

Hvad er fysik? – De centrale aspekter af Aristoteles', Galileis, Newtons og Einsteins respektive teorier

Af Peter Widell

1. Indledning

Et vigtigt paradigmeskift i den vestlige tænknings historie finder sted med etableringen af logik og geometri som systematiske discipliner. Paradigmeskiftet ser dagens lys i det klassiske Grækenland omkring år 400 f.Kr. Og omkring år 325 f.Kr. lykkes det Euklid i sit værk *Elementer* (Euklid 1912 (325 f.Kr.)) at redegøre for geometriens aksiomatiske grundlag (de geometriske beviser). Men allerede ca. 50 år før har Aristoteles held med at belyse lovene for selve den abstrakte tanke. Det finder sted i Aristoteles' logiske værker, senere af peripatetikerne samlet under betegnelsen *Organon* (jf. Aristotle 1995). *Organon* betyder på græsk hjælpemiddel eller instrument, og titlen sigter naturligvis til det hjælpemiddel eller instrument, mennesket benytter sig af, når det i almindelighed tænker.

Mens grundlægningen af henholdsvis logikken og geometrien er enestående bedrifter, der stort set står uantastet den dag i dag, finder der i oldtiden ingen tilsvarende udvikling sted inden for naturvidenskaberne. Paradigmet for den naturvidenskabelige tænkning og teoridannelse i oldtiden skal som for logikkens vedkommende igen findes hos Aristoteles. Men selv om den aristoteliske fysik og

kosmologi får en forholdsvis lang levetid – den overlever hele middelalderen – må det konstateres, at der ikke er meget tilbage af den i dag.

Det afgørende opgør med den aristoteliske fysik og kosmologi indledes i 1600-tallet. I 1620 skriver Francis Bacon (1561-1626) sin hovedværk *Novum Organum* (Bacon 2007 (1620)). Med allusion til Aristoteles' *Organum* signalerer Bacon her, at præmisserne for et nyt paradigme – denne gang ikke for logikken, men for naturvidenskaberne – er ved at være på plads. Det er dog først med italieneren Galileo Galilei (1564-1642), at det afgørende stød mod den aristoteliske fysik sættes ind. I 1632 udgiver Galilei sit alderdomsværk *Dialog om de to grundliggende verdenssystemer* (*Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*) (Galilei 2005 (1632)). Her gør han i dialogform endeligt op med de forestillinger og begreber, Aristoteles bygger sine fysiske og kosmologiske ræsonnementer på. Galilei havde dog allerede indledt sit angreb på Aristoteles i 1590'erne.

Med Galileis værk fra 1632 er et nyt vigtigt paradigme i den vestlige tænkning historie etableret. Paradigmet har vist sig at være af kolossal betydning for udviklingen, ikke blot af fysikken som videnskab, men af hele det tekniske grundlag under den moderne civilisation. De 50 år, der følger efter udgivelsen af Galileis værk, er her skelsættende. Kronen på værket sættes af englænderen Isaac Newton (1642-1727). I 1687 udkommer hans *Principia Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Newton 1999). Man kan sige, at dette værk fra Newtons hånd markerer det endegyldige brud med den aristoteliske tænkning inden for fysikken og kosmologien.

Som for den aristoteliske logiks vedkommende har den newtonske mekanik kun undergået mindre ændringer frem til i dag. Ganske vist indebærer de teorier, Einstein (1879-1955) fremsætter – den specielle relativitetsteori fra 1905 og den almene relativitetsteori fra 1915 – en kraftig revision af den newtonske mekanik. Men Einsteins teorier får først afgørende betydning, når vi har med ekstremtilfælde i den fysiske virkelighed at gøre. Desuden kan de snarere blot ses som en komplettering af den newtonske mekanik, end en egentlig tilbagevisning og udskiftning af den. Derfor er det

einsteinske opgør med Newtons mekanik trods alt af mindre rækkevidde end Galileis opgør med den aristoteliske fysik. Ikke desto mindre regnes Einsteins relativitetsteorier med rette for at være en lige så stor bedrift som Galileis opgør med den aristoteliske fysik.

2. Tre paradigmer

Svarende til den historie, fysikken har gennemgået, og som kort er skitseret ovenfor, taler man i dag om fysikkens tre store paradigmer, nemlig henholdsvis det aristoteliske, det galilei-newtonske og det einsteinske paradigme. I det følgende skal vi se lidt på de tre paradigmer og på, hvad det er for problemer, de to første paradigmer løber ind i, og hvordan det endelig lykkes for Einstein at anvise en vej ud af disse problemer ved hjælp af sine to relativitetsteorier.

Uden helt at overse detaljerne i paradigmerne vil vi hovedsagelig forsøge at tegne et rids af *de grundlæggende tankemønstre* i de tre paradigmer.

Det, vi forstår ved fysik, indledes i det klassiske Grækenland med forsøget på at forklare, hvad bevægelse er, og hvad den skyldes. Det kan synes mærkeligt, at det, at ting bevæger sig, kan være et problem. Ikke desto mindre synes det at sætte den mest betydningsfulde kæde af spørgsmål, eksperimenter og teoridannelser i gang inden for fysikken.

Det er en banal hverdagserfaring, at man kan få en ting, fx en sten eller en bold, til at bevæge sig ved at kaste den op i luften. Men som man også let kan konstatere, er der mulighed for at *ting kan bevæge sig af sig selv*. Holder man armen ud for sig og slipper stenen eller bolden, falder den *af sig selv* til jorden. Men hvorfor gør den egentlig det? Hvad består dens bevægelse her i? Og hvad er det egentlig, der er i stand til at forårsage den?

Det er, hvor banalt det end i udgangspunktet kan lyde, faktisk det store

spørgsmål, man begynder at stille sig inden for den antikke tænkning, blandt andet også hos Aristoteles.

På trods spørgsmålets umiddelbare simpelhed, findes det endegyldige svar på dette spørgsmål først i og med Einsteins almene relativitetsteori.

3. Aristoteles

Ifølge *Aristoteles* (jf. Aristoteles 1954 (350 f.Kr.), p. 68-73) skyldes en tings bevægelse først og fremmest det forhold, at der er noget i tingen selv, der får den til at bevæge sig. Hver ting må ifølge Aristoteles have et formål, et telos, med at bevæge sig. Tingen kan ganske vist forhindres i at bevæge sig gennem ydre påvirkning. Man kan standse eller ændre dens bevægelse. Men i det omfang, den ikke er påvirket af ydre kræfter, er det Aristoteles' overbevisning, at det er tingen selv, der bevæger sig, dvs. at den i sig har en særlig kraft alt efter sin art, som gør, at den begynder at bevæge sig. Det er en erfaring, vi alle umiddelbart kan gøre: Det, at en sten falder, når vi slipper den, er noget, vi alle umiddelbart kan konstatere. Så falder stenen netop til jorden "af sig selv", som vi siger.

Nu er Aristoteles ikke kun interesseret i, om tingene bevæger sig, men også i, *hvor hurtigt* de bevæger sig? Her mener han at kunne konstatere, at en tings hastighed, når vi giver slip på den, synes at være afhængig af to afgørende ting, nemlig dels vægten af den pågældende ting og dels karakteren af det medium (luft, vand, olie osv.), den bevæger sig igennem. Faktisk forsøger Aristoteles at opstille et helt præcist mål for denne afhængighed, hvor han mener at kunne nå frem til, at hastigheden af en ting altid synes at være *ligefrem proportional med vægten og omvendt proportional med mediets tæthed*: En ting, der er dobbelt så tung som en given ting, vil bevæge sig dobbelt så hurtigt som denne givne ting, og jo tættere mediet er, den bevæger sig gennem, jo langsommere vil tingen bevæge sig. Fx vil en ting bevæge sig langsommere gennem olie end vand, og

langsommere gennem vand end luft. Helt massive ting vil være uigennemtrængelige for hinanden.

I den forbindelse mener Aristoteles i sin redegørelse for bevægelsen at kunne skelne mellem *simple ting* og *sammensatte ting*. Er en ting simpel, kan den ifølge Aristoteles enten bestå af ren jord, ren vand, ren luft, ren ild eller – som det letteste – ren æter. Men det, at der eksisterer disse forskellige simple ting, betyder også ifølge Aristoteles, at der tilsvarende eksisterer forskellige bevægelsesmønstre i universet, ét for hver ting, hvor hvert bevægelsesmønster vil være bestemt af den enkelte simple tings *naturlige sted* i universet. Det er ifølge Aristoteles *tingenes naturlige sted, der giver tingene bevægelse deres retning og hastighed*. Det er der ifølge Aristoteles intet mærkeligt i, for det kan vi jo alle sammen umiddelbart konstatere: Mens en sten synker til bunds i vand og falder til jorden gennem luft, flyver ild til vejrs osv.

Hvad universet i sin helhed angår, mener Aristoteles, at det er guddommeligt og udtryk for evig bevægelse, sådan som vi finder den i æterhimlen, men også – i næsten ideel form – i stjernernes kredsbevægelse på nattehimlen hen over døgnet, samt i mere irregulær form i planeternes bevægelse.¹ Men universet har ifølge Aristoteles – som overtager den idé fra Aristark fra Samos (388-315), at jorden er rund – også et centrum som udtryk for ro, som er sammenfaldende med jordklodens centrum, samt de to mulige retninger for bevægelse: en linjebevægelse fra centrum og ud mod himmelkuglen, og en linjebevægelse fra himmelkuglen og ind mod centrum. Her vil jord og vand på grund af deres tyngde ifølge Aristoteles søge ind mod centrum, jord i højere grad end vand – en proces, vi ved, stort set allerede er afsluttet, og som må betyde, at jorden netop danner en stor kugle, mens luft og ild vil søge ud i retning af kuglens periferi, ild i højere grad end luft, da ild er lettere end luft.

¹ Aristoteles selv præsenterede ikke nogen egentlig model for planeternes bevægelsesmønstre. En egentlig geocentriske model i Aristoteles' ånd skabte først Ptolemæus med sit værk *Amalgest* fra omkring år 100 e.kr. (Ptolemy 1998).

Er tingen sammensat, vil dens bevægelse afspejle sammensætningsforholdet. Er der fx en sten i en ravklump, vil dens egenbevægelse bestå i et gennemsnit af mængden af sten og mængden af rav.

Men betyder det nu, at verden hele vejen igennem består af simple og sammensatte ting, eller at findes der steder, hvor der ikke findes nogen af delene?

Her mener Aristoteles, at den sidste opfattelse må være afgørende forkert: Da tomrum må være uden tyngde, må vi jo så i givet fald have, at bevægelsen gennem tomrum skulle være øjeblikkelig, instantan. Men det modsiger alle dagligerfaringer: Kaster vi en sten, tager det jo tid for den at finde ro i samspil med andre ting på sin vej mod sit naturlige sted. Ergo, må der ifølge Aristoteles være stof alle vegne, og vakuum findes ikke. Eller sagt med andre ord: Verden er en verden, hvor alle ting er i glidende bevægelse i forhold til hinanden, og hvor der derfor ikke kan være plads til tomrum mellem dem.

En vigtig præmis i Aristoteles' tænkning omkring det fysiske er, som det fremgår af fremstillingen, den umiddelbare erfaring, dagligerfaringen: Stemmer de tanker, vi har om tingene, ikke overens med, hvad vi oplever i dagligdagen, må vi forkaste dem. Det gælder også inden for geometrien. Også her må vi være i overensstemmelse med, hvad vi kan iagttage i dagligdagen. Men her mener Aristoteles, at geometrien, som den er beskrevet af Euklid, ikke vil kunne gælde for dagligdags fænomener eller i det hele taget for de forhold, der hersker på jorden. Aristoteles taler om lige bevægelser på jorden og om kredsformede bevægelser i himmelrummet. Men ingen af disse bevægelser vil for Aristoteles kunne have noget at gøre med de figurer, Euklid belyser i bogen *Elementer*. Euklid taler her om udstrækningsløse punkter, og om linjer, der kun kan have udstrækning i én retning, og derfor ikke har tykkelse. Men hvor ser vi sådan nogle figurer? Ifølge Aristoteles intetsteds, hverken på jorden eller i de kredsformede bevægelser i himmelrummet. Derfor synes det, Euklid finder frem til i sin geometri, ikke at kunne have nogen praktisk betydning. Af samme grund forviser

Aristoteles geometrien til den yderste sfære i sin kosmologiske redegørelse for verdens indretning – i den såkaldte (abstrakte) ætherhimmel, hinsides sansernes verden.

4. Opgøret med Aristoteles

Aristoteles' opfattelse af bevægelsen og hans argumentation for den forekommer umiddelbart indlysende. Vi kan jo umiddelbart *se*, det forholder sig, sådan som han siger. Derfor er det ikke så meget disse enkeltforhold i Aristoteles' kosmologi, der imponerer. Det gør til gengæld Aristoteles' sammentænkning af alle disse enkeltforhold. Det særligt imponerende ved Aristoteles' sammentænkning er, i hvor høj grad det hele føjer sig sammen i en samlet, velargumenteret fremstilling. Aristoteles' kosmologi fremstår på én og samme gang som et komplekst og som et modsigelsesfrit *system*.

Ikke desto mindre er det denne tilsyneladende rigtige opfattelse, der gøres radikalt op med i 1600-tallets Europa. Revolutionen strækker sig over ca. 100 år og afsluttes – som allerede nævnt – med Newtons opus magnum *Principia Mathematica*. Aristoteles' antagelser om det kredsformede himmelske og det lineære, jordiske forkastes, og der udvikles i stedet en samlet teori for bevægelse, der er så meget desto mere bemærkelsesværdig, som den – hvad der var helt utænkeligt for Aristoteles – er et direkte udtryk for, at der gælder nøjagtigt samme bevægelsesmønster overalt. Hvad bevægelse angår, kan vi ikke adskille det lineære, der foregår på jorden, fra det cirkulære, der foregår i himlen. Endvidere repræsenterer teorien en anfægtelse af den Aristoteles' tilsyneladende velbegræftede antagelse om, at det er umuligt, at vi kan have vakuum, samt ikke mindst hans antagelse om, at geometrien, som vi kender den fra Euklid, skulle være praktisk uanvendelig.

