

Descartes' lov, også kaldet Snells lov (efter den hollandske matematiker Willebrord Snel (1580-1636), som fandt den uafhængigt af Descartes), bruges til at beregne refraktionsindekset k mellem to lysbærende medier. Den siger, at forholdet mellem de to vinkler u og v , vinkelret til grænsefladen (kaldet normalen), er det samme som forholdet mellem de to mediers refraktionsindeks n_1 og n_2 : $\frac{\sin(u)}{\sin(v)} = \frac{n_2}{n_1} = k$. Som tommelfingerregel vil lyset brydes i retning af normalen i et tættere medie som f.eks. vand, glas, krystaller osv., som det ses her.

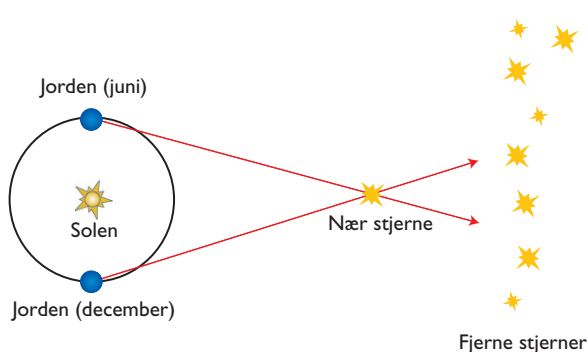
studier af lyset og dets bevægelse i linser fik enorm betydning for udviklingen af nye instrumenter, såsom mikroskop og kikkert, og for forbedring af bl.a. briller.

Naturlove som norm

Kopernikus havde foreslået en model af universet, hvor Solen var i centrum, og planeterne bevægede sig i cirkler udenom. Men skulle dette passe med det observerede, gav det problemer. Hans system måtte modificeres, så det blev lige så komplekst som Ptolemaios' geocentriske system. Derudover var der et væsentligt problem med fænomenet parallaxse, dvs. det at sigtevinklen til en stjerne ændrer sig i løbet af året, fordi Jordens position i forhold til stjernerne ikke er konstant. Men man kunne ikke måle denne forskel, som burde være der. Kopernikus' system forklarede dog, hvordan det kunne være, at en planet som Mars tilsyneladende vandrede frem og tilbage på himlen. Der var også begrebslige problemer med Kopernikus' system, for hvis Jorden bevægede sig om Solen med stor hastighed, så burde ting opføre sig anderledes, end man oplevede – en sten kastet ud fra et tårn burde f.eks. lande et stykke væk fra tårnets fod. Hvis Jorden drejer én gang på 24 timer og har en omkreds på mere end 40.000 km, burde det endda være en ret stor afstand – over 400 m, hvis faldet varede i ét sekund. For at få tingene til at hænge sammen krævedes der en helt ny forståelse af bevægelse, af de mekaniske love. Det var det, Galilei gik i gang med i begyndelsen af 1600-tallet, og som Newton fuldførte nogle årtier senere.

På basis af en meget stor mængde observationer af planeterne formule-

Parallakse er den tilsyneladende ændring af et observeret objekts position, der skyldes betragterens egen bevægelse. Fordi Jorden bevæger sig i en bane rundt om Solen, ser vi hele tiden himlen fra en ny position. Derfor skulle man forvente at se en årlig parallakseeffekt, der fik især de nærmeste objekter til at bevæge sig frem og tilbage som følge af Jordens bevægelse om Solen. Dette finder faktisk sted, men selv de nærmeste objekter i universet befinder sig alligevel så langt væk, at der skal omhyggelige målinger udført med et teleskop til for at registrere dem.

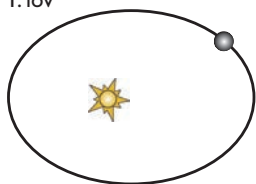


rede Kepler i begyndelsen af 1600-tallet en modifikation af Kopernikus' system, der løste en lang række problemer. Han hævdede, at planeterne ikke bevægede sig i cirkler omkring Solen, men i ellipser, og at Solen befandt sig i et af ellipsens to brændpunkter. Endvidere mente Kepler, at en planets hastighed i banen ændres, og at der er en simpel sammenhæng imellem ellipsebevægelsen, hastigheden og afstanden til Solen, sådan at i lige store tidsrum vil en linje fra Solen til planeten afstryge lige store arealer.

