

Einsteins specielle relativitetsteori

Helge Kragh, Steno Institutet, Aarhus Universitet

På trods af den store betydning Einstein havde for den tidlige kvanteteori, er der næppe tvivl om, at det var relativitetsteorien, sådan som den først fremkom for 100 år siden, der indskrev hans navn i fysikkens historie. Denne afgørende indsats bliver ofte misforstået og i lærebøger gengivet i en tvivlsom version. Der gives her en introduktion til den specielle relativitetsteoris fremkomst, hvor der tages hensyn til den historiske kontekst i det første tiår af 1900-tallet.

Det elektromagnetiske verdensbillede

Omkring 1905 anså mange teoretiske fysikere det newtonske mekaniske verdensbillede som dødt eller døende. I stedet var de i gang med at udvikle et radikalt alternativ med et helt andet ontologisk grundlag, efter hvilket den fysiske verden bestod af elektromagnetiske felter, der kunne være koncentreret i singularitetslignende tilstande i form af elektroner (med både positiv og negativ ladning). Det var ikke længere Newtons mekaniske ligninger, der var fundamentale, men derimod Maxwells elektromagnetiske, sådan som i udvidet form var formuleret af bl.a. H.A. Lorentz. Den generation af fysikere, der omfattede folk som Lorentz, H. Poincaré, P. Langevin, H.A. Bucherer, M. Abraham, J. Larmor og G. Mie, var overbevist om, at de var på vej mod en ny fysik, hvor alting kunne formuleres i termer af elektroner og elektromagnetiske felter. I september 1904 beskrev en eksalteret Langevin, at "denne idé har i de sidste par år gennemgået en enorm udvikling, som får den gamle fysiks rammer til at smuldre og som vender den etablerede orden om idéer og love på hovedet, for at resultere i en struktur, man kan forudse vil være enkel, harmonisk og frugtbar."

Ifølge den nye elektromagnetiske enhedsfysik kunne alle fysiske fænomener forklares ud fra den elektromagnetiske æter; elektroners masse var helt af elektromagnetisk oprindelse og varierede derfor med hastigheden, sådan som først vist af O. Heaviside i 1889. Efter denne opfattelse var elektroner ikke små materielle partikler, der var påført elektrisk ladning, men var rent elektriske – uden ladning, ingen partikler. På denne måde havde Lorentz og Larmor omkring 1900 været i stand til at forklare det overraskende resultat af Michelson-Morley eksperimentet, nemlig at Jordens bevægelse gennem verdensæteren ikke var påviselig til anden orden af $\beta = v/c$, hvor v er hastigheden i forhold til den stationære æter. Resultatet skyldtes en generel kontraktion af legemers længde med faktoren $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ og var fysisk begrundet i ændringer af kræfterne mellem legemets elektroner.

Der var i 1905 intet nyt i, at også massen ændredes med hastigheden. Spørgsmålet var hvordan. Ifølge Lorentz' teori fra 1904 ville elektronen deformeres i længderetningen og dens masse være givet ved

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx m_0 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} + \frac{3\beta^4}{8} \right) \quad (1)$$

Den tyske fysiker Max Abraham opererede med en rumlig stiv model af elektronen og nåede i 1903 frem til udtrykket

$$\begin{aligned} m(v) &= \frac{3m_0}{4\beta^2} \left[\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \right) \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) - 1 \right] \\ &\approx m_0 \left(1 + \frac{2\beta^2}{5} + \frac{9\beta^4}{35} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Som bekendt var de fuldstændige transformationsformler mellem steds- og tidkoordinater – kendt som Lorentztransformationerne – givet af Lorentz og Larmor før Einstein begyndte at udvikle sin teori. Desuden var Poincaré gået et skridt videre, idet han i 1904 havde formuleret, hvad han kaldte relativitetsprincippet. Ifølge dette princip, skrev Poincaré, "må lovene for fysiske fænomener være de samme for en 'stationær' iagttager som for en iagttager, der har en jævn translationsbevægelse i forhold til ham. ... Der må være en hel ny slags dynamik, som først og fremmest vil være kendetegnet ved reglen om, at ingen hastighed kan overstige lysets."