Et afgørende træk ved den naturvidenskabelige revolution er, at der bygges på en helt ny forskningsmetodologi, kendetegnet af, at *systematisk observation og eksperiment* stilles

i centrum. Denne nye metodologi, dette *Novum Organum*, som Francis Bacon omtaler i sit værk af samme navn, erstatter nu *den umiddelbare dagligagttagelse*, som vi har set Aristoteles bygge sit ræsonnement op omkring. Gennembruddet viser sig – hvilket vel er naturligt – ikke ved studiet af forhold på jorden, hvor de erfaringer, der synes at støtte Aristoteles, tilsyneladende er massive, men først og fremmest ved studiet af himmellegemerne: Her giver de astronomiske observationer, Nicolaus Kopernikus (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601) og senere Galilei foretager, og de forskellige slutninger, de drager af dem, et helt nyt og set fra den gamle verdens synspunkt ganske overraskende billede af universet. Specielt vækker Kopernikus' heliocentrisk anlagte system for planetbevægelserne, *De revolutionibus orbium coelestium* fra 1543 (Copernicus 2004), forbedret af Brahes assistent, Johannes Kepler (1571-1630) i værket *Harmonices Mundi* fra 1619 (Kepler 2002), berettiget opsig. Her er det især systemets påfaldende simpelhed i forhold til det af Aristoteles anbefalede geocentriske planetsystem, der overbeviser. Det, at Kopernikus' system kan ses som en simplere beregningsmetode end den, det aristoteliske system giver anledning til, spiller ikke mindst en afgørende rolle for teologen Andreas Osiander, der i sit forord til Kopernikus' værk alene betoner den beregningsmæssige fordel, angiveligt i et forsøg på at imødegå eventuel kritik fra kirkeligt hold.²

I mange fremstillinger tager den historiske udvikling inden for naturvidenskaberne i 1500- og 1600-årene sig ofte ud som om, den udelukkende var Galileis og Newtons værk. Det er naturligvis at give et forenklet billede af udviklingen. Mange aktører har

² Kopernikus afslutter sit værk samme år, som han dør. Han når derfor ikke at se den færdigtrykte bog. Det står uklart, om Kopernikus er enig i Osianders betragtninger. Én ting står imidlertid klart: Luther og Melancthon er stærke modstandere af bogens udgivelse, og man ved, at Osiander af samme grund foretager mindre ændringer i den. Den katolske kirke reagerer ikke på bogen de første mange år, men med den omsiggribende modreformation stiger uviljen mod bogen, og i 1616 bliver den sat på den katolske kirkes liste over forbudte bøger.

selvfølgelig bidraget. Og mange detaljer har skullet udfyldes for at muliggøre den tankerække, de to skikkelser står som eksponenter for. Nu er det ikke stedet her at skrive denne mere detaljerede historie. Imidlertid skal to bidrag nævnes, til trods for at deres væsentlighed ofte overses. De to opdagelser kan begge henføres til den såkaldte *højere analyse* inden for fysikken. Det drejer sig dels om skabelsen af *den analytiske geometri* ved René Descartes (1596-1660), dels om skabelsen af *infinitesimalregningen*, som udvikles nogenlunde samtidig af Newton og Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716).³ De to bidrag er – selv om de snarere tilhører fysikkens matematiske grundlag end selve fysikken – helt afgørende ikke blot for udviklingen af tilforladelige beregningsmåder inden for fysikken, og dermed for fysikkens praktiske anvendelighed, men også for forståelsen af de idealiseringer, det er nødvendigt at operere med inden for teoridannelsen, sådan som vi skal se eksempler på i det følgende.

Alt dette rokker dog ikke ved, at Galileis bevægelseslove og Newtons mekanik må betragtes som de ubestridt største opdagelser inden for fysikken i 1500- og 1600-tallet.

Men hvad består Galileis og Newtons bidrag til den naturvidenskabelige revolution i 1500- og 1600-tallet nu egentlig i? Lad os dertil først vende blikket mod Galilei.

³ Hvad den analytiske geometri angår, bygger den på den grundantagelse, at alle relationer i det fysiske rum lader sig "oversætte" til relationer mellem talstørrelser (koordinater) som udgangspunkt for beregning af bl.a. fysiske bevægelser. Det, Descartes opdager, er, sagt på anden vis, geometriens mulige algebraisering.

Hvad infinitesimalregningen angår, opdager Leibniz og Newton, at det er muligt at regne med uendeligt små (og uendeligt store) talstørrelser, hvilket muliggør en hidtil uset smidig behandling af tid og rum som de *kontinua*, dvs. medier med uendeligt fine inddelinger og umærkelige overgange, de i virkeligheden kan vises at være. Infinitesimalregning er et fællesbegreb for henholdsvis *differentialregning*, som omhandler algebraiske udtryk for det, vi i geometrien kender som tangenter til kurver, og *integralregning*, som omhandler algebraiske udtryk for det, vi i geometrien kender som kurvearealer.

En redegørelse for infinitesimalregningens opståelseshistorie kan findes i Baron (2004 (1969)).

5. Galilei

Galilei skriver i sit tidligere nævnte værk fra 1632, at hovedgrunden til, at Aristoteles' teorier er forkerte, ifølge hans mening er, at han forsømmer at iagttage og frem for alt undlader at gå systematisk frem i sine iagttagelser, når han formulerer sig om de ting, han beskæftiger sig med. Det får ifølge Galilei Aristoteles til at fremsætte en række forkerte påstande. Som eksempel på en forkert påstand nævner Galilei Aristoteles' påstand om, at legemer af forskellig tyngde falder med forskellig hastighed, når man slipper dem, så en sten af en vis størrelse og vægt vil nå jorden dobbelt så hurtigt som en halvt så tung sten, simpelthen fordi den er dobbelt så tung. Denne påstand har han ifølge Galilei ikke sikret eksperimentel evidens for. For havde han gjort det, mener Galilei, ville han have set, at påstanden var forkert. Aristoteles har ganske vist ret i, at et fysisk legeme, der ikke er udsat for ydre hindringer, vil bevæge sig på en ganske bestemt måde. Men det er forkert at antage, at en tings faldhastighed derfor skulle være afhængig af dens vægt – og frem for alt, at den skulle være bestemt af en indre tilskyndelse i tingen til at søge sit naturlige sted, ifølge antagelsen jo hurtige, jo tungere den er, sådan som Aristoteles forestiller sig det.

Galilei henviser som sagt til sine eksperimenter i sin tilbagevisning af Aristoteles. Men hvad indebærer det?

Gennem eksperimenter med kugler, hvor Galilei lader kugler af forskellig tyngde trille ned ad træslisker, kan Galilei relativ let påvise, at alle kugler *uanset vægt* når bunden af slisken lige hurtigt. Alene derigennem synes Aristoteles' antagelse om vægtens betydning for hastigheden at være tilbagevist.

Men samtidig kan Galilei påvise, at jo stejlere han stiller slisken, jo hurtigere vil alle kugler nå til bunden af slisken. Derfor har Aristoteles heller ikke ret, når han siger, at tingene øjeblikkelig finder den fart, der svarer til deres tilskyndelse til at finde deres

naturlige sted, når de slippes. Faktisk vil de tværtimod alle *øge* deres hastighed gennem deres fald mod bunden af slisken. Og de vil alle gøre det i samme jævne takt, uanset deres vægt. Det, man registrerer, er ikke så meget kuglens bevægelse, *hvor der før ikke var bevægelse*, som det er den bevægelsesændring, der finder sted hele vejen ned ad slisken, dvs. kuglens acceleration.

Alt dette ville Aristoteles ifølge Galilei kunne have konstateret, hvis han havde systematiseret sine iagttagelser ved til stadighed at manipulere med betingelserne for disse iagttagelser. Her er det vigtigt at se, at Galilei ikke bebrejder Aristoteles, at han mangler iagttagelser. Dem kan man jo se, han har mange af. Men han bebrejder ham, at de iagttagelser, han gør sig, ikke er eksperimentelt tilvejebragt. Aristoteles' iagttagelser er umiddelbare, og de er sparsomme. Men det er imidlertid ikke nok. Alle Aristoteles' iagttagelser er simple, enkeltstående dagligiagttagelser, sådan som fx iagttagelsen af, at en fjer falder langsommere til jorden end en sten. Men derfor går det netop galt for Aristoteles: I stedet for at manipulere med betingelserne i iagttagelsessituationen, forsøger han at indføje sin simple dagligiagttagelse i samme iagttagelsesmønster, som det viser sig gennem simple dagligiagttagelser: "Iagttagelsen af på den ene side fjerens og på den anden side stenen viser, at tingene må have hver deres iboende tilskyndelse til at finde deres naturlige sted."

Nu synes Aristoteles at have ret i én ting, nemlig at forskellige medier i forskellig grad kan sinke en tings hastighed. Fx vil man let kunne konstatere, at en sten vil bevæge sig hurtigere gennem luft end gennem vand. Derfor synes Aristoteles at være på rette vej med sin påstand om, at tingens bevægelse til dels skyldes tingenes gniden sig op ad hinanden. Men ifølge Galilei er der tale om, at skindet bedrager. Forsøger vi nemlig at fjerne så meget af et medium, vi kan, viser det sig, at stenen og fuglefjeren i virkeligheden vil tendere til at følge nøjagtigt samme accelerationsmønster gennem det pågældende medie. Havde Aristoteles foretaget sådanne systematiske

observationer og eksperimenter, ville han have været i stand til at påvise, at det forholdt sig sådan. Men det er netop det, Aristoteles ifølge Galilei forsømmer at gøre.

Ifølge Galilei fremfører Aristoteles i spekulationer i stedet for at udføre eksperimenter. Derfor bringer han sig ikke i en situation, hvor han vil kunne se, at det hverken er tingenes vægt eller samspillet mellem ting og medie, der har indflydelse på tingenes grundliggende bevægelsesmønstre.

Spørgsmålet er imidlertid, hvad det indebærer at udføre eksperimenter?

Først og fremmest indebærer det at udføre eksperimenter, at man forholder sig aktivt-handlende til tingene. Men det er ikke i sig selv tilstrækkeligt. Det, det også gælder om, og som er lige så vigtigt, er, at man forholder sig så *systematisk* som muligt til disse ting, mens man handler. Grundliggende set består et eksperiment med en ting i *systematisk at fjerne elementer fra tingen – eller tilføje nye elementer til den – for dernæst at se, hvordan tingen af sig selv opfører sig*. Det er i virkeligheden den simple, men effektive handleforskrift, det ifølge Galilei gælder om at holde sig for øje, og som han benytter sig af i sin argumentation over for Aristoteles. Det at lægge ting til og trække ting fra kender vi alle utallige eksempler på fra vores dagligdag, og også Aristoteles er selvfølgelig bekendt med simple manipulationer og med de spørgsmål, de kan afføde: “Hvad sker der, hvis jeg fjerner denne sten?” “Hvad sker der, hvis jeg åbner vinduet her?” “Hvad sker der, hvis jeg spiser af denne svamp?” “Hvad sker der med luftbobler, når man sender dem gennem vand?” Imidlertid er Aristoteles ifølge Galilei – og det er i virkeligheden det, Galilei hovedsagelig bebrejder Aristoteles – ikke omhyggelig nok i sin besvarelse af sådanne spørgsmål. Det, der ifølge Galilei gennemgående er i vejen med Aristoteles’ forklaringer, er, *at han alt for hurtigt forlader dagligdagstaggelsen til fordel for spekulationen*. I stedet skulle han i højere grad have systematiseret selve sin dagligdagstaggelse – og det vil i forbindelse med Aristoteles’ ræsonnement omkring hans sten sige: målt og vejte – så han kunne vide, *hvad og hvor meget han rent faktisk trak fra og lagde til, når han slap dem eller kastede dem*. Men sådanne former for kvantificering af

sine iagttagelser tager Aristoteles ikke initiativ til. Og det er derfor, at det ifølge Galilei aldrig lykkes ham at nå frem til nogen egentlig indsigt i, hvad der er på spil, når man udfører den i virkeligheden ganske simple handling, det er at kaste eller slippe en ting, og lade den falde til jorden af sig selv, eller lade en kugle trille ned ad en sliske.

Nu er det desværre i mange mere populære fremstillinger af den galileiske revolution inden for bevægelseslæren i al for høj grad den minutiøse iagttagelse og systematiske manipulation, der fokuseres på. Men selv om iagttagelse og systematisk manipulation er vigtige våben i Galileis argumentation over for Aristoteles, er de dog, hvis man nærlæser Galilei, langt fra tilstrækkelige til at forstå, hvad der er på spil, når en ting bevæger sig. Men her viser der sig en overraskelse i Galileis argumentation over for Aristoteles, specielt hvis man tror, Galileis bedrift består i at gøre op med den spekulative tanke for i stedet at hellige sig det, der kan måles og vejes. For faktisk er spekulation ifølge Galilei også vigtig – ja, i virkeligheden uomgængelig – når det gælder forståelsen af, hvad der sker, når en ting – et fysisk legeme – bevæger sig. I den forstand spekulerer Galilei ikke i mindre grad – kan man sige – end Aristoteles. Han gør det blot på en anden måde end ham. Aristoteles spekulerer alene med udgangspunkt i den umiddelbare iagttagelse. Galilei derimod *bringer sin spekulation i stadig, intim sammenhæng og vekselvirkning med den minutiøse iagttagelse og den systematiske manipulation*. Det gør, at spekulationen ændrer karakter og går fra at være fri spekulation til at være et *tankeeksperiment*.⁴

Galilei udelukker ikke spekulation. Men i modsætning til Aristoteles er det som tankeeksperiment med udgangspunkt i iagttagelse og eksperiment, Galileis spekulation

⁴ Ordet "tankeeksperiment" stammer fra den danske fysiker Hans Christian Ørsted (1812; jf. Witt-Hansen 1976). For ham kan ordet dække både den tankemæssige forberedelse af et eksperiment, som derefter gennemføres, og et eksperiment, som bærer ideale træk, og som derfor vil kunne kaldes spekulativt. Senere har den tyske fysiker og videnskabsteoretiker Ernst Mach taget ordet op, men kun i den første betydning af ordet (jf. Witt-Hansen 1976).

udmærker sig frem for Aristoteles’.

