

I forhold til hvad roterer Jorden?

Jens Martin Knudsen, Center for Planetforskning, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, og Poul G. Hjorth, Matematisk Institut, Danmarks Tekniske Universitet.

I dag tager vi det for givet, at den daglige bevægelse af Solen og stjernerne henover himlen er forårsaget, ikke af en rotation af himmelkuglen, men af en rotation af Jorden. Denne indsigt fører imidlertid til spørgsmål som: Giver det fysisk mening at sige, at Jorden roterer i forhold til "det absolutte rum"? Eller: Skal Jordens rotation alene refereres til universets fjerne masser, "fix-stjernerne"? Svarene på sådanne spørgsmål er langt fra simple.

Problemet om Jordens rotation, eller mere alment, problemet om relativ eller absolut bevægelse, er tæt knyttet til det fundamentale spørgsmål: Hvad er et inertialsystem? Dette er måske det vigtigste spørgsmål overhovedet i videnskaben om bevægelsens natur. Alt for ofte præsenteres studerende i de indledende kurser for følgende definitioner: Inertiens lov gælder kun i inertialsystemer. Inertialsystemer er de systemer, hvor inertiens lov gælder. Vi skylder de studerende et bedre svar, også selv om svaret ikke er simpelt.

Før sådanne spørgsmål er afklarede, er en forståelse af den Newtonske mekanik en umulighed. Spørgsmålet om relativ eller absolut bevægelse må derfor nødvendigvis have en central plads i ethvert universitetskursus i mekanisk fysik, også – og måske netop særligt – i det indledende kursus.

Mekanikkens Relativitetsprincip

Problemerne vedrørende rotation går tilbage til publikationen af Newton's bevægelseslove (1687). Så snart disse love er fremsat – specielt Newton's 2. lov – står man overfor spørgsmålet: *I forhold til hvilket henførelsessystem skal man måle accelerationen af et givet legeme?* Uden et klart svar på dette enkle spørgsmål har Newton's 2. lov intet indhold.

Det er vigtigt at gøre sig klart, at mekanikkens relativitetsprincip er indbygget i Newton's bevægelseslove. Newton's love indeholder ingen henvisning til begrebet absolut hvile. Jævn bevægelse langs en ret linie og begrebet hvile er fuldstændigt sidestillede. Matematik: Newton's 2. lov er invariant under en Galilei transformation.

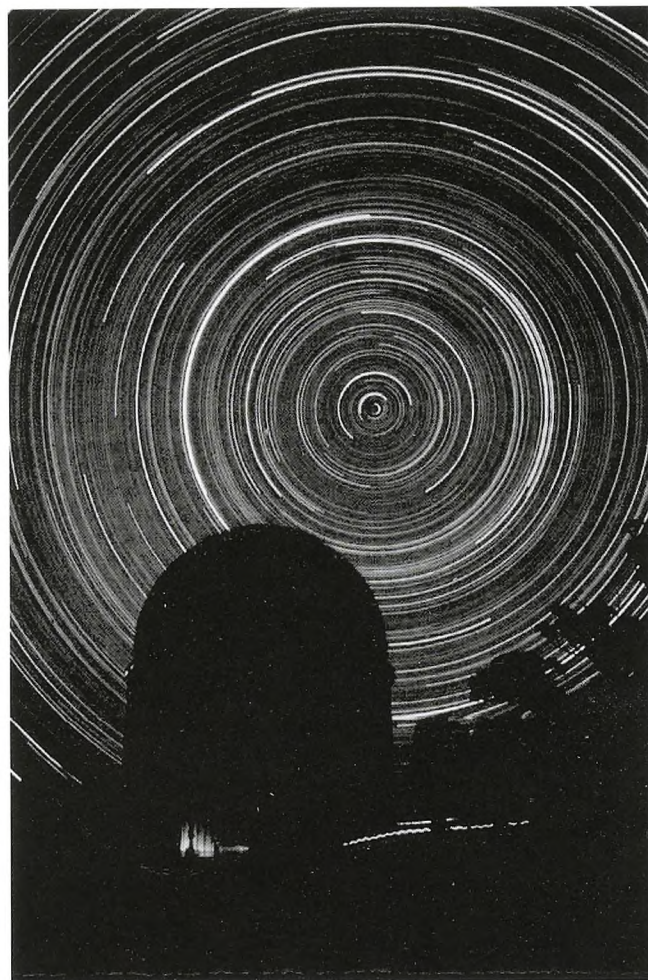
Man kan spille tennis om bord på et sejlende skib. Så længe skibet bevæger sig med konstant fart langs en ret linie, følger bolden de samme regler som på land. Omvendt: Man kan ikke drage nogen form for konklusioner om skibets (jævne) bevægelse ved at studere boldens bevægelse i forhold til skibet.