Poincaré slog fast, at lysets hastighed er invariant og han fandt – endnu før Einsteins artikel var udkommet – den korrekte formel for additionen af hastigheder:

$$V = \frac{u + v}{1 + uv/c^2} \quad (3)$$

Desuden gjorde han opmærksom på, at om end længde- og tidsintervaller var relative til iagttagerens system, ville størrelsen

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 \quad (4)$$

være invariant. Det kunne synes, som om hele den specielle relativitetsteori var på plads, før den 26-årige Einstein udgav sin berømte artikel fra 1905. Men det var på ingen måde tilfældet.

Zur Elektrodynamik bewegter Körper

Einsteins artikel i *Annalen der Physik* havde titlen "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" (Om bevægede legemers elektrodynamik), hvilket formentlig medvirkede til, at den ikke i første omgang vakte megen

opmærksomhed. Mange læsere opfattede den – aldeles fejlagtigt – som endnu et bidrag til den elektromagnetiske teori for materie og rum. Artiklen var på mange måder usædvanlig. Ikke blot indeholdt den slet ingen referencer, den henviste heller ikke direkte til Michelson-Morley eksperimentet eller andre eksperimenter, der ellers havde en vigtig plads i det elektromagnetiske verdensbillede. Dette er værd at fremhæve, da relativitetsteorien traditionelt ses som inspireret af eller ligefrem et svar på den anomali, Michelsons række af eksperimenter udgjorde.

Kendte Einstein overhovedet til Michelsons og Morleys eksperiment? I et brev fra 1954 skrev han: "I min egen udvikling har Michelsons resultat ikke haft væsentlig indflydelse. Jeg kan ikke engang huske, om jeg overhovedet kendte til det, da jeg skrev min første artikel om emnet." Videnskabshistoriske studier har vist, at Einstein faktisk kendte til eksperimentet, da han formulerede relativitetsteorien i 1905. Alligevel er der blandt eksperter enighed om, at hans kommentar fra 1954 er korrekt: Einsteins teori stod ikke i gæld til hverken Michelsons eller andres eksperimenter, men var baseret på helt generelle overvejelser om symmetri og simpelhed i de fundamentale naturlove, især i Maxwells ligninger.

Det er ikke her muligt at gennemgå indholdet i Einsteins banebrydende artikel, der var inddelt i en kinematisk og en elektrodynamisk del. I den første, meget simple og aksiomatisk formulerede del udledte han ud fra sine to postulater (om hhv. naturlovenes invarians og lysets absolutte hastighed) de kendte Lorentztransformationer, men han fortolkede dem helt anderledes end Lorentz og de andre elektronteoretikere. Forskellen viser sig bl.a. i, at Einsteins teori var helt generel og ikke kun gyldig for elektriske partikler. I overensstemmelse hermed havde han ingen brug for æteren, som han kort og kontant afviste. På det metodologiske plan var Einsteins teori kompakt og deduktiv, mens Lorentz' var omstændelig og byggede på en række antagelser af ad hoc karakter.

Styrken ved den einsteinske tilgang viste sig klart i den enkle udledning af Lorentz' kraftlov ($\mathbf{F} = ev \times \mathbf{B}$), der hos Einstein fremkom som en konsekvens af de elektromagnetiske transformationsformler, mens den hos Lorentz var en uafhængigt postuleret lov, en slags femte Maxwell-ligning. I slutningen af sin artikel forudsagde Einstein, at den kinetiske energi af elektroner (og andre massedele) vil variere med hastigheden som

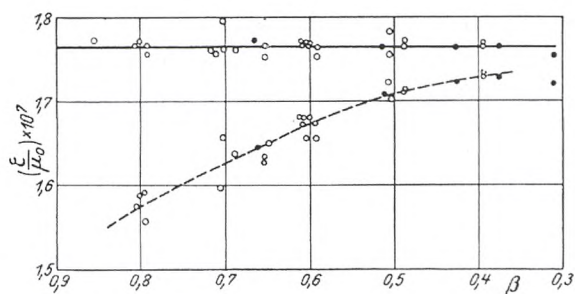
$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \quad (5)$$

Herfra og til den berømte formel $E = mc^2$ er skridtet kort. Formlen optræder ikke eksplicit i 1905-artiklen, men dog implicit: "Massen af et legeme er et mål for dets energiindhold; hvis energien ændres med L , ændres massen på samme måde med $L/(9 \cdot 10^{20})$, hvor energien måles i erg og massen i gram."