Galilei bruger tankeeksperimentet til to ting, nemlig dels til filosofisk-kritisk at finde svagheder i den aristoteliske argumentation, dels til videnskabeligt-positivt at integrere iagttagelserne fra de mange eksperimenter i en samlet, stram og idealiseret fremstilling.

Et eksempel på det første finder vi hos Galilei i starten af *Dialog om de to grundliggende verdenssystemer*: Det er Aristoteles’ antagelse, at et legemes hastighed vil øges ligefrem proportionalt med dets vægt. Men hvis det er rigtigt, ræsonnerer Galilei, betyder det ud fra Aristoteles’ egne præmisser, at et legeme, der er tungere end det pågældende legeme, på én og samme gang vil bevæge sig hurtigere og langsommere end dette legeme. Forbinder vi nemlig to legemer med en snor, argumenterer Galilei, hvor det ene legeme er ti gange så let som det andet, vil det nye sammensatte legeme på én og samme gang bevæge sig 10% hurtigere, da det jo samlet er 10% tungere end det oprindelige legeme, og 10% langsommere, da det nyttilførte legeme med sin 90% lettere vægt jo samtidig vil sinke det oprindelige legemes frie bevægelighed med samme 90%. Men nu kan begge dele ikke være rigtigt, hvorfor der ifølge Galilei må være noget galt med Aristoteles’ ræsonnement: Et tyngdebegreb, hvor et legemes tyngde på én og samme gang både kan fremme og sinke dets bevægelse, må slet og ret være forkert.⁵

Men hvor ligger fejlen? Ifølge Galilei kan man finde fejlen i netop det forhold, at *ræsonnementet ikke ligger i forlængelse af noget faktisk udført eksperiment*. Aristoteles iagttager, men han eksperimenterer ikke; han manipulerer ikke med sine genstande.

⁵ Det er selvfølgelig vigtigt, at man her til støtte for sin forståelse af argumentationen inddrager Aristoteles’ antagelse om, at verden er en verden, hvor der ikke eksisterer tomrum, men hvor alle legemer er i glidende bevægelse i forhold til hinanden. Netop dette betyder, at de to sammenbundne legemers egenmasser – grundet eksistensen af det medium, de bevæger sig igennem – ifølge Aristoteles hver især vil yde et selvstændigt bidrag til den samlede hastighed. Derfor vil det store legemes bevægelse netop blive sinket med 90% (og det lille legemes bevægelse øget med tilsvarende 90%).

Men det er netop det, der ifølge Galilei er grunden til modsigelsen i eksperimentet. Fejlen ligger ikke i, at Aristoteles spekulerer, men i, at spekuleringen foregår uden om udførelsen af relevante eksperimenter. Det er derfor, det går galt.

Nu viser Galileis sliskeeksperimenter, som vi har set, at ligegyldigt hvor stejl en sliske er, vil de kugler, der sendes af sted, accelerere med samme hastighed i samme medium, uanset tyngde. Det vil sige, at der ikke synes at være nogen sammenhæng mellem tyngde forstået som tendens til at søge mod et naturligt sted på den ene side og medium og acceleration på den anden side, sådan som Aristoteles antager.

Inddrager vi nu netop dette som antagelse, kan vi ifølge Galilei undgå at havne i den selvmodsigelse, der ligger i Aristoteles' argumentation omkring bevægelsesbegrebet.

Et eksempel på en mere positiv, videnskabelig integration af tankeeksperimentet, finder vi i et andet argument fra Galileis side: Alle sliskeeksperimenter synes at bekræfte den hypotese, at i jo højere grad, man fjerner de legemer og stoffer, der øver indflydelse på et givet legeme eller stofs bevægelse uanset dets størrelse og art, i jo højere grad synes accelerationen at blive den samme for det pågældende legeme eller stof. Det giver Galilei anledning til at drage den slutning, at *accelerationen i virkeligheden er den samme for alle legemer og stoffer*. Nu er der imidlertid et problem med denne slutning. Problemet er, at det ikke er muligt for Galilei at fjerne ethvert legeme eller stof, der øver indflydelse på et givet legeme, så i en vis forstand vil Galilei ikke kunne skaffe sig det empiriske belæg for sin slutning, han behøver. Alligevel drager han ikke desto mindre sin slutning. Han gør det for at forsimple sin teori. Men han mener også, han har gode grunde for at kunne gøre det. Antagelsen om, at alle medier kan fjernes, ligger nemlig i *umiddelbar forlængelse af de udførte eksperimenter*. Der er i virkeligheden tale om en *videreførelse* af eksperimentet, *men nu i stedet blot som tankeeksperiment*: Det, der går under navnet *Galileis teori om legemers frie fald*, er i virkeligheden udtryk for en *idealisering* med

baggrund i en *systematisering* af vores almindelige handlemæssige omgang med tingene.

Men dette er ikke det eneste tankeeksperiment, der bidrager positivt til Galileis teori om det frie fald. Vi kan faktisk også finde andre. Et af disse tankeeksperiment er bemærkelsesværdigt: Gennem dette når Galilei nemlig frem til en ret så overraskende slutning, når man ser det på baggrund af Aristoteles' antagelse om dagligerfaringens betydning. For faktisk viser det sig, at det vil være særdeles nyttigt at indføre det begreb om vakuum, som Aristoteles i sin tid energisk forkastede. Begrebet om vakuum synes at være ikke blot nyttigt, men endog en nødvendig forudsætning for at forstå begrebet om bevægelse. Som vi har set, forkaster Aristoteles begrebet om vakuum, fordi *vakuum vil gøre bevægelsen instantan*, hvilket er i modstrid med vores dagligagttagelser. Aristoteles' argument bygger imidlertid på en forudsætning, som er forkert. Det at gå fra ingen bevægelse til bevægelse *uden at regne med genstandens egen impetus* betyder ifølge Aristoteles, at genstanden for at gennemløbe en vis strækning først må gennemløbe halvdelen af denne strækning, og så fremdeles, så den "... ikke ville kunne tilbagelægge en mil på en time, på en dag eller på tusind år." (Galilei, op.cit., p. 57; min oversættelse) Men da vi nu ikke længere behøver regne med, at tingene har deres egen impetus, behøver vi heller ikke forkaste tanken om instantan bevægelse og dermed tanken om vakuum. Tværtimod ligger begge tanker i forlængelse af Galileis eksperimentelle overvejelser: Aristoteles opfatter overgangen mellem hviletilstand og bevægelse som en uoverstigelig kløft. Men det er ifølge Galilei forkert: Overgangen mellem hviletilstand og bevægelse er alene et resultat af, at man gør faldvejen mindre og mindre, først gennem fysisk eksperiment, og derefter – når de fysiske muligheder for at gøre den mindre slipper op – ved tankens kraft, nemlig ved at *tænke sig til, at man til sidst gør den uendelig lille*. Men da hastigheden, som vi har set, er et produkt af faldvejen, betyder det samtidig, at der intet er i vejen for, at man derfor også vil kunne *tænke sig til en gradvis overgang fra hastighed til hviletilstand*. Men dermed falder i

virkeligheden også Aristoteles' antagelse om, at vi ikke kan have vakuum, til jorden: *Vakuum vil nemlig nu kunne ses som et direkte udtryk for den ideelle grænsetilstand, hvor vi har fjernet stadigt mere materiale fra mediet omkring et givet legeme for til sidst at skabe betingelserne for, at legemet falder virkelig frit.*

Men vi er faktisk endnu ikke færdige med at finde frugtbare positive tankeeksperimenter hos Galilei. Endnu et væsentligt tankemæssigt fremskridt i forhold til Aristoteles finder vi nemlig i Galileis syn på geometrien. For Aristoteles tilhører geometrien, som vi allerede nævnt, en "ideal" verden forskellig fra den dagligdags verden og uden relevans for denne. Et af de argumenter, han gør anvendelse af for at tilbagevise, at geometrien kan have nogen nytteværdi, er tilbagevisning af Zenons argumenter for bevægelsens umulighed, som ifølge Aristoteles rummer en sammenblanding af det forhold, at virkelige udstrækninger og tidspunkter er uendeligt delelige, men et geometrisk punkt er udeleligt. Tilsyneladende et overbevisende argument.

Men her lykkes det Galilei uafviseligt at demonstrere, at selv om en virkelig kugle, der er placeret på et virkeligt plan, fx et bord, ikke kan siges at berøre planet i et euklidisk punkt, så er der i virkeligheden ingen uoverensstemmelse mellem de virkelige, fysiske forhold og den euklidiske geometri. Argumentet er som følger: Den euklidiske geometri dikterer, at den ideelle kugle og det ideelle plan berører hinanden i netop ét euklidisk punkt, men det gør for så vidt også det fysiske ræsonnement: Har vi nemlig et tilfælde, hvor en kugle berører et plan i noget, man ikke vil kunne kalde et punkt i euklidisk forstand, vil man nemlig blot se det som hindringer, der i princippet vil kunne fjernes, så vi vil kunne tilnærme os dette idealplan. Men det vil sige: I stedet for at stå i modsætning til den materielle verden, står den euklidiske idealiserede geometri i kontinuitet med den materielle verden, nemlig som det grænsetilfælde, hvor vi har fjernet alle hindringer. Når Galilei formulerer sin lov for det frie fald samt de love for ballistiske

bevægelser, han også inddrager i sin *Dialog om de to grundliggende verdenssystemer*, er denne idealisering netop indbygget i Galileis formler. I den forstand overskrider Galileis love enhver empiri. Men lovene er ikke blot en overskridelse af empirien. De er samtidig en afgørende mulighedsbetingelse for at redegøre for, hvad der sker i den fysiske verden. Når et legeme – uanset vægt – *tenderer mod at falde mod jorden ifølge formelen i Figur 1:*

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

Figur 1

hvor s er faldvejen, t er tiden, og g er en konstant⁶, så er de idealiseringer og tankeeksperimenter, der udgør en nødvendig del af Galileis ræsonnementer over for Aristoteles, allerede indbygget i denne lov. Derfor har vi her et klart og illustrativt eksempel på, hvordan spekulation indgår som en uomgængelig betingelse for det at udføre fysiske eksperimenter.

Bag alle Galileis ræsonnementer og eksperimenter ligger altså i virkeligheden et generelt, men samtidig yderst enkelt princip. Princippet kan man i dag bl.a. møde under navnet *superpositionsprincippet*, som i sin moderne kortformsformulering lyder: *Enhver lineær kombination af løsninger af en lineær ligning er igen en løsning af en lineær ligning*. Det lyder måske lidt kompliceret, men princippet er i virkeligheden blot et

⁶ = jordens tyngdeacceleration (som ved jordens overflade kan udmåles til at være 9,80665 m/s²). Tidsvariablen t^2 er, som man kan se, opløftet til anden potens. Vi har her med acceleration at gøre, dvs. med en øgning af hastigheden, og dermed med en størrelse, der er andengradsafledt af tilbagelagte afstande.

højstileret udtryk for den mulighed, vi har talt om, vi har for at lægge til og trække fra, tilføje eller fjerne, sådan som vi kender fra vor daglige omgang med tingene. Vigtigt i den sammenhæng er forestillingen om, at ethvert fysisk system i princippet vil kunne tømmes for alle elementer, som øver indflydelse på et givet element, så elementer kan beskrives rent. Det er netop det, Galileis faldlov er udtryk for. Men vi har også set, at den "rene" beskrivelse altid også vil være produkt af en idealisering. Fx fordrer faldloven vakuum. Men vakuum findes ikke. Vakuum kan kun tilstræbes. Men netop dette viser superpositionsprincippet styrke: Har vi et givet fysisk system, og får vi resultater, der afviger fra det, faldloven dikterer, er det ikke anledning til at smide faldloven væk som ubrugelig, men tværtimod anledning til at gøre anvendelse af den til at spørge om, hvilke elementer i systemet, der bevirker, at den ikke er i stand til at redegøre for situationen. Men det er netop den fornemste anvendelse af superpositionsprincippet. I kraft af dette princip kan vi fastholde vores love i lyset af en tilsyneladende falsifikation: Hvis der havde været vakuum, *hvad der faktisk ikke er*, så ville dette legeme være faldet i overensstemmelse med faldloven. Man taler i den forbindelse om, at fysiske love er *kontrafaktiske*, eller at de har *kontrafaktisk status*. At de har gyldighed, selv om de har svært ved at finde sandhed i det faktiske. Snarere end at være hypoteser skal de også i virkeligheden ses som *normer*, nemlig for, hvordan man kan spørge om konkrete årsager til, at de ikke er sande i den aktuelle situation: "Gåsefjeren falder ikke, som vi forventer efter Galileis faldlov. Hvilke årsager kan der være? Måske luftmodstand? Måske vind? Måske statisk elektricitet?" Således muliggør loven – med sin nødvendige idealisering indbygget i sig – at vi kan spørge om årsager og sammenhænge, der hindrer gåsefjeren i at lystre faldloven.

Love kan have være mere eller mindre kontrafaktiske afhængigt af, hvor mange konkrete årsager, vi – set i forhold til vores dagligverden – skal "trække fra" for at komme ind til det idealiserede tilfælde, det kontrafaktiske udsagn beskriver. Dette er oftest igen en funktion af lovens "dækningsgrad" (generalitet): Det er klart, at faldloven

dækker flere fænomener end fx Boyles lov fra 1662, der udelukkende angår luftformige stoffer eller gasser, som relativt let kan tilnærmes idealtilfældet. Boyles lov lyder: I en given mængde gas er tryk og rumfang omvendt proportionale størrelser (hvor betingelsen for at bekræfte loven er, at man samtidig holder temperaturen af gassen konstant). Heroverfor angår faldloven alle legemer og stoffer, vi overhovedet kan støde på i dagligdagen, inklusive de luftformige stoffer, og idealtilfældet vil derfor være langt vanskeligere at tilnærme.

