. Slik virker gravitasjon ifølge Einstein: massive objekter krummer romtiden, og andre objekter følger de krummede banene.

Bekreftelse: solformørkelsen av 1919

Einstein predikerte at lys fra fjerne stjerner ville bøyes av solens gravitasjonsfelt og dermed at stjerner ville se ut til å befinne seg på en litt annen posisjon når de sto nær solen på himmelen. Under en total solformørkelse – der solen er skjult og stjerneposisjonene kan måles om dagen – sendte den britiske astronomen Arthur Eddington to ekspedisjoner i 1919. Resultatet bekreftet Einsteins prediksjon. Nyheten spredte seg over hele verden og over natten ble Einstein berømt.

GPS og relativitetsteori i praksis

GPS-systemet er det vakreste beviset på at relativitetsteorien ikke er abstrakt teori – den er praktisk ingeniørvitenskap. GPS-satellitter kretser i 20 200 km høyde med en hastighet på ca. 14 000 km/t. Begge teoriene påvirker klokkene om bord:

Effekt	Årsak	Korreksjon per d
Spesiell relativitet	Bevegelse – klokker ombord går saktere	–7 mikrosekunder
Generell relativitet	Svakere gravitasjon – klokker høyt oppe går raskere	+45 mikrosekunder
Netto korreksjon		+38 mikrosekunder per dag

Uten korreksjon for begge effektene ville GPS-posisjonene drifte med rundt 10 km per dag. Relativitetsteorien er ikke bare teori – hver gang du åpner Google Maps, bekrefter du Einsteins arbeid.

■ Nøkkelsammendrag

- ✓ Einstein (1905): to postulater – relativitetsprinsippet og lysfartens konstans
- ✓ Tidsdilatasjon: klokker i bevegelse går saktere. $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$
- ✓ Bevist av muon-eksperimenter og atomur-eksperimenter (Hafele–Keating, 1971)
- ✓ $E = mc^2$: masse og energi er ekvivalente. $1 \text{ g} = \sim 9 \times 10^{13} \text{ joule}$
- ✓ Generell relativitetsteori (1915): gravitasjon = romtidskrumning
- ✓ Bekreftet av Eddington 1919 (lysbøying) og LIGO 2015 (gravitasjonsbølger)
- ✓ GPS krever korreksjon på 38 mikrosekunder per dag – ellers 10 km daglig feil

Tenk og drøft

1. Forklar med egne ord hva Einsteins andre postulat sier, og hvorfor det er radikalt sammenliknet med klassisk (Galileisk) relativitet.
2. Et rom kretser jorden med 99,5 % av lysfarten. Astronauten er borte i 10 år (sin tid). Hvor lenge har gått på jorda? (Bruk: $\Delta t = \Delta t_0 / \sqrt{1 - 0,995^2}$, regn ut)
3. Forklar myoneksperimentet som bevis for tidsdilatasjon. Beskriv situasjonen fra (a) jordas referanseramme og (b) myonets referanseramme.
4. Hva betyr $E = mc^2$ for vår forståelse av solens energi? Regn ut energien i 1 kg masse.
5. Forklar GPS-problemet: Hvilke to relativistiske effekter virker, i hvilken retning, og hva er nettoeffekten?
6. Drøft: Kan et romskip noensinne nå lyshastigheten? Hva sier spesiell relativitetsteori om energibehovet når $v \rightarrow c$?

Praktiske forsøk

Forsøk 1: Tankeeksperiment: lysur-tidsdilatasjon

Visualiser tidsdilatasjon med et tenkt "lysur" der et lysglimt spretter mellom to speil.

Utstyr:

- Papir og blyant
- Linjal
- Kalkulator

Fremgangsmåte:

1. Tegn to situasjoner: lysur i ro og lysur i horisontal bevegelse.
2. I ro: lyset reiser 1 m opp og 1 m ned. Tid = $2/c$.
3. I bevegelse: lyset reiser i en diagonalbane (Pythagoras). Total distanse > 2 m.
4. Siden lyshastigheten er konstant, MÅ tidsuret gå saktere for observatøren utenfor.
5. Beregn for $v = 0,6c$: diagonal = $\sqrt{1^2 + 0,6^2} = 1,166$ m per halvsvingning.
6. Tidsforlenging = $1/\sqrt{1 - 0,36} = 1/\sqrt{0,64} = 1/0,8 = 1,25$.
Klokkene går 25 % saktere.

Refleksjon: Hva er intuasjonen bak: Hva er det som egentlig "bremses" – er det lyset, er det tiden, eller er det en meningsløs distinksjon?