Einstein, Lorentz eller Abraham?

Den første test af relativitetsteorien var samtidig en test af forskellige ærterteorier for elektronens struktur, hvor det især var Lorentz' og Abrahams modeller, der konfronterede hinanden. Metoden var at afbøje hurtige elektroner fra betakilder i elektriske og magnetiske felter, hvorved det var muligt at finde variationen i elektronmassen med hastigheden. Der var ikke tale om at teste den newtonske fysiks $m = \text{konstant}$. Eksperimenter af den nævnte type blev udviklet af især den tyske fysiker Walter Kaufmann, der i 1906 kunne konkludere, at mens Abrahams teori stemte med de eksperimentelle resultater, var det ikke tilfældet med Lorentz' teori. Da sidstnævnte førte til samme variation som Einsteins relativitetsteori, var også denne falsificeret – efter mindre end et års levetid.

Lorentz accepterede nølende Kaufmanns dom, men Einstein havde et mere afslappet forhold til det tilsyneladende klare eksperimentelle resultat. Han var af teoretiske grunde overbevist om, at Abrahams teori var forkert og at hans egen var rigtig. Han argumenterede derfor, at Kaufmanns eksperiment ikke var overbevisende og at der måtte være fejlkilder til stede, som ikke var erkendt. Hvis relativitetsteorien stred mod eksperimentet, måtte eksperimentet være forkert!



Figur 1. Eksperimentelle værdier for forholdet mellem betaelektroners elektriske ladning og hvilemasse, som udregnet på basis af Abrahams udtryk (den stiplede kurve) og Lorentz-Einsteins udtryk (fuldt optrukket). Målepunkterne henviser til Bucherers eksperimenter fra 1908 (●) og eksperimenter fra 1914-16 lavet af C. Schaefer og G. Neumann (○). Ifølge begge teorier skal e/m_0 være konstant, således at måledata klart viser, at Abrahams udtryk er forkert. Fra *Handbuch der Physik*, bind. 22/1, Springer 1933.

Einsteins intuition viste sig berettiget. I nye og bedre eksperimenter fra 1908 viste en anden tysk fysiker, Adolf Bucherer, at elektronmassens målte variation var i klart bedre overensstemmelse med Lorentz-Einstein udtrykket end med Abrahams udtryk. Konklusionen, der altså var modsat Kaufmanns, blev almindeligt accepteret og endnu mere præcise eksperimenter gav den yderligere autoritet (figur 1). Endnu omkring 1915 var spørgsmålet dog ikke ganske afklaret. Blandt de nye eksperimenter, der gav støtte til det relativistiske udtryk, var spektroskopiske målinger af den finstruktur, Arnold Sommerfeld i 1916 havde forklaret som en relativistisk effekt. Anno 1920 var der ingen reel tvivl om, at relativitetsteorien gav en korrekt beskrivelse af elek-

troners massevariation. Det er dog værd at påpege, at sådanne eksperimenter ikke er i stand til at skelne mellem Lorentz' æterbaserede elektronteori og Einsteins relativitetsteori, da de to teorier jo fører til eksakt samme udtryk for $m(v)$.

Relativitetsteorien ikke revolutionær

Da Einsteins teori blev almindelig kendt og anerkendt, blev den ofte beskrevet som en revolution i fysikken, et radikalt brud med Newtons klassiske fysik. Den revolutionsretorik, der i offentligheden knyttede sig til teorien, er ironisk af to grunde. For det første blev teorien af ledende fysikere ikke oprindeligt anset for at være revolutionær, men nærmere som et konservativt, ja næsten reaktionært forsøg på at holde liv i dele af det gamle verdensbillede. Den virkelig revolutionære teori var den elektromagnetiske æterteori – mente man. For det andet benægtede Einstein selv, at teorien var af særlig revolutionær art, hvilket han fastholdt livet igennem.