6. Newton

Newton kan i mange henseender ses som den konsekvente fuldfører af Galileis angreb på den aristoteliske naturopfattelse og fysik. Med Newton går vi mod den endegyldige generalisering af forestillingen om verden i termer af efficient kausalitet: Mens Galileis overvejelser kun har gyldighed for den terrestriske fysik, dvs. den del af fysikken, der gælder tæt ved jordens overflade, lykkes det Newton med sin såkaldte *almene gravitationsteori* at nå frem til en samlet redegørelse for både de jordiske fænomener og himmelfænomenerne – og dermed i realiteten for fænomenerne i universet som helhed. Alene det er en ganske enestående bedrift. Hertil kommer, at Newtons hovedværk *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687) er et yderst elegant værk med en ganske enkel hovedstruktur, samtidig med at der i værket præsenteres et væld af detaljer. Efter en indledende del, hvor Newton forsøger at give en definition af de fem begreber "masse", "bevægelse", "inerti", "kraftpåvirkning" og "centripetalkraft" (som han definerer i forskellige udgaver), går han i gang med at præsentere kernen i sit værk, først og fremmest de tre bevægelseslove, som lyder:

Lov I (inertiloven): "Ethvert legeme fortsætter med at være i hvile eller bevæger sig ensartet i en ret linje, medmindre det er tvunget til at ændre tilstand på

grund af virkende kræfter.” (Newton, *ibid.*, p. 416; min oversættelse).

Lov II (loven om kræfternes parallelogram): “Enhver bevægelsesændring er proportional med den virkende drivkraft og virker retlinjet ind på påvirkningspunktet.” (denne lov vil kun gælde i samme inertialsystem). (Newton, *ibid.*; min oversættelse; jf. senere om begrebet ‘inertialsystem’).

Lov III (loven om aktion og reaktion): For enhver aktion vil der altid være en modsatrettet reaktion; eller sagt med andre ord: to legemers gensidigt virkende kræfter vil altid udligne hinanden. (Newton, *ibid.*, p. 417; min oversættelse).

Her skal først og fremmest bemærkes, at er der grund til at kalde Galileis love for “love”, er der i endnu højere grad grund til at gøre det i forbindelse med Newtons love. De repræsenterer alle en højere grad af generalitet og kontrafakticitet end Galileis love. Hvad Lov I – inertiloven – angår, er det relativt let at se: Loven udtaler sig ikke blot om jordiske ting, men om enhver ting, der ikke er påvirket af kræfter. Men ikke blot har ingen set et legeme, der ikke er påvirket af kræfter (fra andre legemer); i virkeligheden er der tale om skildringen af en verden, der er så kontrafaktisk, at den er fuldstændig tømt for andre genstande end den studerede. Derfor kan Lov I i sandhed ses som en norm for, hvordan tingene i verden bør opføre sig. Den er i realiteten den yderste ramme for at spørge om årsager og virkninger i verden og den yderste ramme for anvendelse af superpositionsprincippet, hvor enhver konkret beskrivelse af forhold i universet vil ses som en beskrivelse af en hindring for, at loven vil kunne finde umiddelbar eller ideel anvendelse. Tænker vi i “tillæg” og “fradrag”, er der i realiteten tale om en forskningsprocedural opfordring til at tænke i at fjerne alle de omstændigheder, der er årsag til en eksperimentel bekræftelse af Lov I.⁷

⁷ Det er i virkeligheden hemmeligheden bag naturlovenes status som naturlove: Naturlovene

Newtons tre love er bestemmende for enhver bevægelse i universet, og er i den forstand universelle. De danner dog endnu ikke kronen på værket i *Principia Mathematica*. Kronen på værket finder vi først i *den almene gravitationslov (tyngdelov)*, som lyder: "Hvis to kugleformede legemer tiltrækker hinanden og deres stof er homogent fordelt på alle sider i regioner, der ligger lige langt fra deres centre, så vil den gensidige tiltrækning være

skal ses som de yderste rammer for vores handlen i den fysiske verden. Tanken, dette rummer – at man forbinder den objektive orden i naturen i fundamental forstand med de handlemuligheder, vi har over for den – kan forekomme radikal. Normalt er man alene villig til at se en mere eller mindre metaforisk lighed mellem nødvendigheden i naturen og nødvendigheden i handlingen, funderet i det fælles begreb om modalitet. Spørgsmålet er imidlertid, om det er radikalt nok. Det kan synes besynderligt, at noget, der er et udtryk for det mest objektive i verden – nemlig naturlovene – skulle kunne forlenes med samme modale struktur som noget, vi normalt opfatter som rent subjektivt – nemlig vores egen handlen i verden. Men hvorfor ikke? Det er vel ikke urimeligt at ræsonnere på følgende vis: På den ene side er kausaliteten i verden, dens årsager og virkninger, betingelsen for, at vi kan handle, altså udnytte denne kausalitet; men samtidig er vores normstyrede instrumentelle handlen, vores gøre brug af mål og midler, på den anden side omvendt betingelsen for, at vi kan lære denne kausalitet at kende. Men det betyder, at kausalitet og handlen, kendsgerning og norm, faktisk og kontrafaktisk, i virkeligheden danner komplementære rammebetingelser for vores væren i verden.

Men netop derfor kan vi tolke naturlovene som udtryk, ikke for noget i den fysiske natur, men snarere for vores handlemuligheder over for tingene i verden i almindelighed. Vælger vi denne tolkning, når vi netop til den radikale forståelse af fysikken, at der egentlig ikke findes noget normativt eller kontrafaktisk ved verden; at den alene består af "constant conjunctions" mellem årsager og virkninger, sådan som Hume i sin tid har formuleret det (Hume 2010 (1748):124-145), dvs. et uhyre væv af årsager og virkninger strækkende sig fra Big Bang til verdens ende, *uden noget nødvendigt bånd mellem de enkelte årsager og virkninger*. Det er rigtigt, at vi aldrig vil komme til at kende verden således. Kausale sammenhænge møder vi normalt kun lokalt, og stykkevis og delt. Disse sidste kan vi så naturligvis efterhånden opbygge stærke forventninger til: "Lyn efterfølges altid af torden"; "Vand koger ved 100° "Når det fryser, bliver vejene glatte", etc. Dem kan vi nogenlunde kontrollere. Men jo mere sammensat, det fænomen, der skal undersøges, er, i jo højere grad må man tænke i mulige "tillæg" og "fradrag", og dermed tænke modalt og kontrafaktisk. Ikke fordi fænomenet i sig selv er modalt og kontrafaktisk. Men fordi kausalsammenhængen gennem vores indgribende handlen skal renses for forstyrrende faktorer, der strider mod vores forventninger. Eksempelvis ved vi således alle, hvor vanskeligt det vil være at opbygge sikre forventninger om vejret. Eller om den økonomiske udvikling i samfundet. Hertil er fænomenerne for komplekse og ustyrlige. Derfor har vi brug for – under stadig risiko for at tage fejl – at ræsonnere modalt og kontrafaktisk om disse fænomener. Derfor har vi brug for at tænke dem inden for rammerne af en helhed, hvor vi er henvist til at "lægge til" og "trække fra".

Men det er netop i dette lys, Newtons første lov, inertiloven, skal ses. Newtons inertilov er den mest generelle spørgehorisont for, hvordan vi vil kunne undersøge fysiske legemers bevægelsesmønstre i forhold til hinanden. Det er ikke en beskrivelse af verden, sådan som vi kender den. Det er ikke en hypotese om observerbare fænomener i verden. Det er en præsentation af den fysiske verden, som den ville have set ud, hvis vi kunne se den fra Guds synsvinkel – uden forstyrrende faktorer, som det ville være nødvendigt at fjerne.

ligefrem proportional med produktet af deres masser og omvendt proportional med kvadratet på afstanden mellem dem." (Newton, *ibid.* 811; min let modificerede oversættelse). Eller noteret som formel:

$$F = \frac{G \times M_1 \times M_2}{R^2}$$

Figur 2

hvor F er gravitationen (= massetiltrækningen) og G er den såkaldte universelle gravitationskonstant, som regnes at være $(6.6742 \pm 0.0010) \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$. Med denne matematisk strukturerede lov er der tale om den mest generelle lov for konception af universet. Ikke blot omfatter den alle fysiske bevægelser ved jordens overflade. Den tillader også deduktion af Keplers love for planetbanernes elliptiske bevægelse rundt om solen og i øvrigt ethvert himmellegemes bevægelse (jf. Kepler; *op.cit.*). Men dermed er det fysiske paradigme endegyldigt frigjort fra forestillingerne om teleonomi. Enhver lokal bevægelse og ethvert lokalt bevægelsessystem lader sig nu tværtimod integrere med enhver anden bevægelse og ethvert andet bevægelsessystem i en samlet kausalbestemmelse af enhver bevægelse i universet, ligesom enhver bevægelse igen lader sig forklare som et produkt af alle massers samlede gravitationelle indvirkning på hinanden. Med andre ord: Universet lader sig i realiteten bestemme som én stor mekanisme, hvor vi – ideelt set – fra enhver given tilstand af universet vil kunne beregne os frem til enhver efterfølgende tilstand af universet. Her er teleologi overalt erstattet med efficient kausalitet.

Ser man på Newtons gravitationslov, synes den i en vis forstand at repræsentere en tilbagevenden til Aristoteles' forestillinger om bevægelse.

Gravitationsloven viser nemlig, at jo større M_1 og M_2 er – og jo nærmere de to masser er på hinanden rent størrelsesmæssigt – jo hurtigere vil de falde ind imod hinanden. Men det synes netop at bekræfte Aristoteles' teori og afkræfte Galileis: Vægten må alligevel være afgørende, sådan som Aristoteles antager. Men her må man imidlertid ikke glemme, at Galilei udfører alle sine eksperimenter *tæt ved jordens overflade*. Men det vil sige, at det må gælde, at ligegyldigt hvor store objekter, man vil lade falde frit mod jordens overflade, så vil deres masse under alle omstændigheder være forsvindende lille i sammenligning med jordens masse. Det er derfor – inden for enhver målbar grænse – med rette, Galilei gennem sine eksperimenter er nået frem til, at der ikke er nogen forskel på lette og tunge legemers faldhastighed.

I en vis forstand vil man kunne sige, at der er begået en fejl af Galilei. For der må være en masseforskel i Galileis redegørelse, han ikke redegør for, hvor lille den end måtte være. Men i stedet for at se det som en umålelig fejl fra Galileis side, vil det her, som vi hele tiden har gjort det, være rimeligere at se forholdet som udtryk for en anvendelse af idealiseringsbegrebet: På jordoverfladen vil vi være tæt på de idealsituationer, hvor kun jordens tyngde spiller en rolle, så Newtons formel her går mod formelen:

$$F = \frac{G \times M}{R^2}$$

Figur 3

dvs. mod at være udtryk for, at den kraft, den faldende genstand får tilført, alene vil være afhængig af jordens masse og afstanden fra den faldende genstand til jordoverfladen. Da vi altid hos Galilei befinder os tæt ved jordoverfladen, vil r nærmest

være en konstant, således at det stort set alene vil være kraften fra jordens masse, der påvirker den faldende genstand. Men det vil sige: Newtons formel forvandler sig ved jordoverfladen i virkeligheden til Galileis tyngdekonstant g .

Selvom Newtons opdagelse af en kraft i tingene selv kunne se ud som en tilbagevenden til Aristoteles' tænkning, er det klart, at der på ingen måde er tale om genindførelsen af hensigtslove inden for naturforklaringen: Selv om et legemes hastighed er afhængig af dets masse, er massen langt fra at være en indre tilskyndelse i det faldende legeme til at finde sit "naturlige sted" eller andre lignende indbyggede formål. Den er alene et produkt af det faldende legemes og jordens respektive masser (og deres indbyrdes afstand). Årsagsloven er ikke blevet erstattet af nogen hensigtslov hos Newton. Mekanikken ikke af nogen teleologi.⁸

Vi har tidligere set, med hvilken forsigtighed Osiander i sit forord til Kopernikus' *De revolutionibus* udtrykker sig om fordelene ved det heliocentriske frem for det geocentriske verdensbillede. Det, han her henholder sig til, er alene, at det heliocentriske, altså Kopernikus' verdensbillede, giver enklere beregninger, når planetbaner skal beregnes. Men om Kopernikus' system af den grund er sandere eller mere objektivt end det geocentriske, vil han ikke tage stilling til (det overlader han til Kirken). Men hermed appeller Osiander i virkeligheden uafvidende til de

⁸ I sit *Scholium Generale* tilføjet til 2. Udgaven af *Principia* (1719) anfører Newton: "Hypothesis non fingo", altså "Jeg udtænker ikke hypoteser". Hermed signalerer han, at hans mekanik ikke er et svar på et spørgsmål om kraftens årsag – altså ikke er et spørgsmål om *teleologiske årsager* som hos Aristoteles. Der er tale om en ren beskrivelse af gravitationens virkemåde, sådan som til kommer til udtryk gennem Newtons gravitationsligning.

Set i lyset af gravitationslovens generalitet, kan Newtons bemærkning ses som slutstenen på det opgør med den klassiske naturfilosofi, der indledes med Galileis kritik af Aristoteles i *Dialog om de to grundliggende verdenssystemer*.

