

Werner Heisenberg

## RELATIVITETSTEORIEN

I den moderne fysikk har relativitetsteorien spilt en særlig viktig rolle. Her viste det seg for første gang nødvendig å forandre fysikkens grunnleggende prinsipper. En diskusjon av de problemer som relativitetsteorien reiser og som delvis er blitt løst, hører derfor hjemme i behandlingen av den filosofiske side ved den moderne fysikk. I en viss forstand kan man si at utviklingen av relativitetsteorien – i motsetning til kvanteteorien – har brukt relativt kort tid fra den endelige erkjennelse av de vanskeligheter det dreier seg om, til man fant deres løsning. Moreley og Millers gjentakelse av Michelsons eksperiment i året 1904 var det første sikre bevis for umuligheten av å påvise jordens translasjonsbevegelse ved hjelp av optiske metoder, og Einsteins avgjørende arbeid kom allerede mindre enn to år etter dette. På den annen side var Moreley og Millers eksperimenter og Einsteins arbeider det siste skritt i en utvikling som var begynt meget tidligere, og som man kanskje kan sammenfatte under overskriften ”bevegede legemers elektrodynamikk”.

Bevegede legemers elektrodynamikk var et viktig område i fysikk og teknikk etter at man hadde konstruert elektromotoren. En alvorlig vanskelighet dukket først opp på dette området da Maxwell hadde oppdaget lysbølgenes elektromagnetiske natur. Disse bølgene skiller seg fra tidligere kjente bølger, f. eks. lydbølger, ved en vesentlig egenskap. De kan utbre seg i det tomme rom. Når en klokke står i et kar som er pumpet tomt for luft, trenger lyden ikke ut. Men lyset trenger uten vanskelighet gjennom det lufttomme rom. Derfor antok man at lysbølgene kunne oppfattes som elastiske bølger i en meget lett substans som man kalte ”eteren”. Denne kunne verken sees eller føles, men den fylte det lufttomme rom, slik den fyller det rom hvor det eksisterer annen materie som f. eks. luft eller glass. Det falt ikke fysikerne inn at elektromagnetiske bølger kunne ha sin egen realitet uavhengig av noen som helst slags legemer. Siden dette hypotetiske stoff, eteren, kunne gjennomtrengte all annen materie, oppsto spørsmålet om hva som hender når materien blir satt i bevegelse? Deltar eteren i denne bevegelsen, og i så fall, hvordan forplanter en lysbølge seg i den bevegede eter?

Eksperimenter som bidrar til å besvare dette spørsmålet, er av følgende grunner vanskelige å gjennomføre: hastigheten av de bevegede legemer er vanligvis svært liten i forhold til lysets hastighet. Derfor kan bevegelsen av disse legemene bare fremkalle meget små virkninger, kanskje proporsjonale med forholdet mellom legemets hastighet og lysets hastighet, eller en høyere potens av dette forholdet. I forskjellige eksperimenter av Wilson, Rowland, Röntgen, og Eichenwald og Fizeau var det mulig å måle slike effekter med en nøyaktighet som tilsvarer første potens av det nevnte forhold. Elektron-teorien, som var blitt utviklet av Lorentz i året 1895, ga nok en tilfredsstillende beskrivelse av disse effektene i ”første orden”. Men med eksperimentet til Michelson, Moreley og Miller ble det skapt en ny situasjon.

Dette eksperimentet skal beskrives i detalj. For å oppnå større effekter og dermed også nøyaktigere resultater, syntes det hensiktsmessig å eksperimentere med legemer som beveger seg meget raskt. Jorden beveger seg rundt solen med en hastighet av ca. 30 km/sek. Hvis eteren er i ro relativt til solen og ikke følger med i jordens bevegelse, måtte denne raske bevegelse av eteren relativt til jorden merkes som en forandring av lysets

hastighet på jorden. Man skulle da få forskjellige verdier for lysets hastighet, alt ettersom lyset beveger seg parallelt med jordens bevegelse eller normalt på denne. Selv om eteren delvis følger med jorden, skulle man kunne oppnå en viss effekt, og siden det da ville foreligge en slags etervind, ville effekten sannsynligvis avhenge av hvor høyt over havet eksperimentet ble utført. En beregning av den ventede effekt viste at den måtte bli meget liten da den skulle være proporsjonal med kvadratet av forholdet mellom jordhastigheten og lyshastigheten. Man måtte derfor gjøre meget omhyggelige forsøk med interferens av to lysstråler, hvorav den ene er parallell med jordbevegelsen og den andre står normalt på denne. Michelsons første eksperiment av denne type, som ble utført i 1881, hadde ikke vært nøyaktig nok. Men heller ikke senere gjentakelser av eksperimentet viste det minste tegn på den forventede effekt, og Moreleys og Millers eksperimenter i 1904 ble betraktet som det endelige bevis for at det her ikke finnes en effekt av den størrelsesorden man hadde regnet med