Bevægelse med konstant hastighed er relativ, d.v.s. jævn bevægelse kan kun konstateres ved at sammenligne det givne legeme (skibet) med et andet

materielt legeme (kysten). Allerede Galileo Galilei (1564–1642) havde hæftet sig ved dette for dynamiske fænomener så fundamentale princip.

Mekanikkens relativitetsprincip bevirker således, at vi må forlade den ide, at et legeme "har en given hastighed gennem rummet". Det tomme rum har intet orienteringspunkt, i forhold til hvilket en jævn hastighed kan tilskrives nogen absolut værdi.

Når man undersøger bevægelser, der *ikke* er jævne, stiller sagen sig imidlertid helt anderledes.



Begreberne kraft og inert

Newton indførte begreberne *kraft* og *inerti* i bevægelseslæren. Begreberne har været meget diskuteret, siden de blev indført. Her nøjes vi med følgende bemærkninger.

Et væsentligt træk ved begrebet kraft er følgende:

En kraft, der virker på et givet legeme A, har sin oprindelse i et andet materielt legeme B. Kraften på legemet A forårsages af det materielle legeme B. Newton's 2. lov kan således ikke – som det undertiden har været hævdet – betragtes som en definition af kraft. Kraften skal være givet ved et af Newton's 2. lov uafhængigt udtryk. Velkendte eksempler er gravitation-sloven og Lorentzkraften. Angående inertie: Materielle legemer besidder inertiell masse. Den inertielle masse viser sig ved, at legemet gør modstand mod at ændre sin bevægelsestilstand, i.e. legemet gør modstand mod at blive accelereret. Men: Accelereret i forhold til hvad? Newton gav et klart svar.

Det absolutte rum

Medens jævn, retlinet bevægelse er relativ, drog Newton den konklusion, at ikke-jævn bevægelse er absolut, d.v.s. at en *ikke-jævn bevægelse kan konstateres uden at sammenligne det pågældende legeme med andre materielle legemer*.

Newton indførte i sin beskrivelse af bevægelsen begrebet "absolut rum" med de berømte ord fra "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica":

Absolute Space, in its own nature, without relation to anything external, remains always similar and immovable. Relative Space is some movable dimension or measure of the absolute spaces; which our senses determine, by its position to bodies; and which is vulgarly taken for immovable space... [Andrew Motte's oversættelse fra Latin (1729)].

Især ordene "without relation to anything external" har været stærkt kritiseret: Det absolutte rum kontrollerer åbenbart de mekaniske fænomener, medens rummet omvendt ikke influeres af disse fænomener. Løst sagt: Det absolutte rum virker, men kan ikke påvirkes! Newton havde imidlertid sine grunde til at indføre "det absolutte rum".

Så snart bevægelseslovene var opstillet, stod Newton nemlig overfor det afgørende problem at finde et henførelsessystem, i hvilket inertiens lov (første lov) og 2. lov skulle gælde. Hvis Newton eksempelvis havde valgt Solen som reference, var problemet måske blot blevet udsat. Muligvis ville man en dag finde, at også Solen bevægede sig.

Newton nåede frem til den opfattelse, at et henførelsessystem bestemt af materielle legemer aldrig kunne danne grundlaget for så fundamentale fysiske love som bevægelseslovene. Newton valgte i stedet at postulere et "absolut rum", som den "scene", hvorpå alle mekaniske fænomener udspilles.

Men allerede mekanikkens relativitetsprincip skaber problemer for begrebet det absolutte rum. Hvis een iagttager hævder, at en partikel er i hvile i forhold til det absolutte rum, vil en anden iagttager med lige så

stor ret kunne hævde, at partiklen bevæger sig med jævn hastighed i forhold til det absolutte rum. Ingen mekaniske eksperimenter kan – ifølge mekanikkens relativitetsprincip – afgøre spørgsmålet.