Selvom Newtons bemærkning er rettet mod den klassiske naturfilosofi, kan den dog også – ud fra en mere moderne forståelse – ses som et udsagn om gravitationslovens særstatus: Gravitationsloven er ikke nogen hypotese. Det er snarere en øverste norm for, hvordan man skal udspørge om årsager.

bevægelseslove, der første gang klart formuleres af Newton i *Principia*, men som allerede er forberedt af Galilei og kendes som *galileitransformationerne*. Det er en kendt sag, at en ting i bevægelse kan rumme andre ting, der bevæger sig frit i forhold til denne overordnede tings bevægelse. Det gælder fx et tog, der kører gennem natten, hvor passagererne jo kan bevæge sig frit rundt i vognene, som om toget befandt sig i hvile. Men det er netop det, galileitransformationerne forholder sig til. Det, galileitransformationerne siger, er, at når “[...] legemer er indesluttet i et givet rum, så vil deres bevægelser i forhold til hinanden være de samme, hvad enten rummet er i hvile, eller det bevæger sig jævnt fremad uden cirkulær bevægelse.” (Newton *ibid.*, følgesætning V, p. 423, min oversættelse). Men det vil sige: Så længe selve rummet – givet ved de ting, der er i det – ikke accelererer, vil rummet heller ikke øve nogen indflydelse på bevægelsesmønstret blandt de ting, der befinder sig i det. Rummet vil, siger Newton, danne et *inertialsystem*, dvs. et system, hvor det indbyrdes bevægelsesmønster vil kunne behandles lokalt. Og har vi to inertialsystemer, indlejret i hinanden, vil det, der foregår i det mindre system, ifølge galileitransformationerne umiddelbart kunne overføres til det, der foregår i det større: En person, der bevæger sig med 4 km/t ned gennem vagonerne i et tog, der kører 70 km/t, i togets bevægelsesretning vil ifølge galileitransformationerne bevæge sig med $70 \text{ km/t} + 4 \text{ km/t} = 74 \text{ km/t}$ i forhold til jordoverfladen. Superpositionsprincippet vil her være overholdt: Bevægelserne vil kunne adderes ad libitum.

Denne antagelse om alle inertialsystemers relativitet og almenforskydelighed i forhold til hinanden kan Newton imidlertid ikke stille sig tilfreds med. Galilei bruger alene sine systemer til ræsonnement om kinematiske forhold på jordoverfladen. Men hvis de skal gælde for universet som helhed, kan Newton ikke leve med antagelsen om, at der ikke findes noget absolut system. Et af problemerne relaterer sig til følgesætningen ovenfor: Det er nødvendigt, at man kan skelne mellem lineære og cirkulære bevægelser. Det mener Newton bl.a. man må, fordi når vand fx bringes i rotation i en spand, kan

denne rotation ikke blot ses som en lokal cirkulær bevægelse. Vandet roterer ikke blot i forhold til spandens sider. Vandets roterende bevægelse må ifølge Newton skyldes noget større og i virkeligheden absolut. Derfor vil han finde frem til et absolut system, der vil kunne give målbare resultater. Og han mener faktisk også at kunne finde et sådant system, nemlig i den såkaldte *fiksstjernehimmel* (som består af fikse, dvs. ubevægelige, stjerner i modsætning til de såkaldte vandrestjerner, dvs. planeterne).

Men er fiksstjernehimlen absolut i betydningen i absolut hvile i forhold til den roterende bevægelse i en spand, må den også være absolut i forhold til det roterende system, solsystemet er, og dermed ifølge Newton garant for, at solsystemet er et mere objektivt roterende system, end det system, man vil nå frem til, hvis man gør jorden til centrum. Solsystemet repræsenterer ikke blot en beregningsfordel. Det gør det selvfølgelig også. Men der er samtidig en reel grund til at stille solsystemet centralt, nemlig fiksstjernehimlen som materiel manifestation af det absolutte rum.

Ligesom Aristoteles' logik gælder den dag i dag – den er ikke blevet forkastet, men blot modificeret og udbygget – har også den newtonske mekanik overlevet – men som dén også i en modificeret og udbygget form. Bl.a. opdagelsen af, at fiksstjernehimlen – dvs. himmelrummet, som det tager sig ud, når man ser bort fra solsystemet og planetbevægelserne – ikke er i absolut hvile, samt erkendelsen af, at lysets hastighed i vakuum må være sammenfaldende med den højeste hastighed for udbredelse af information i universet, har nødvendiggjort en modifikation af Newtons mekanik.

Denne modifikation er Einstein kommet til at stå for.

7. Einstein

Einsteins indsigt om sammenhængen mellem lys og informationsudbredelse, danner kernen i *Einsteins specielle relativitetsteori* fra 1905 (Einstein 2005 (1905); jf. også for en

interessant redegørelse Bais 2007).⁹ Udgangspunktet er her, at kendskab til verden kun kan opnås gennem indkommende information fra selv samme verden; men hvis indhentningen af information er afhængig af empiriske forhold – her, at lyset i vakuum forplanter sig i alle retninger med en konstant hastighed – bliver vi nødt til at integrere dette empiriske forhold i teorien.

Det særlige ved Einsteins specielle relativitetsteori er, at han netop tager udgangspunkt i dette forhold – lysets forplantningshastighed i vakuum – i sin fysiske teori. I den forstand er Einsteins relativitetsteori langt fra relativ. Tværtimod: Ved at se på lysets hastighed i vakuum som en naturkonstant er det Einsteins fortjeneste at have fundet frem til et nyt fast udgangspunkt for beskrivelsen af enhver bevægelse i universet. Det gamle faste udgangspunkt for beskrivelsen af bevægelse skal vi søge hos Newton i hans antagelse om, at *fiksstjernehimlen er i hvile i forhold til al bevægelse i universet* og dermed absolut udgangspunkt for beskrivelsen af enhver form for bevægelse.

Denne antagelse viser sig imidlertid at være forkert. Ud over den parallakseændring, der kan konstateres i stjernehimlen, og som skyldes jordens egenbevægelse, viser det sig efterhånden, at der også kan konstateres andre bevægelser – reelle bevægelser – blandt stjernerne og galakserne indbyrdes. Allerede omkring 1750 begynder man så småt at blive klar over, at Mælkevejen ikke er det altomfattende medium for al bevægelse i universet, som Newton antager, men må være en galakse blandt andre galakser, hvilket betyder, at man må regne med forskydninger også blandt de himmellegemer, der befinder sig hinsides vores planetsystem. Derfor må Newtons antagelse opgives.

Men det er netop i diskussionen om, hvorvidt der er noget, man kan sætte i

⁹ Teorien er fremsat i to af i alt fire artikler fra året 1905 udgivet i *Annalen der Physik*, nemlig henholdsvis den tredje artikel "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" og den fjerde artikel "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" Da Einstein modtog Nobelprisen i 1921 var det ikke for disse to artikler – de var på det tidspunkt stadig for kontroversielle – men for den første artikel om den fotoelektriske effekt.

stedet for fiksstjernehimlen som fast udgangspunkt for beskrivelsen af den fysiske udformning af verdensrummet, og hvad det i givet fald skal være, at Einstein får sin idé om, at vi i stedet for at lede efter vores naturkonstant i relation til rummet, måske snarere bør lede efter denne konstant i relation til bevægelsen. Hvad lysets bevægelse angår, har man – selv om antagelsen er kontroversiel på det tidspunkt – allerede før Newton udgiver sin *Principia* ikke blot set teorier om, at lyset bruger tid til at forplante sig, men faktisk også søgt at beregne sig frem til denne tid. Det sker første gang ved den danske astronom Ole Rømer i 1676.¹⁰ Der er dog langt fra dette til at se lysets hastighed som en naturkonstant. Selv om der i dag ikke længere rejses tvivl om spørgsmålet, er det omkring 1900 stadig omstridt, hvorvidt lysets hastighed virkeligt kan betragtes som en naturkonstant.¹¹

Det, der for Einstein er tilløkkende ved at se lysets hastighed i vakuum som

¹⁰ Beregningen bygger på iagttagelser af Jupiters måne, Io, der set fra jorden tager længere tid om at passere gennem Jupiters skyggeside, når Jupiter fjerner sig fra jorden, end når den nærmer sig jorden. Af Rømers iagttagelser kan man beregne sig frem til, at lyset forplanter sig gennem rummet med en hastighed af ca. 225.000 km i sekundet. Tallet fremgår ikke af selve artiklen, som Rømer skriver på baggrund af sine iagttagelser – bl.a. mangler han et tal for jordens diameter for at kunne nå frem til sit tal – men fra noter og breve kan det estimeres, at det må være det resultat, han ville være nået frem til.

Lysets hastighed i vakuum måles i dag til 299.792.458 m i sekundet.

¹¹ Den væsentligste hindring for at se lysets hastighed i vakuum som naturkonstant er, at man opfatter lyset som elektromagnetiske bølger (i analogi med dannelse af vandbølger i vand og lydbølger i luft). Det betyder, at man mener det nødvendigt at give lyset et medium, en såkaldt æter, at bevæge sig gennem (svarende til vand eller luft), et medium, også jorden må tænkes at bevæge sig gennem, så der skabes en slags vind, en ætervind, som enten vil sinke eller fremskynde lysets bevægelse på jordoverfladen alt eftersom det bevæger sig med eller mod denne æter.

Gennem en sindrig eksperimentopstilling lykkes det imidlertid for Michelson og Morley i 1887 at vise, at lyset i hvert fald nær jordoverfladen udbreder sig med samme hastighed i enhver retning, hvilket afgørende svækker antagelsen om eksistensen af en sådan ætervind.

Einstein kender formentlig ikke til forsøget, da han udformer sin specielle relativitetsteori i 1905. For Einstein i 1905 betragtes lysets hastighed som naturkonstant alene som et postulat, motiveret af Maxwells elektromagnetiske teori, formentlig fordi han stadig mener, man mangler tilstrækkelig evidens for eksistensen af en ætervind. Under alle omstændigheder betyder Einsteins antagelse af lysets udbredelseshastighed som naturkonstant, at vakuum-begrebet igen kommer til at spille en afgørende rolle i fysikken, sådan som det – ud fra andre præmisser – havde gjort det hos Galilei.

naturkonstant, er nu ikke blot, at man kender til størrelsen af denne hastighed, men også, at lysets hastighed nu udmærker sig ved at repræsentere et grænsetilfælde for, hvor hurtigt man vil kunne indhente information om fænomenerne i universet. Der er dog ikke helt uden vanskeligheder at gøre lysets hastighed i vakuum til udgangspunkt for beskrivelsen af universet. Bevægelse er ifølge den klassiske newtonske fysik et sammensat begreb, i modsætning til de simple begreber tid og rum. Bevægelse foregår *i rum og gennem tid*. Så hvis man skal udnævne lysets hastighed i vakuum til grundlæggende naturkonstant, må det kræve en kraftig revision af tænkningen omkring tid og rum.

Men nu er det netop denne kraftige revision af vores tænkning omkring disse begreber, Einstein sætter sig for at gennemføre med sin specielle relativitetsteori. Resultatet heraf er, som vi skal se, det bemærkelsesværdige, at tid og rum for Einstein for det første ikke længere vil kunne opfattes som indbyrdes uafhængige dimensioner. Langt hen ad vejen vil de kunne opfattes således. Men nærmer en bevægelig ting sig lysets hastighed, må bevægelsen ifølge Einstein samtidig undergå såvel en *tidsforlængelse*, som en rumlig forkortning i bevægelsesretningen, en såkaldt *længdeforkortning*, hvor begge dele må indregnes i enhver redegørelse for den tidsrumlige identifikation af tingen.

Målet for tidsforlængelsen og længdeforkortningen finder Einstein i en ligning for forplantningen af elektromagnetisk stråling, de såkaldte *Lorentz-transformationer*, opstillet af den hollandske fysiker Hendrik Antoon Lorentz. Igennem 1800-hundredtallet er man i stadig stigende grad blevet overbevist om, at lys i virkeligheden er det samme som elektromagnetisk stråling af en bestemt bølgelængde, hvorfor vi i stedet for at tale om lys, lige så godt vil kunne tale om elektromagnetisk stråling.

Elektromagnetisme som fænomen bliver opdaget af den danske fysiker Hans Christian Ørsted i 1820, men får først sin mere præcise matematiske beskrivelse af den engelske fysiker James Clerk Maxwell i 1870'erne, og det er for en stor del den

sidstes forarbejde, de såkaldte *Maxwell-ligninger*, der danner grundlaget for de transformationer, Lorentz finder frem til – for rum allerede i 1895 og for tid i 1904.¹²

Rum:

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Tid:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Figur 4

hvor $\Delta x'$ er rumforkortningen, $\Delta t'$ er tidsforlængelsen, v er en given hastighed, og c er elektromagnetiske strålings eller – som vi vil fortsætte med at kalde det – lysets udbredeshastighed (c er her en forkortelse af det latinske *celeritas* hastighed). Mens Maxwell og Lorentz ikke har overvejelser om lysets udbredeshastighed som naturkonstant og som højeste hastighed for informationsudbredelse i universet¹³, er det

¹² Det er ikke Lorentz selv, men først Henri Poincaré, som endelig – i 1905, samme år som Einstein fremsætter sin specielle relativitetsteori – formaliserer transformationerne og gør dem til den konsistente helhed, vi kender i dag.