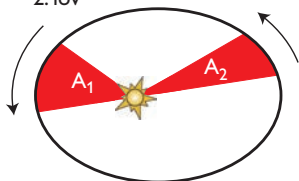
Keplers love passede med observationerne, men gjorde også op med forestillingen om, at alle bevægelser i universet var simple cirkelbevægelser. Kepler forstod i første omgang planeternes bevægelse som udtryk for universets beåndethed og tænkte dem ind i en stor matematisk og mystisk sammenhæng. Senere kom han til at se planeternes bevægelse omkring Solen som udtryk for resultatet af en kraft mellem Solen og planeterne. Det var en teori, som Newton senere skulle fuldføre. For Kepler var lovene udtryk for universets harmoni, og han forsøgte at forklare samspillet mellem Solen og planeterne som udtryk for en fysisk krafts virkning. Den kraft, han specielt tænkte på, var den magnetiske tiltrækning, som den engelske forsker William Gilbert (1544-1603) havde beskæftiget sig med, og som måtte spille en rolle for planeterne, da Jorden ifølge Gilbert fungerede som en stor magnet.

Det blev Newton, der i 1687 formulerede en samlet mekanisk fysik, der kunne give en beskrivelse af både de jordiske fænomener, som Galilei havde beskrevet, og af de astronomiske fænomener, som Kepler havde opdaget. Vejen hertil var dog langt fra ligetil. Galilei havde bidraget kraftigt til, at man kunne acceptere et kopernikansk verdensbillede og havde skabt basis for

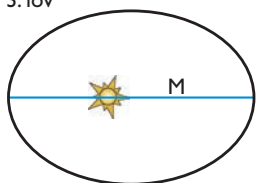
1. lov



2. lov



3. lov



Keplers modifikation af Kopernikus' system fra begyndelsen af 1600-tallet. Hans første lov siger, at planeterne bevæger sig ikke i cirkler omkring Solen, men i ellipser, og at Solen befinder sig i et af ellipsens to brændpunkter. Anden lov siger, at en planets hastighed i banen ændres, og at der er en simpel sammenhæng imellem ellipsebevægelsen, hastigheden og afstanden til Solen, sådan at i lige store tidsrum vil en linje fra Solen til planeten afstryge lige store arealer, så $A_1 = A_2$. Kepler tilføjede nogle år senere en tredje lov, der sagde noget om sammenhængen mellem planeternes omløbstid om Solen og deres (middel)afstand til Solen. Den siger, at P^2/M^3 er den samme for alle planeter (hvor P er varigheden af en fuld cyklus, og M er længden af ellipsens hovedakse).

en eksperimentel forståelse af bevægelse. Kepler havde modificeret det kopernikanske system, så det blev simpelt og beskriveligt med få matematiske love. Men det store spørgsmålet lød på, om de jordiske kræfter, som f.eks. opererede, når kugler trillede ned ad skråplaner, var de samme kræfter, der var gældende i solsystemet? Gjaldt lovene for bevægelse på Jorden også for planeterne bevægelser – og dermed for bevægelse overalt?

Engang i 1680'ernes begyndelse spurgte en af Newtons venner ham om, hvordan sammenhængen mellem Keplers love og kraften mellem Sol og planeter var. Newton svarede, at hvis kraften var omvendt proportional med kvadratet på afstanden, ville planeterne bevæge sig i ellipser omkring Solen. Vennen bad om at få en redegørelse. Det blev til Newtons hovedværk *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* ("Naturfilosofiens matematiske principper"). I dette værk fremlægger Newton en samlet fremstilling af de lovmæssigheder, der gælder for bevægelse, og viser, at disse kan forklare, hvordan solsystemet er bygget op. Dermed viser han også, at det er de samme principper, der gælder for bevægelse på Jorden og i universet som helhed. Når man ser Solens og Månens op- og nedgange, og når man kaster en sten eller sparker til en bold, er det således de samme kræfter, der er på spil. Descartes havde allerede tidligere hævdet, at naturen var én natur, indeholdt i et uendeligt rum og med de samme lovmæssigheder gældende overalt. Ved et tankeeksperiment viste Newton f.eks., at hvis man kaster en sten ud fra en bjergtop, er det teoretisk set muligt at kaste den så hurtigt, at den vil blive til en lille måne, sådan som det sker med satellitter.