I et brev til sin ven Conrad Habicht fra maj 1905 fortalte Einstein om sine to nye, endnu upublicerede artikler i Annalen. Den ene teori betegnede han som "meget revolutionær", men det var teorien om fotoner, han gav denne betegnelse, ikke relativitetsteorien. På mange måder var Einsteins videnskabsopfattelse konservativ og evolutionær, og han opfattede på ingen måde relativitetsteorien – hverken den specielle eller generelle – som et drastisk brud med den gamle fysik. Nej, den var en naturlig videreudvikling af begreber, der stammede fra den klassiske fysik. I 1921 beskrev han relativitetsteorien som "en slags afpudsning af Maxwells og Lorentz' mægtige intellektuelle bygning ... ikke en revolutionær foreteelse, men en naturlig fortsættelse af en udvikling, der kan spores gennem århundreder." Newton sagde engang, at når han havde skuet videre end andre, var det fordi, han havde stået på skuldrene af giganter. Med en lidt anden sprogbrug sagde Einstein det samme. Og det var ikke koketteri. Han mente det.

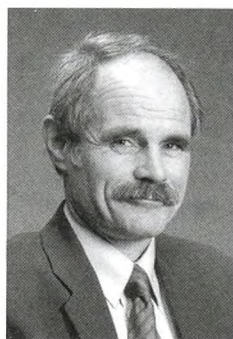
Omkring 1910 var relativitetsteorien anerkendt blandt eliten af teoretiske fysikere, men endnu dårlig kendt af flertallet og næsten helt ukendt uden for fysikermiljøet. Modtagelsen i Danmark adskilte sig ikke væsentligt fra hvordan den blev modtaget i andre små lande. Teorien blev herhjemme først introduceret af H.M. Hansen, den senere fysikprofessor og universitetsrektor, der i 1912 redegjorde for den i en artikel i Fysisk Tidsskrift med titlen "Relativitetsprincippet". I 1915-udgaven af Christian Christiansens Lærebog i Fysik, omarbejdet af Martin Knudsen, blev der lige plads til at nævne, at problemer med æterhypotesen kunne undgås "ved med Einstein at antage, at der ingen Æter findes." Relativitetsteorien optrådte iøvrigt ikke i bogen.

Endelig var den unge Niels Bohr, ikke overraskende, bekendt med Einsteins teori på et tidligt tidspunkt, om end jeg ikke ved hvor tidligt. Den optræder ikke i hans banebrydende trilogi "On the constitution of atoms

and molecules" fra 1913, selv om Bohr her anvendte Lorentz-Einsteins masseformel. I 1914 indførte Bohr en relativistisk massekorrektion i sin formel for Balmers lov, men stadig uden at referere til Einstein og uden at nævne relativitetsteorien ved navn. Einstein optræder hyppigt i Bohrs artikler og korrespondance 1912-16, men det var tydeligvis Einsteins bidrag til kvanteteorien og fotoelektrisk effekt, der interesserede Bohr, ikke hans relativitetsteori.

Litteratur

- [1] A. Einstein et al. (1968), The Principle of Relativity, Dover.
- [2] A. Einstein (1982), Ideas and Opinions, Crown Publishers.
- [3] A.I. Miller (1981), Albert Einstein's Special Theory of Relativity 1905-1911, Addison-Wesley.
- [4] H. Kragh (1999), Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century, Princeton University Press.
- [5] G. Holton (1988), Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein, Harvard University Press.



Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Steno Institutet, Århus Universitet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie, herunder de teorier, der har deres baggrund i Einsteins forskning.

Tegn abonnement på KVANT

KVANT – Tidsskrift for Fysik og Astronomi er medlemsblad for foreningerne *Astronomisk Selskab*, *Dansk Fysisk Selskab*, *Dansk Geofysisk Forening* og *Selskabet for Naturlærens Udbredelse*. Man får således 4 numre af KVANT ved at melde sig ind i én af foreningerne.

Studerende kan blive medlemmer af SNU, www.naturvidenskab.net, for **kun 75 kr.** og derved få abonnement på KVANT.

Er man medlem af *Ungdommens Naturvidenskabelige Forening*, www.unf.dk, koster det også kun **75 kr.** at abonnere – husk blot at oplyse medlemsnummer!

Man kan også abonnere på bladet uden at være medlem af en forening – det koster **160 kr.** om året for abonnenter i Danmark og kan gøres på:

www.kvant.dk/abonnement.html

Det er lidt dyrere for abonnenter udenfor Danmark.