¹³ Maxwell og Lorentz, der begge er tilhængere af æterteorien, arbejder ud fra den newtonske mekaniks forudsætninger, hvor det er tilladt at addere hastigheder ubegrænset, og hvor der findes et absolut referencesystem for rummet. Derfor tjener Lorentz-transformationerne et helt andet formål hos Lorentz, end de gør hos Einstein. Det, Lorentz bruger sine transformationer til, er ikke at betvivle æterteorien, som Einstein gør, men tværtimod at redde denne teori set i lyset af resultatet af Michelson og Morleys eksperiment. Hans ræsonnement omkring længdeforkortningen angår direkte ætermediet: Ifølge Lorentz vil eksistensen af en ætervind presse de elektromagnetiske bølger, dvs. lyset, sammen, så bølgelængden bliver kortere i lysets bevægelsesretning. Men det er netop det, Lorentz mener at kunne

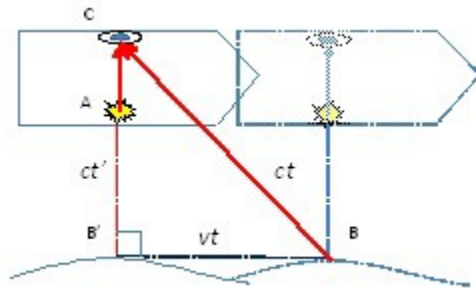
nu netop dette forhold, Einstein tager i betragtning. Det betyder, at ligningerne ikke længere blot rummer information om lysets udbredelseshastighed, men at de også er *et udtryk for selve universets form, sådan som det fremtræder for forskellige observatører, der kan befinde sig i større eller mindre afstand fra det observerede*. Lorentz-transformationerne tager udgangspunkt i det forhold, at hvis lysets udbredelse fra en lyskilde tager tid, vil der være forskel på det, vi ser som fjerne observatører, og det, observatører tæt på lyskilden ser. Og denne forskel må vi kunne beregne. Vi vil i det følgende se, hvordan Lorentz-transformationen for lys lader sig opstille ud fra de nye einsteinske præmisser (som på tilsvarende vis lader sig opstille for rum): Lad os tænke os, at der i en raket bliver udsendt et glimt fra en given lyskilde i raketens væg mod en skydeskive B placeret på den modsatte væg i raketten i raketens bevægelsesretning, og lad os tænke os, at nærobservatøren, A, er placeret ved lyskilden og fjernobservatøren, B, på jorden dybt under raketten vinkelret på raketens bevægelsesretning. Dette kan illustreres således:

tage højde for gennem sin transformation: Lorentz-transformationen for længdeforkortningen sikrer netop, at ætervindseffekten ophæves, så æterteoriens kan finde bekræftelse ved Michelson og Morleys eksperiment. Lorentz mener at kunne retfærdiggøre sin transformation gennem det velkendte forhold, som er bekræftet gennem Maxwell-ligningerne, at der altid vil finde en kontraktion sted af det elektromagnetiske felt i en ladning i bevægelse.

Lorentz æterteori indebærer den væsentlige fordel, at Newtons ide om en absolut rumlig målestok for udmåling af forhold i universet vil kunne fastholdes gennem en udskiftning af Newtons fiksstjernehimme med en i sig selv hvilende, altomfattende æter.

Der er dog to store problemer i Lorentz' æterteori: For det første er lyshastigheden altid afhængig af et forplantningsmedium – først og fremmest lokalt af forskellige faste og flydende stoffer, fx glas eller vand, men også helt generelt af den postulerede i sig selv hvilende, altomfattende æter. Den kan dermed ikke gives status af medie-uafhængig naturkonstant. For det andet er længdeforkortningen ikke retningsuafhængig: Den er altid bestemt af ætervindens bevægelsesretning.

Begge de sidste problemer finder vi ikke i Einsteins specielle relativitetsteori: Her er lysets hastighed altid givet *som naturkonstant*. Og længdeforkortningen og tidsforlængelsen altid virksom *i alle retninger*.



Figur 5

Vi kan nu se, at hvis raketten bevæger sig vejen vt , hvor v er hastigheden og t tidsrummet, raketten bevæger sig i, vil begivenheden, hvor lysstrålen rammer skydeskiven, kunne ses af B efter ct' og af A efter ct minutter, hvor c er lysets hastighed i vakuum. Da vinklen mellem vt og ct' er ret, vil vi uden videre kunne anvende pythagoras' læresætning til at beregne $t' - t$, som vil være tidsforlængelsen:

$$B'C^2 + B'B^2 = CB^2$$

$$B'C^2 = CB^2 - B'B^2$$

$$c^2 \Delta t'^2 = c^2 \Delta t^2 - v^2 \Delta t^2$$

$$c^2 \Delta t'^2 = (c^2 - v^2) \Delta t^2$$

$$\Delta t'^2 = \Delta t^2 - \frac{v^2}{c^2} \Delta t^2$$

$$\Delta t'^2 = \Delta t^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Figur 6

Som vi kan se, danner Lorentz-transformationerne – her transformationen for tid, jf. figur 6 – et afgørende element i Einsteins relativitetsteori. Som det fremgår af formlen, vil tidsforlængelsen $t - t'$, eller $\Delta t'$, spille en stadig større rolle og nærme sig uendeligt, jo mere hastigheden begynder at nærme sig lysets hastighed; det samme gælder for rumforkortningen $\Delta x'$, som følger umiddelbart af, at $\Delta t = \frac{v}{\Delta x}$ og $\Delta t' = \frac{v}{\Delta x'}$:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Figur 7

Det, at der nu er en sammenhæng mellem rum og tid, givet ved det forhold, at informationen er afhængig af naturkonstanten lysets hastighed i vakuum, betyder, at der introduceres et nyt tankesæt i naturbeskrivelsen. Hos Aristoteles, Galilei og Newton – og hos den tyske filosof Immanuel Kant (jf. Kant (2002 (1781), Først afdeling: Den transcendentale analytik). – bliver tid og rum, som vi har været inde på, opfattet som *dimensioner, defineret uafhængigt af hinanden*. Efter Einstein gælder det ikke længere. Her vil man ikke længere kunne tale om tiden som en selvstændig dimension stillet over for rummet som en tre-dimensionel manifold. I dag vil man i stedet kun kunne tale om tid

og rum som en *fire-dimensionel manifold* (også kaldet et Minkowski-rum, beskrevet af Minkowski i 1907).

Men det er i og for sig blot en simpel konsekvens af det, vi må se som Einsteins egentlige bidrag til fysikken, nemlig *erkendelsen af, at det ikke blot er den fysiske natur af den verden, vi undersøger, vi må tage hensyn til, men også den fysiske natur af de redskaber, vi skal bruge, for at kunne foretage denne undersøgelse.*¹⁴ Det indebærer helt konkret for Einstein: Vil vi have pålidelig information om verden, må vi inddrage den tid, lyset er om at forplante sig gennem rummet, med alle de forlængelser og forkortelser af det målte, det giver os. I forbindelse med sin kritik af Aristoteles har vi set Galilei indføre begrebet om, at den fysiske forklaring er underlagt princippet om superposition. Begrebet betyder, som vi har set, at alle afvigelser fx fra faldloven vil kunne ses som lokale afvigelser: "Grunden til, at kuglen ikke følger faldloven 100%, hvilket er det ideale, er, at der i eksperimentet forekommer friktion mellem kuglen og den sliske, den triller nedad, som derfor først skal modregnes osv., osv." Men er det nu ikke derfor muligt – kan man spørge sig selv – at opfatte lysets hastighed på samme måde som friktionen ved tyngdekraften som en blot lokal afvigelse fra muligheden for at se tid og rum som ideale former? For så vidt er der ikke noget i vejen herfor. Det er faktisk det, Kant gør, når han

¹⁴ En anden og mere graverende fysisk restriktion finder vi i øvrigt inden for kvantefysikken: Her betyder det forhold, at vi må anvende elektromagnetisk strålingsenergi – fx i form af lys – til at bestemme en elementarpartikels, fx en elektrons, position, at vi ikke kan nå frem til nogen fuldstændig bestemmelse af denne position. For det første eksisterer der en undergrænse for, hvor megen energi en lysstråle kan rumme, svarende til Plancks konstant. Men omvendt giver energi også generelt en dårlig positionsbestemmelse, som man ikke vil kunne kompensere for ved blot at øge mængden af energi. Øger vi nemlig energien, er der risiko for, at den forøgede mængde energi giver elementarpartiklen så megen impuls, at den får elementarpartiklen til at "flytte" sig, så vi ad den vej får en dårligere positionsbestemmelse.

Inden for den såkaldte københavnerinterpretation mener man, at det med denne komplementaritet mellem position og impuls, som der her er tale om, drejer sig om et principielt træk ved verdens fysiske natur, som man ikke vil kunne distancere sig fra gennem introduktion af forbedrede målemetoder eller beregningsteknikker: Vi vil aldrig kunne slippe for målemetoder og -apparater. Derfor vil det heller ikke være muligt at slippe for den fysiske tilstedeværelse af – og dermed den fysiske påvirkning udgående fra – disse målemetoder og -apparater.

betragter tid og rum som syntetiske apriori anskuelsesformer, dvs. som anskuelsesformer, der *uafhængigt af et hvilken som helst empirisk forhold* foreskriver os, hvordan tingene i verden nødvendigvis må gestalte sig. Her – i lyset af disse anskuelsesformer – vil vi sagtens kunne forestille os situationer, der ligger så langt væk i tid og rum, i princippet uendelig langt væk, at vi ikke vil kunne bruge lyset til at fortælle os noget om dem. Imidlertid må det blive ved en eller anden form for genstandsløs anskuelse – i hvert fald så længe det ikke lykkes os at finde noget fænomen, der er i stand til at bevæge sig hurtigere gennem tid og rum end lyset, endsige uendeligt hurtigt. Men det er netop hele præmissen for den einsteinske fysik: Ikke, at det ikke er logisk eller metafysisk umuligt at tænke sig uendelige hastigheder og dermed tid og rum som selvstændige anskuelsesformer; men at det er fysisk, dvs. empirisk, umuligt at materialisere denne tænkning.¹⁵

Men i den forstand er den einsteinske tænkning stadig underlagt såvel Galileis princip om superposition som Kants begreb om tid og rum som indbyrdes uafhængige kategorier: Princippet om superposition gælder stadig hos Einstein, sådan som det kan udledes af samspillet mellem verdens kausale indretning og så vores mulighed for at

¹⁵ Efter den udbredte anerkendelse af Big Bang-teorien hører man det ikke sjældent fremført som et særligt markant udtryk for relativitetsteoriens besynderlighed og paradoksalitet, at tid og rum ikke skulle kunne eksistere hinsides Big Bang. Det er imidlertid forkert, eller i hvert fald er der tale om en utilstrækkelig formulering, som alene har til formål at forvirre omkring, hvad der er på spil i teorien: Selvfølgelig er der ikke noget i vejen for, at "tid" og "rum" vil kunne have eksistens hinsides Big Bang. Først og fremmest vil vi sagtens kunne tænke os til de to dimensioners eksistens hinsides Big Bang i kraft af vores a priori anskuelsesformer (Kant (op.cit.)). Selve vores forestilling om 'Big Bang' forudsætter faktisk normalt, at vi betjener os af disse anskuelsesformer i form af forestillingen om en eksploderende kugle – *iaagttaget udefra, altså hinsides det målbare rum og den målbare tid.*

Restriktionerne for tid og rum, som de kommer til udtryk i Einsteins relativitetsteori, er alene af empirisk-stoflig art, bundet til lysets hastighed som naturkonstant. Men faktisk er det ikke blot i den forstand muligt at operere med et rum hinsides rummet for det hidtil kendte stoflige univers, og hastigheder hinsides lysets hastighed. Nogle mener rent faktisk at have fundet evidens for eksistensen af rum og hastigheder, der ligger hinsides Big Bang. Som et eksempel på det sidste kan nævnes, at forskere ved OPERA-projektet i Gran Sasso-Laboratoriet i Italien samt i CERN i Schweiz i en rapport fra 2011 mener at have fundet en partikel, som bevæger sig hurtigere end lyset. Cf. i øvrigt Kleyn 2012.

udføre handlinger, der tager højde for denne indretning. Og også Kants begreb om tid og rum, hvor disse kategorier ses som indbyrdes uafhængige a priori anskuelsesformer, gælder stadig, nemlig under den – ganske vist kontrafaktiske, men stadig helt igennem gennemskuelige – betingelse, at vi har at gøre med instantan informationsudbredelse i universet.

Nu gælder Einsteins specielle relativitetsteori fra 1905 kun for inertialsystemer, der ikke ændrer hastighed i forhold til hinanden. I 1915 udvider Einstein imidlertid sin relativitetsteori med den såkaldte *generelle relativitetsteori* (Einstein 1961), der også gælder for inertialsystemer, der ændrer hastighed i forhold til hinanden. En bemærkelsesværdig konsekvens af denne nye teori er, at gravitation (massetiltrækning) og geometrisk krumning – eller kurvatur – i virkeligheden må anses for at være *ækvivalente* udtryk for samme fysiske fænomen, nemlig tingenes indbyrdes bevægelse i forhold til hinanden (ækvivalensprincippet).

Men hvordan hænger det egentlig sammen?

Lad os se på forholdet: Lyset er ren energi og har derfor ingen masse, et forhold, som allerede Newton går ud fra i sin teori, og som er indkalkuleret i den specielle relativitetsteori gennem ækvivalensen:

$$E = mc^2$$

Figur 8

Denne ækvivalens, hvor energi tilsvare masse gange kvadratet på lysets hastighed i vakuum¹⁶, er i virkeligheden en simpel beregningsmæssig konsekvens af Lorentz-

¹⁶ Formlen $E = mc^2$ forekommer ikke i skrifterne fra 1905. Her udtrykkes selve ækvivalensen i ord, og størrelserne E og c ved bogstaverne L og V : "Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verringert sich seine Masse um L/V^2 ." (Afgiver et legeme energien L i form af stråling, formindskes dets

transformationerne (hvor E står for energi, m står for (inerti)-masse og c står for lysets hastighed).¹⁷

masse med L/V^2).

¹⁷ Dette er grunden til, at omsætteligheden mellem E og m er givet ved c^2 . Som vi kan se af formelen i Figur 8, indgår c^2 i Lorentz-transformationerne, både den for tidsforlængelsen og den for længdeforkortelsen, nemlig som en del af koefficienten:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

også kaldet *Lorentz-faktoren*. Som man endvidere kan se, involverer Lorentz-faktoren i sig selv hverken energi eller masse. Ikke desto mindre har Lorentz-faktoren indflydelse på disse to fysiske størrelser. Det hænger sammen med det forhold, vi tidligere har været inde på, nemlig at tid og rum ikke er selvstændige dimensioner i den specielle relativitetsteori. Ved lave hastigheder, hvor v nærmer sig 0, og dermed også v^2/c^2 , kan Lorentz-faktoren (ved Taylorserie-ekspansion) approksimativt omskrives til:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}v^2/c^2}$$

Denne form vil være af vigtighed ved udledningen af formelen $E = mc^2$.