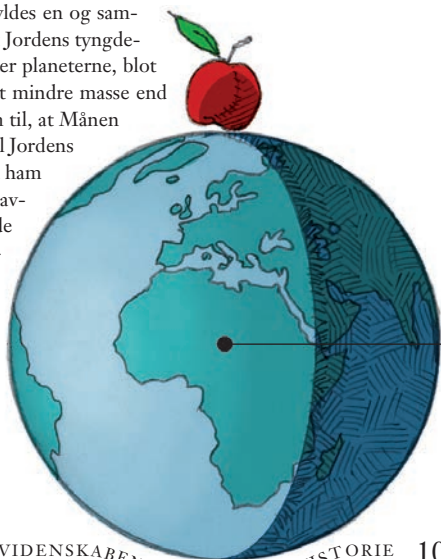
Månen holdes i sin bane omkring Jorden af samme kræfter og efter samme lovmæssigheder som en sten, der falder til Jorden. Newton kunne, ud fra tre simple love for bevægelse samt en tese om, at der mellem

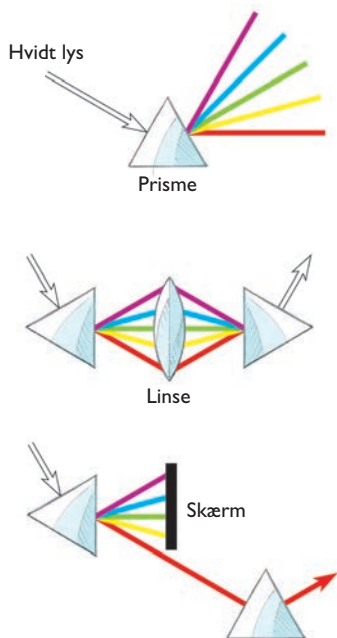
alle legemer var en tiltrækning – tyngdekraften – der afhang alene af massen af legemerne og deres afstand, forklare stort set alle kendte bevægelsesfænomener. Han kunne vise, at under de givne forudsætninger måtte planeter og kometer bevæge sig i ellipser. Han kunne forklare tidevandet og en lang række andres ret uforståelige fænomener. Han gav disse forklaringer ud fra en matematisk analyse og syntese, dvs. han fremlagde løsninger på problemer i en form, hvor man ud fra en række antagelser demonstrerede løsningen matematisk. Han gav sig ikke af med overvejelser af mere naturfilosofisk art, dvs. overvejelser over, *hvorfor* tingene var, som de var. Han ville udelukkende redegøre for de observerede fænomener på basis af en række simple lovmæssigheder og definitioner. Det var den klassiske euklidiske metode.



Med sine værker etablerede Newton en norm for, hvad viden og viden-skab var. Det var i høj grad ham, der viste, at det var muligt igennem eksperimenter at løse en lang række problemer, herunder også at frembringe nye instrumenter og redskaber på basis af denne viden. Newton konstruerede således en ny slags kikkert baseret ikke kun på linser, men også på et forstørrende spejl. Det var også muligt at fremlægge fysiske og astronomiske teorier i matematisk form – hos Newton endnu geometrisk – på en måde, så man ud fra definitioner og fundamentale love og aksiomer kunne aflede såkaldte teoremer, der beskrev det observerede. Med Newtons begreber kunne man