Der findes heller ingen fysiske eksperimenter, ved hvilke man kan bestemme et punkt i det absolutte rum, og senere genfinde dette punkt.

På den baggrund kan man spørge: Hvad bliver der tilbage af Newton's absolutte rum? Newton's svar er: Den modstand alle materielle legemer yder mod at blive accelereret, må interpreteres som en virkning af det absolutte rum. En ændring af et materielt legemes *hastighed* i forhold til det absolutte rum kræver en kraft. Vi kan således, siger Newton, uden at referere til andre legemer, registrere virkningen af det absolutte rum gennem den modstand et materielt legeme gør mod acceleration.

Som støtte for sin opfattelse af accelerationens absolutte natur fremførte Newton bl.a. det berømte eksperiment med den roterende spand. Selvom dette eksperiment er beskrevet så mange gange før, tillader vi os kort at gengive visse aspekter af sagen.

En spand indeholdende vand er ophængt i et reb. Rebet bliver nu snoet og derefter frigøres spanden. Spanden begynder da at rotere. Til at begynde med er vandets overflade vandret. Efterhånden overføres spandens bevægelse – via gnidningskræfter – til vandet. Såvel spanden som vandet roterer nu, ifølge Newton, i forhold til det absolutte rum. I det henførelsessystem, hvor vandet er i hvile, optræder der, ifølge Newton, to kræfter: Gravitationskraften fra Jorden, og den fiktive kraft, centrifugalkraften. Balancen mellem tyngdekraft og centrifugalkraft medfører at vandoverfladen antager en konkav form (paraboloide). Hvis man herefter standser spandens rotation, vil vandet fortsat rotere et stykke tid. Og mens vandet roterer er overfladen stadig konkav. En iagttager kan således konstatere om vandet roterer i forhold til det absolutte rum ved simpelthen at undersøge vandoverfladens form. Uden at sammenligne vandet med andre materielle legemer, kan man altså konstatere, at vandet roterer i forhold til det absolutte rum.

Bemærk: Den fiktive kraft, centrifugalkraften, der optræder i vandets hvilesystem, kan ikke på indlysende måde føres tilbage til noget materielt legeme. Den fiktive kraft optræder – stadig ifølge Newton – fordi henførelsessystemet er i rotation i forhold til det absolutte rum.

Man kan let overbevise sig om, at overfladens form ikke kan skyldes den relative bevægelse af spand og vand: I den første del af eksperimentet er spand og vand i relativ bevægelse, og vandoverfladen er plan. I den sidste del af eksperimentet er spand og vand ligeledes i relativ bevægelse, og vandoverfladen er konkav.

Vandoverfladens form synes således at skyldes vandets absolutte bevægelse, i.e., dets bevægelse i forhold til det absolutte rum. I den newtonske opfattelse er vandoverfladen plan, når vandet er i hvile i forhold til det

absolutte rum.

Det er imidlertid vigtigt at bemærke, at man altid finder at vandoverfladen er plan, når vandet synes at være i hvile i forhold til fixstjernerne (universets fjerne masser). Det absolutte rum forekommer altså – ejendommeligt nok – at være sammenfaldende med det henførelsessystem, i hvilket de fjerne stjerner synes at være i hvile.

Mach's princip

På trods af den Newtonske mekaniks enorme succes blev problemet om det absolutte rum, og det hertil hørende problem om absolut rotation, ved at trænge sig på.

Ernst Mach (1838-1916) foreslog en løsning.

En mand er – på en mørk, skyfri aften – i hvile på en stor vandret skive, der kan rotere (en karrusel). Hvis skiven sættes i rotation, vil manden – i skivens hvilesystem – mærke centrifugalkraften. Manden vil kunne konstatere følgende: Hvis de fjerne stjerner roterer i forhold til ham, føler han en centrifugalkraft. Når stjernerne standser, forsvinder centrifugalkraften.

En iagttager, som er i hvile i forhold til den roterende spand, vil også finde fiktive kræfter, der virker når spanden roterer. Denne iagttager vil kunne konstatere, at han observerer en centrifugalkraft, når han ser stjernerne rotere i forhold til vandet.