I de fleste kommentarer til formelen $e = mc^2$ i oversigtsværker o.l., selv de større, fremgår det ikke, hvordan Einstein er nået frem til denne formel. Det er utilfredsstillende, i hvert fald for den videbegærlige. I det følgende præsenteres derfor i koncentreret form en udledning af formelen.

I den newtonske mekanik er et legemes impuls p defineret ved formelen:

$$p = mv,$$

hvor v er legemets hastighed, og m er dets masse. Ligningen udtrykker, at jo tungere et legeme, fx en sten, er, og jo højere hastighed, det har, jo større indvirkning vil det have på et andet legeme ved kontakt med dette legeme, fx hvis vores sten rammer en rude. Ifølge Newtons 2. lov svarer kraften F til impulsens ændringsgrad. At sige, at m holdes konstant, vil være det samme som at sige, at kraften F er lig med m gange impulsens ændringsgrad, hvor impulsens ændringsgrad vil kunne sættes lig med accelerationen a , altså:

$$F = ma.$$

Ud fra denne ligning kan vi slutte, at hvis vi til stadighed tilfører et legeme kraft, så vil accelerationen af legemet fortsætte i det uendelige, og legemets hastighed vil følgelig kunne blive uendelig stor. Sådan vil det i hvert tilfælde være tilfældet i den newtonske mekanik.

I den specielle relativitets-teori tillades en sådan hastighedsforøgelse imidlertid ikke: Her vil vi, som vi har set det, ikke kunnet overskride lysets hastighed. Det betyder igen, at vi i virkeligheden

må relativisere enhver hastighed til lysets hastighed med de tidsforlængelser og længdeforkortelser, det indebærer, sådan som det er udtrykt ved Lorentz-faktoren, $F = \gamma ma$.

Iden newtonske mekanik kan masse have energi enten i form af potentiel energi (beliggenhedsenergi) eller i form af kinetisk energi (bevægelsesenergi). Men energi kan ikke restløst ækvivalere med masse, og masse ikke restløst med energi. Det tillader derimod formlen $E = mc^2$.

Men hvad får nu Einstein til at tillade en så radikal ækvivalens? Svaret skal vi finde i det forhold, at lys kan studeres dels som *elektromagnetisk bølgefænomen*, hvor det foreligger som ren energi – det er sådan, fænomenet er blevet anskuet fra Ørsted over Faraday og Maxwell til Lorentz – dels som *relativistisk masse* inden for en mekanisk ramme, hvor vi kan møde det som små massepakker, *fotoner*, op-accelereret til (næsten) lysets hastighed, hvor den lorentzske tidsforlængelse og rumforkortning bliver mærkbar. Det er denne dobbeltbestemmelse, der får Einstein til at opstille sin ækvivalensrelation mellem energi og masse i sin formel, således at man slet og ret vil kunne opfatte lys som det toppunkt for acceleration, hvor al masse er blevet til energi.

Men hvorfor c^2 i formlen $E = mc^2$ og ikke fx c eller en hvilken som helst anden hastighed?

Her kommer Lorentz-faktoren ind i billedet. I sin tredje artikel fra 1905, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", opererer Einstein med en såkaldt hvilemasse m_0 , der skal opfattes som en masse i hvile i relation til et givet referencepunkt, hvor en given relativistisk masse m er defineret relativt til m_0 ved ligningen $m = \gamma m_0$. Ud fra dette fås E' et i formlen $E = mc^2$ ved at gøre impulsen $p = mv$ relativistisk: $p = \gamma m_0 v$. I de tilfælde hvor $v = 0$, er også $p = 0$.

Vi har da, at legemet er i hvile og har massen m_0 . Bevæger vi nu legemet, vil det øge sin masse, så det nu relativistisk vejer:

$$m_v = \gamma m_0 \dots$$

Jo lavere hastighed, jo mere vil γ nærme sig 1, og m_v nærme sig m_0 . Hvis vi nu "pakker" γ "ud", får vi:

$$m_v = \frac{m_0}{1 - \frac{1}{2}v^2/c^2}$$

Da $\frac{1}{2}v^2/c^2$ er meget lille ved lave hastighed, kan vi igen approksimativt, nu ifølge formlen $n_1/1 - n_2 = n_1(1 + n_2)$ omskrive udtrykket til:

$$m_v = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) = m_0 + \frac{1}{2}m_0 v^2/c^2$$

Vi får da:

$$m_v c^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2}m_0 v^2$$

Nu vil vi kunne se alle tre udtryk i formlen, dvs. " $m c^2$ ", " $m_0 c^2$ ", og " $\frac{1}{2}m_0 v^2$ ", som udtryk for energi. Lad os se, hvordan: Energi findes i to former, nemlig dels som (umiddelbart iagttagelig) bevægelig energi (*kinetisk energi*), dels som beliggenhedsenergi (*potentiel energi*). Ifølge den newtonske mekanik er den kraft, F , man må tilføre et legeme for at øge dets hastighed, lig med produktet af det pågældende legemes masse

Ifølge Newton og ifølge ækvivalensen i Figur 8 bliver lys ikke tiltrukket af de masseansamlinger, det passerer. Dvs. lys udbreder sig retlinet. Bruger man lys som informationskilde, når man skal foretage undersøgelser i rummet, aftegner det derfor ifølge Newton et euklidisk rum med en given massefordeling. Men her vil enhver acceleration nu ifølge Newtons bevægelseslove og det einsteinske ækvivalensprincip være udtryk for en ændret massefordeling i rummet. Samtidig vil det være udtryk for en afbøjning af lyset og dermed for en krumning af det rum, lyset bevæger sig igennem, jf. de to raketter i figur 9, hvor den øverste raket får tilført brændstof og derved kommer i acceleration, så lysstrålen her krummer som udtryk for raketens acceleration:

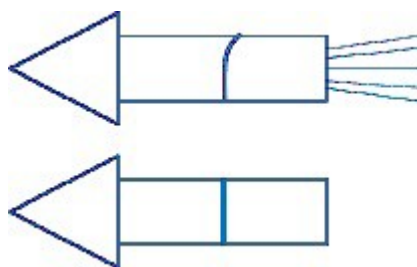
og accelerationen af det, dvs. $F = ma$. Det er allerede nævnt ovenfor. Men dermed kan kraften ses som det påvirkede legemes kinetiske energi efter kraftpåvirkningen. Da accelerationen af et legeme er eksponentielt afledt af hastigheden, må enhver repræsentation af det hastighedsbegreb, der indgår i accelerationsbegrebet, være opløftet i anden potens. Men da alle tre udtryk ovenfor tilfredsstiller dette krav, må alle tre udtryk derfor netop kunne ses som udtryk for energi.

Men er det tilfældet, kan ligningen nu læses på følgende vis: Hvad udtrykket " m_0c^2 " angår, vil dette udtryk umiddelbart kunne læses som den relativistiske masses energi, som vi derfor definatorisk vil kunne sætte lig E (for (relativistisk) energi). Men dermed vil udtrykket " $\frac{1}{2}m_0v^2$ " ovenfor umiddelbart kunne aflæses som den mængde kinetisk energi, som skal påføres massen m_0 , dvs. massen i hvile, for at bringe den op på hastigheden m_v . Da energistørrelsen her er meget lille ved lave hastigheder, vil man i disse tilfælde kunne se bort fra den. Ligeledes vil størrelsesforskellen mellem den relativistiske masse og hvilemassen være forsvindende lille ved de lave hastigheder, vi normalt kender til, hvorfor vi vil kunne sætte de to massebegreber lig hinanden. Vi får da netop den formel, vi har søgt, hvor ækvivalensen sættes mellem energi og masse:

$$E = mc^2$$

Men hermed kan vi netop svare på det indledende spørgsmål om, hvorfor der står c^2 i formlen $E = mc^2$, og ikke fx c eller en helt tredje faktor. Svaret er simpelthen, at det stammer fra det c^2 , der indgår i Lorentz-faktoren.

Det er vigtigt, at man gør sig klart, at formlen $E = mc^2$ ikke er præcis, men er udtryk for en tilnærning: Den er mest præcis, når udgangspunktet er en masse i hvile, eller når vi har med hastigheder at gøre, som er forsvindende små i forhold til lysets hastighed. Men jo mere afstanden mellem hvilemasse og relativistisk masse øges, jo mere vil tilnærningerne gøre sig gældende som forstyrrende fejlkilder.



Figur 9

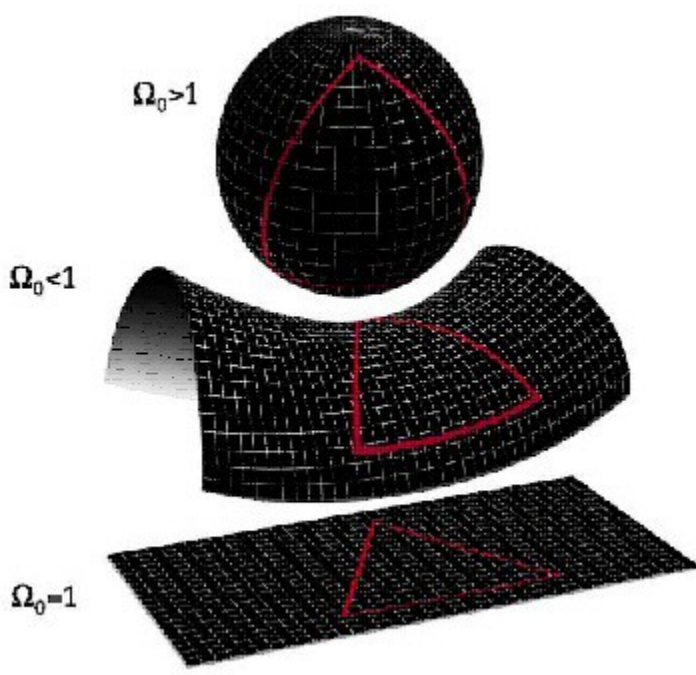
Selv om lyset ikke selv er påvirket af massefordelingen i rummet – lys er uden masse – er ændringen af massefordelingen i rummet ikke desto mindre et udtryk dels for en bevægelse af det stof, vi skal modtage informationer fra via lysstrålen, dels for at lyset bruger en vis tid om at nå tværs gennem raketens indre. Ændrede massefordelinger i konsekvens af den acceleration, der finder sted, vil dermed manifestere sig som krumninger af lysets bane. Og krumningen vil blive mere og mere udtalt, jo nærmere hastigheden af det inertialsystem, accelerationen finder sted i, kommer på lysets hastighed og forholdene i inertialsystemet dermed fremtræder forkortede.

Det afgørende skridt i forståelsen af, hvilken betydning det har for udmålingen af rummet, at lyset krummer, er her selvfølgelig, at man bliver klar over, at *det i virkeligheden er selve rummet, der krummer, når lyset krummer, og ikke blot en given bevægelse i rummet*. Der er med andre ord ikke blot tale om, at vi kan se lyset bevæge sig igennem et eller andet vilkårligt rum i en krum bane. Det ville være at give sig selv et referencesystem uden for lyset, i forhold til hvilket lysets bevægelse ville kunne måles som krumt. Men et sådant referencesystem vil vi netop ikke kunne skaffe os. *Lyset med dets fysiske egenskaber, og med de påvirkninger, det udsættes for, vil hele tiden være selve det reference-system, vi skal plote bevægelserne ind på.*

Derfor er gravitation og krumning to ækvivalente udtryk ikke blot for de givne

fysiske forhold, vi skal måle, men netop for selve de reference- eller inertialsystemer, vi skal måle de fysiske forhold i.

Referencesystemer med forskellige grader af krumning er især undersøgt af de to matematikere, russeren Nikolai Lobachevsky og tyskeren Bernhard Riemann. Under en forelæsningsrække i 1890 (jf. Riemann 1990) annoncerer Riemann sin tese om, at der findes *to overordnede typer geometri*. I den første type er udgangspunktet forestillingen om, at rummet i stedet for nødvendigvis at være et tredimensionelt euklidisk rum, også vil kunne være et todimensionelt krumt rum. Det giver tre mulige delgeometrier inden for den første gruppe geometrier: Rummet kan krumme positivt ($\Omega_0 > 1$). Så har vi en såkaldt *elliptisk geometri*. Det kan krumme negativt ($\Omega_0 < 1$). Så har vi en såkaldt *hyperbolsk geometri*. Og endelig kan det have en krumningskoefficient på 1, hvor vi så vil have en *euklidisk geometri*, jf. Figur 10:



Figur 10

De tre typer geometri afslører bl.a. følgende afgørende forskelle: Mens det gælder, at ingen linjer i en elliptisk geometri vil kunne være parallelle, og ingen trekanter vil kunne have vinkelsummer, der er større end 180° , vil vi i en hyperbolsk geometri altid omvendt kunne finde flere parallelle linjer til en hvilken som helst linje gennem et vilkårligt punkt uden for linjen, og vinkelsummerne her vil altid vil vise sig at være større end 180° . Endelig vil der altid kun gå én parallel linje gennem et vilkårligt punkt i en euklidisk geometri, og vinkelsummen her vil altid vise sig at være præcis 180° .

Nu har de geometrier, vi har præsenteret i det foregående, som sagt alene været geometrier for det tredimensionelle rum. I den næste type geometrier tænker vi os imidlertid rummet udvidet, så det *i stedet for at fremstå som et tredimensionelt fremstår som et firedimensionelt rum*. Her beskriver den euklidiske delgeometri nu, hvad vi tidligere har været inde på, et såkaldt *Minkowski-rum*, mens de tilsvarende rum for de elliptiske og hyperbolske geometrier beskriver henholdsvis et såkaldt *de Sitter-rum* (beskrevet af hollænderen Willem de Sitter i 1917; en beskrivelse uafhængig af den, de Sitter har foretaget, kan findes hos italieneren Tullio Levi-Civita, ligeledes fra 1917) og et såkaldt *anti-de Sitter-rum* (foreslået af den argentinske fysiker Juan Maldacena i 1997).