Newton kom ifølge en (givetvis usand) anekdote frem til sin banebrydende ide, mens han lå under et æbletræ og så et æble falde mod Jorden. Kunne det være sådan, tænkte han, at Solen trækker i Jorden, og Jorden trækker i Månen, på samme måde som Jorden trækker i æblet? Kunne det være, at alle disse tiltrækninger og hele solsystemets udformning skyldes en og samme type kraft? Hvis hypotesen var sand, ville man forvente, at Jordens tyngdekraft ville følge den samme regel, efter hvilken Solen tiltrækker planeterne, blot med en anden styrke, der var proportional med Jordens langt mindre masse end Solens. Ved at bruge Keplers 3. lov kunne Newton finde frem til, at Månen måtte have en acceleration, der var kvadrateret på dens afstand til Jordens centrum mindre end accelerationen af det faldende æble foran ham (dvs. 60^2 gange mindre). Tyngdekraften på Jordens overflade havde man målt til at være $9,8 \text{ m/s}^2$, og Hipparkos havde allerede 2000 år tidligere beregnet, at Månens afstand til Jorden måtte være ca. 60 gange Jordens radius, og derfor burde Månens acceleration omkring Jorden være ca. $60^2 = 3600$ gange mindre end æblets $9,8 \text{ m/s}^2$. Da Månens acceleration nemt kan beregnes på en anden måde, nemlig via Newtons egen 2. lov om at $a=v^2/r$, og resultatet rigtig nok er 3600 gange mindre end $9,8 \text{ m/s}^2$, følte Newton sig sikker på at have forstået årsagen til den mystiske kraft, som holder måner og planeter fast i deres baner omkring Solen.





I 1704 fremlagde Newton yderligere et meget væsentligt værk, hans *Optik*. I dette værk studerede han først og fremmest lyset. Han fremsatte en teori om, at lys var en partikelbevægelse, og at hvidt lys – sollys og dagslys – var sammensat af lys med forskellige farver, som vi ser det i spektret. Opfattelsen af lyset som en partikelstrøm var en dristig hypotese – andre hævdede, at lyset var et bølgefænomen – men Newton havde stærke eksperimentelle grunde til at mene, at hvidt lys var sammensat. Newton studerede selvfølgelig mange andre fænomener, og han diskuterede en lang række hypoteser om lysets natur, f.eks. også Descartes' ide om, at lys var en art trykfænomen.

Robert Boyles luftpumpe. Fra ► *New Experiments Physico-Mechanical*, 1660 · History of Science Collections, University of Oklahoma Libraries.

også løse fysiske problemer på samme måde, som man siden i hvert fald Euklid havde løst geometriske problemer. Det var således ikke kun den himmelske sfære, der var matematisk, hele naturbeskrivelsen kunne være det, inklusive den, der drejede sig om jordiske fænomener.

En mekanisk og deterministisk verdensorden

I løbet af 1600-tallet blev der etableret en høj grad af konsensus om, hvordan viden blev produceret, og hvad viden var. Det skete bestemt ikke uden diskussion og kontrovers. Afgørende var imidlertid, at der opstod en videnskabelig institution, f.eks. i form af videnskabelige selskaber, hvor en gruppe af mennesker fik magt og mulighed for at fastslå, hvad der var kendsgerninger, og hvad der ikke var. Kendsgerninger var noget, der var objektivt påviseligt, og med objektivitet mentes, at flere mennesker kunne opleve fænomenet, og at det kunne gentages under forskellige omstændigheder.

Den engelske videnskabsmand Robert Boyle (1627-91) arbejdede i mange år med luften, dens tryk og egenskaber, og med spørgsmålet om det tomme rums eksistens. Han fik konstrueret en luftpumpe, og med den kunne han frembringe et vakuum. Han kunne udforske luftens egenskaber og fremlægge en teori, der støttedes af eksperimenter.

Det videnskabelige samfund var i slutningen af 1600-tallet endegyldigt blevet den instans, der afgjorde, hvad der var viden, og hvad der ikke var. Observation og eksperiment, efterprøvning og gentagelse var afgørende kriterier. Det var ikke ved disputationer eller filosofiske analyser, at man kom frem til kendsgerningerne, men ved at lade dem "tale selv", og det skete først og fremmest i eksperimen-