Når stjernerne standser, standser centrifugalkraften.

Mach konkluderede: Stjernerne er årsag til centrifugalkraften.

Årsagen til centrifugalkræfterne – og mere alment til hele inertibegrebet – skal altså søges, ikke i en virkning af noget "absolut rum", men i en virkning af de materielle legemer (stjernerne) i hele kosmos. De fiktive kræfters oprindelse er således ført tilbage til andre materielle legemer! Ifølge Mach: Hvis materien i Universet (stjerner, galakser) forsvandt, ville genstandene, der omgiver os, tabe deres inertie.

Den ide, at de fiktive kræfter (og materielle legemers inertie) på én eller anden måde skyldes vekselvirkning med Universets fjerne masser kaldes jern Mach's princip.

Ifølge Mach har vi altså ikke nogen absolut rotation. Når vi taler om rotation, siger Mach, mener vi rotation i forhold til de fjerne masser. Jorden roterer – ikke i forhold til det absolutte rum – men i forhold til de fjerne stjerner. Én eller anden indflydelse fra stjernerne skaber centrifugalkraften.

Al bevægelse (ikke blot jævn bevægelse) er – ifølge denne opfattelse – relativ.

Newton's og Mach's divergerende opfattelser af den dynamiske årsag til Jordens form, kan formuleres i følgende konstateringer:

- Newton: Jorden har form af en rotationselipsoide, fordi planeten roterer i forhold til det absolutte rum.

- Mach: Jorden har form af en rotationselipsoide, fordi planeten roterer i forhold til universets fjerne masser.

Af indlysende grunde kan man ikke ved direkte eksperimenter afgøre sagen! Og derfor er problemet ikke løst med sikkerhed.

Newton var overbevist om, at rotation er en absolut bevægelse. Uden at sammenligne Jorden med andre materielle legemer kan man – ifølge Newton – konstatere at Jorden roterer. Opskriften er enkel: Mål afstanden fra pol til ækvator. Mål derefter Jordens omkreds ved ækvator og divider denne omkreds med tallet 4. Ved at udnytte de to måleresultater vil man kunne konstatere, at afstanden fra Jordcentret til Nordpolen er mindre end afstanden fra Jordcentret til et punkt på ækvator. Ud fra dette resultat vil Newton slutte, at Jorden roterer i forhold til det absolutte rum. I det henførelsessystem, hvor Jorden er i hvile, har centrifugalkraften – den fiktive kraft – drevet Jordens masser bort fra omdrejningsaksen. Herved har Jorden fået sin fladtrykte form. Hvis det var stjernerne, der roterede i forhold til det absolutte rum, og Jorden var i hvile i rummet, ville Jorden – ifølge Newton – forblive kugleformet.

Ifølge Mach derimod, ville Jorden antage form af en ellipsoide i begge tilfælde, thi ifølge den Mach'ske opfattelse, er det kun den relative bevægelse af stjernerne og Jorden, der er af en betydning for Jordens form. Stjernerne er årsag til centrifugalkraften.

Det afgørende problem for tilhængere af Mach's princip er at afklare, hvorledes et accelereret legeme influeres af materielle legemer mange lysår borte. For eksempel: Den centrifugalkraft, der optræder i henførelsessystemer, der roterer i forhold til stjernerne, skal på én eller anden måde henføres til "det træk, som de fjerne galakser åbenbart udøver på legemet". Kun én kendt naturkraft er i stand til at gøre dette: Gravitation. Det ville føre for vidt at uddybe denne problemstilling.

Vi nøjes med følgende betragtninger:

Einstein var påvirket af Mach's ideer og håbede at disse ville blive afklaret i den generelle relativitetsteori. Denne teori kom imidlertid i sin færdige form til at indeholde aspekter fra både Newton's og Mach's opfattelser. Det er, i den generelle relativitetsteori, i allerhøjeste grad det omgivende rum (mere præcist: rum-tid) der, ud fra sin geometri, bestemmer mekaniske fænomener. I den forstand bevares aspekter af Newton's absolutte rum. På den anden side, optræder der i den generelle relativitetsteori inertielle effekter, som falder mere i tråd med Mach's ideer end med Newton's. For eksempel vil en stor masse i rotation dreje gyroskoper i sin nærhed, og således gennem sin rotation påvirke den lokale definition af et inertialsystem. Der planlægges for tiden eksperimenter for at måle denne effekt ("dragging of inertial frames"). Se f.eks. beskrivelsen i reference 2.