Hvilken krumningsgrad universet som helhed besidder, er i Einsteins almene relativitetsteori et spørgsmål, der alene kan afgøres lokalt. Einsteins teori er en *feltteori*, ligesom Maxwells teori er det.¹⁸ Og feltteorier vil altid have et *lokalistisk fundament*: Dvs. feltets effekt vil altid være bestemt af punktet, det umiddelbart er organiseret omkring, og effekten manifesterer sig altid "redest" omkring dette punkt. Det vil netop sige, at alle faktorer, der bestemmer en partikels bane, bliver udmålt omkringetsådantpunkt, dvs. lokalt. Det betyder også, at resultatet af mødet med andre

¹⁸ Et moderne standardværk – læst af generationer – til indføring i feltteori er Landau & Lifshitz (1971 (1951)).

partikler på tilsvarende vis vil blive udmålt lokalt. Men da en lyspartikels bane er en sum af alle sådanne lokale udmålinger, l, l, l, l, \dots , vil dermed også *det samlede globale krumningsmål for universet være et resultat af alle disse lokale udmålinger*. Det vil dermed sige, at det i virkeligheden vil være et empirisk spørgsmål, om rummet er et Minkowski-rum, et de Sitter-rum eller et anti-de Sitter-rum.¹⁹

Alle tre firedimensionelle geometrier har været fremført som hypoteser om universets globale (gennemsnitlige) form: Er der tale om en *positiv geometri* (et de Sitter-rum), er det udtryk for, at universet er i færd med at trække sig sammen. Er der tale om en *negativ geometri* (et anti-de Sitter-rum), er det udtryk for, at der er i færd med at udvide sig. Og er der endelig tale om en *euklidisk geometri* (eller rettere: et Minkowski-rum), er det udtryk for, at universet hverken udvider sig eller trækker sig sammen, men i stedet vil bevare sin nuværende størrelse.

Med den generelle relativitetsteori er det blandt andet muligt at redegøre for visse anomalier i Merkurs omløb omkring solen set i forhold til Newtons love. Det er den første mere direkte eksperimentelle bekræftelse af den generelle relativitetsteori, som det lykkes den engelske fysiker Arthur Eddington at foretage allerede i 1919, hvor han i forbindelse med en total solformørkelse konstaterer en vis afbøjning af lyset fra de stjerner, som – set fra iagttagelsesstedet på jorden – sender deres lys tæt forbi solen. Her fungerer solen som en slags gravitationslinse. Ud over denne bekræftelse af teorien er det ellers småt med direkte eksperimentelle og observationelle evidenser for teoriens holdbarhed, hvilket i og for sig blot vidner om teoriens stærkt kontrafaktiske status: De fleste gravitationsfelter, vi kan iagttage og dermed bære brug af for en direkte bekræftelse af teorien, er generelt ret svage.

¹⁹ Som for den specielle relativitetsteoris vedkommende vil der også for den generelle relativitetsteoris vedkommende være tale om muligheden for en idealisering af rum og tid i retning af et rum og en tid fuldstændigt tømt for empirisk indhold. Her vil rummet i givet fald netop antage form af et Minkowski-rum.

Yderligere præcisionsmålinger fra 1959 og frem giver dog en vis yderligere bekræftelse af teorien. Og fra 70'erne begynder man også i lyset af iagttagelsen af pulsarer samt ud fra antagelsen om eksistensen af sorte huller i universet at skabe mere solid – omend stærkt indirekte – evidens for den generelle relativitetsteori.

En række faktorer skal lægges til, før vi kan besvare det store kosmologiske spørgsmål om universets udviklingshistorie. Accepteres Big Bang-teorien, rejser spørgsmålet sig om, hvorvidt universet vil ende i et big crunch, eller om det vil fortsætte med at udvide sig uendeligt. Det er stadig et uafklaret spørgsmål.

Hvilket svar der end vil være det rigtige svar, så er det uomtvisteligt, at vi med Einsteins almene relativitetsteori under alle omstændigheder har med en epokegørende og gennemgribende landvinding inden for fysikken at gøre, en landvinding, der, selv om den står på ryggen af de landvindinger, Galileis og Newtons arbejder står for, uden videre tåler sammenligning med disse. Udgangspunktet for den almene relativitetsteori er – som vi har set – en række tillægsrefleksioner angående lyset, som Einstein gør sig ud over refleksionerne i den specielle relativitetsteori: Mens den specielle relativitetsteori er udtryk for den tanke, at alle målestokke må underordne sig den kendsgerning, at lyset som kilde til den hurtigste informationsudbredelse bruger tid på at forplante sig, er den almene relativitetsteori herudover udtryk for den yderligere tanke, at denne stråling også har relation til masse, og dermed lader sig krumme og afbøje i samspil med denne masse. Det, der ikke mindst bidrager til at gøre de to relativitetsteorier, Einstein står for, til lige så store landvindinger inden for fysikken som Galileis og Newtons teorier, er, at de fremstår som den ultimative konsekvens af den metaerkendelse, at grænsen mellem vores erkendemuligheder, hvad angår tid, rum og kausalitet, og det, vi erkender i kraft af disse erkendemuligheder, ikke længere vil kunne opretholdes.

Det kan i en vis forstand virke ejendommeligt, at Einsteins teorier betegnes som

relativitetsteorier. I virkeligheden signalerer Einstein jo som allerede nævnt en absolut grænse for den relativitet, Galilei introducerede med sine inertialsystemer. Ganske vist er den afhængighed, Einstein påviser mellem alle inertialsystemer i sin specielle relativitetsteori, relativ til lysets hastighed. Men lysets hastighed, som alle inertialsystemer er relateret til, er ikke i sig selv relativ. Lysets hastighed er, som vi har set, netop en naturkonstant og i den forstand et absolut.

Nu er der imidlertid en vigtig forskel mellem Galileis initialsystemer og de initialsystemer, der tager hensyn til lysets hastighed som naturkonstant. Galileis initialsystemer involverer en række idealiseringer, og er i den forstand ikke-empiriske, mens lysets hastighed – som grænse for bevægelse – er en simpel empirisk kendsgerning. Men netop dette forhold lægger restriktioner på, hvordan de forskellige initialsystemer kan opføre sig over for hinanden. Det gør det derfor rimeligt at tale om en ny og anden form for relativitet i forbindelse med Einsteins relativitetsteorier, en relativitet, der består i, at alle initialsystemer er relateret til hinanden via den hastighed alle er underlagt relativt til lysets hastighed.

8. Konklusion

Selvom man måske ikke umiddelbart skulle tro det, når man ser på, hvilke enorme ændringer i detaljen teorierne om den fysiske virkelighed har gennemgået, så er fysikkens historie ikke desto mindre et klart vidnesbyrd om, at verden ikke blot kan ses som en menneskelig konstruktion. Der synes faktisk at være al mulig grund til at tro, at verden må eksistere uafhængigt af, om vi perciperer den, handler i den og taler om den eller ej. Ganske vist er der betragtelig forskel på, hvad Aristoteles i sin tid kunne meddele om den fysiske verden, og hvad vi i dag kan få at vide om denne verden på baggrund af Einsteins bestræbelser på at ville give et retvisende billede af den. Men som vi har set, er fysikkens historie ikke en historie om uforenelige paradigmer, sådan som den

amerikanske videnskabsteoretiker Thomas Kuhn (1973 (1962)) har hævdet det. Man kan måske fristes til at tale om overgangen fra Aristoteles til Galilei som så radikal, at det berettiger til talen om et egentligt brud. Men for det første er der med den aristoteliske og den moderne fysik ikke tale om to ligeværdige paradigmer, men om en situation, hvor det ene paradigme danner en direkte forkert og det andet en relativ korrekt, omend ufuldstændig, opfattelse af, hvordan den fysiske virkelighed ser ud. Og for det andet er der, hvad overgangen fra Galilei til Newton og fra Newton til Einstein angår, på ingen måde tale om uforenelige paradigmer, men i virkeligheden om, at det senere paradigme støtter sig på det tidligere – så at sige vokser ud af det. Her repræsenterer de senere teorier ikke en forkastelse af de tidligere teorier, men integrerer i virkeligheden de første i sig som et specialtilfælde af en mere omfattende teoridannelse. Således repræsenterer Newtons gravitationsteori en simpel udvidelse af anvendelsesområdet for beregning af gravitationsfænomener fra området af materielle genstande i jordens umiddelbare nærhed til området af alle materielle genstande i universet overhovedet. Og tilsvarende for Einstein i forhold til Newton: Mens Newtons mekanik kun gælder for hastigheder, der ligger langt fra lysets forplantningshastighed i vakuum, gælder Einsteins mekanik herudover også for alle hastigheder i universet overhovedet såvel i inertialsystemer, der bevæger sig jævnt retlinet i forhold til hinanden inden for samme overordnede inertialsystem (den specielle relativitetsteori), som i inertialsystemer, der bevæger sig med ujævn hastighed – dvs. accelererende – i forhold til hinanden (den almene relativitetsteori).

Alt dette synes med overvældende kraft at vise, at verden eksisterer uafhængig af, hvad vi som mennesker måtte finde ud af om den. Under alle omstændigheder er vores verden, sådan som de naturvidenskabelige landvindinger har vist os, på ingen måde relativ. Det vil være meget vanskeligt at se verden som et blot og bart konstrukt, som et produkt alene af vores tankevirksomhed, sådan som det længe har været på mode at hævde blandt mere postmodernistisk orienterede filosoffer og videnskabsteoretikere.

Tværtimod tvinger udviklingen inden for naturvidenskaben os til at indse, at den fysiske verden er reel, og at den er uafhængig af vores bevidsthed. Ganske vist er vores viden ikke i alle detaljer udtømmende for, hvad der er værd at vide om verden. Og faktisk vil der stadig være mulighed for, at de teorier, vi nu kender til, i virkeligheden vil vise sig at være specialtilfælde af endnu mere generelle teorier. I den forstand ligger verden for så vidt stadig åben. Men det betyder ikke, at det ikke stadig må gælde, at der kun er én verden at forholde sig til.

At der med enhver ny grundliggende viden vil være tale om en udvidelse af vores hidtidige viden – og aldrig om en forkastelse af den – synes at ligge fast: Intet af det, vi ved, vil slet og ret kunne dementeres, således som man faktisk med en vis ret vil kunne sige, at Galilei dementerede Aristoteles. Det er vigtigt at indse, at Aristoteles slet og ret tog fejl angående verdens fysiske indretning, mens Galilei, Newton og Einstein ikke gjorde det. Med de tre enestående moderne fysikers teorier har vi én gang for alle fået sikret os – og vil i virkeligheden altid have sikret os – at der vil være et fast afsæt for enhver ny teoridannelse inden for fysikken.

Litteratur

- Aristoteles (1964; 350 f.kr.) 'Kosmologi (Om universet)', In: *Skrifter* (Med indledning, oversættelse og noter af Annfin Stigen). København: Berlingske forlag: 68-73.
- Aristotle (1995; 1. udg. 1984) *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation, Vol. I & II* Edited by Jonathan Barnes. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Bacon, Francis (2007; 1. udg. 1620) *Novum Organum*. København: Forlaget ANIS.
- Bais, Sanders (2007) *Very Special Relativity: An Illustrated Guide*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Baron, Margaret E. (1969) *The origins of the infinitesimal calculus*. Pergamon Press, Oxford-Edinburgh-New York.
- Copernicus, Nicolaus (2004; 1. udg. latin 1543) *On the Revolutions of Heavenly Spheres*. Philadelphia & London: Running Press Book Publishers.
- Einstein, Albert (1961; 1. udg. tysk 1915) *Relativity: The Special and the General Theory* (Authorized Translation by Robert V. Lawson). New York: Three Rivers Press.
- Einstein, Albert (2005; 1. udg. tysk 1905) *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Euklid (1912; 325 f.kr.) *Elementer I-XIII* (Oversat af Thyra Eibe, Gyldendal 1897-1900). København: Gyldendalske Boghandel, Nordisk Forlag.
- Galileo, Galilei (2005; 1. udg. italiensk 1632) *Dialogues Concerning Two New Sciences: (Stephen Hawking editor)*. Philadelphia & London: Running Press Book Publishers.
- Hume, David (2010 (1748)) "En undersøgelse af den menneskelige forstand", David Hume: *undersøgelser: erkendelsesteori og moralfilosofi*. København: Informations Forlag:53-244.
- Kepler, Johannes (2002; 1. udg. latin 1617-1618) *Harmonies Of The World, Book Five: Edited, with Commentary by Stephen Hawking*. Philadelphia & London: Running Press Book Publishers.
- Kant, Immanuel (2002 (1781)) *Kritik af den rene fornuft*. København: Det lille forlag.
- Kleyn, Aleks (2012) *Relativistic Causality: Lorentz Transformations in Special Relativity*. Create Space Independent Publishing Platform.
- Kuhn, Thomas S. (1973 (1962)) *Videnskabens revolutioner*. København: Fremad.
- Landau, L. D. & E. M. Lifshitz (3. ed. 1971 (1951)) *The Classical Theory of Fields*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig: Pergamon Press.
- Minkowski, Hermann (1907-1908), "Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern" [The Fundamental Equations for Electromagnetic Processes in Moving Bodies], *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*:53-111 *Wikisourcetranslation: The Fundamental Equations for Electromagnetic Processes in Moving Bodies
- Newton, Isaac (1999; 1. udg. 1687) *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (A New Translation by I. Bernhard Cohen and Anne Whitman). London, England: University of California Press.
- Ptolemy (1998) *Ptolemy's 'Amalgest'*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Riemann, Bernhard (1990) *Gesammelte Mathematische Werke, Wissenschaftlicher Nachlass & Nachtrage*. Berlin: Springer Verlag.

Witt-Hansen, Johannes (1976) 'H.C. Ørsted, Immanuel Kant and the Thought Experiment.' *Danish Yearbook of Philosophy*, 13:48-65.