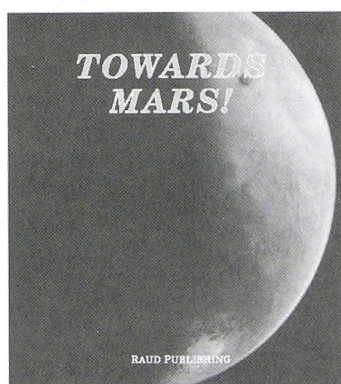
Konklusion

I indledende kurser i mekanisk fysik anvender vi nødvendigvis visse simplifikationer, og ofte sætter vi lid til intuitionen. Eksempelvis beskriver vi rotationen af Jorden ved hjælp af "rotationsvektoren" ω , endskønt vi erkender, at de tre komponenter af ω ikke udgør en vektor, men er komponenter i en antisymmetrisk tensor. Men den intuitive opfattelse af ω som en sædvanlig vektor er af stor praktisk værdi. Vi kunne nævne andre eksempler.

Derimod mener vi – som nævnt i indledningen – at den, til tider benyttede, "intuitive" beskrivelse af begrebet inertialsystem kun fører til forvirring, og i hvert fald slet ikke til nogen solid forståelse af den Newton'ske mekanik. Man bør, straks fra starten, stille det klare og enkle spørgsmål:

I forhold til hvilket henførelsessystem skal man måle accelerationer?

En dybere analyse af problemstillingen end her er givet – og en analyse der er fuldt tilgængelig for første semester studerende – kan man finde i bogen "Elements of Newtonian Mechanics". Se reference 3.



TOWARDS MARS! -book

A up-to-date information package about the study and the facts of planet Mars, created by 35 top Mars researchers from the USA, Japan and Europe. World-leading experts on Mars – most of authors are members of the *International Mars Exploration Working Group* – present in this unique work the strategy up to year 2011. The book contains illustrations from the USA, Russia, Kazakhstan, Japan, Europe and China.

European *Mars Express* mission with *Beagle II* are well documented in the book.

The *Journal of the British Astronomical Association*, June 2003: "... *Towards Mars!* is intended for a general readership, but BAA members and amateur astronomers generally will find plenty of depth too, especially those interested in instrumentation or exploration. The book is visually very striking. It has distinct flavour of its own ..."

Make your order by E-mail today or ask your bookseller.

RAUD PUBLISHING

Albertinkatu 17, FIN-00120 Helsinki, Finland

Phone & fax +358 - 9 - 2609 685

E-mail: raud@raudpublishing.com

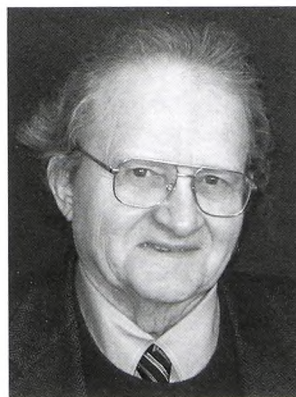
www.raudpublishing.com

Det er blevet sagt at bogen indeholder "udflugter i fysikkens historie". Nuvel! Men det er "udflugter" til Newton's Galilei's, Mach's og Einstein's ideer og tanker, om det stadig ikke klarlagte problem i den mekaniske fysik:

*Er accelereret bevægelse
absolut eller relativ?*

Referencer:

- [1] Julian B. Barbour: (1989) "Absolute or Relative Motion?" (Vol. I), *Cambridge University Press*.
- [2] Julian Schwinger (1986) "Einstein's Legacy", *Scientific American Books*.
- [3] J. M. Knudsen og P. G. Hjorth (1996) "Elements of Newtonian Mechanics" (2. ed.), *Springer Verlag*



Jens Martin Knudsen er lektor ved Center for Planetforskning og adjungeret professor i planetfysik ved Aarhus Universitet.



Poul G. Hjorth er lektor ved Matematisk Institut, Danmarks Tekniske Universitet.