Dette resultatet syntes i første omgang uforståelig, men det berørte også et spørsmål som fysikerne allerede tidligere hadde diskutert. I den newtonske mekanikk gjelder et visst relativitetsprinsipp som kan beskrive slik: hvis legemenes mekaniske bevegelse i et bestemt referansesystem oppfyller lovene for den newtonske mekanikk, da gjelder dette også for et hvert annet referansesystem som beveger seg jevnt translatorisk [rettlinjet] i forhold til det første. En jevn translasjonsbevegelse frembringer altså ingen som helst iakttagbar mekaniske effekter i dette system og kan derfor heller ikke på noen måter iakttas gjennom slike effekter.

Et slikt relativitetsprinsipp syntes for fysikerne ikke å kunne gjelde i optikken og i elektrodynamikken. For hvis det første system var i ro i forhold til eteren så ville det bevegede system ikke være i ro, og derfor skulle man kunne iakttas dettes bevegelse relativt til eteren gjennom effekter av den typen som Michelson hadde undersøkt. Det negative resultat av eksperimentet til Moreley og Miller i året 1904 førte til en gjenopplivelse av ideen om at det relativitetsprinsipp som gjelder i den newtonske mekanikk kunne være like sant i elektrodynamikken.

På den annen side fantes det gammelt forsøk av Fizeau fra året 1851, som syntes å stride mot dette relativitetsprinsippet. Fizeau hadde målt lysets hastighet i en beveget væske. Hvis relativitetsprinsippet var riktig, skulle den samlede hastighet av lyset i den bevegede væsken være lik summen av væskens hastighet og lyshastigheten i den hvilende væske. Men det var ikke tilfelle. Fizeaus forsøk viste at den samlede hastighet var noe mindre enn den nevnte sum.

Det negative resultat av alle forsøk på å bestemme bevegelsen relativt til eteren, ga imidlertid fysikerne og matematikerne anledning til å se seg om etter en matematisk tydning av disse forsøkene, som kunne bringe bølgeligningen for lysets utbredelse i samklang med relativitetsprinsippet. Lorentz foreslo derfor i året 1904 en matematisk formel, som oppfylte dette kravet. Han måtte da innføre den hypotese, at bevegede legemer kontraherer (trekker seg sammen) i retning av sin bevegelse, og da med en faktor som avhang av legemets hastighet, og at i forskjellige referansesystemer blir det også målt forskjellige tilsynelatende tider, som i mange forsøk spiller den samme rolle som tidligere den virkelige tid. På denne måten kom Lorentz til et resultat som tilfredsstilte relativitetsprinsippet. Lysets tilsynelatende hastighet var nu den samme i et hvert referansesystem. Liknende tanker var blitt diskutert av Poincaré, Fitzgerald og andre fysikere.

Det avgjørende skritt ble tatt av Einstein i 1905, idet han erklærte Lorentz-transformasjonens tilsynelatende tid for å være den virkelige tid, mens den tid som Lorentz hadde kalt "virkelig" ble eliminert fra betraktningen. Det betydde en forandring i fysikkens grunnlag, en helt uventet og radikal forandring, som krevet et ungt og revolusjonært genis hele mot. For å fullbyrde dette skritt behøvde man i den matematiske fremstilling av naturen ikke gjøre mer enn å anvende Lorentz-transformasjonen på erfaringen på en motsigelsesfri måte. Men gjennom den nye tyding av denne transformasjonen ble fysikernes oppfatning av tidens og rommets struktur forandret og mange av fysikkens problemer viste seg i et nytt lys. Substansen eter viste seg f. eks. å være unødvendig og kunne ganske enkelt strykes fra fysikken. For siden alle referansesystemer, som befinner seg i jevn translasjonsbevegelse i forhold til hverandre, er ekvivalente i beskrivelsen av naturen, har det ikke lenger noen mening at det skulle finnes en substans eter, som er i ro i et bestemt av disse referansesystemene. En slik substans trenges ikke, og det er meget enklere å si at lysbølgene forplanter seg i det tomme rom, og at de elektromagnetiske felter har sin egen realitet og kan forekomme i det tomme rom.

Men den avgjørende forandring gikk på strukturen av rom og tid. Det er meget vanskelig å beskrive denne forandringen i det vanlige språkets ord, uten å benytte matematikk, siden de vanlige ordene rom og tid refererer til en struktur av rom og tid, som faktisk fremstiller en idealisering og forenkling av den virkelige struktur. Likevel må man forsøke å beskrive den nye struktur, og kanskje kan det skje på følgende måte: Når vi bruker ordet "fortid", mener vi alle hendelser som vi, i det minste i prinsippet, kan vite noe om, som vi har kunnet erfare noe om. På tilsvarende måte omfatter ordet "fremtid" alle de hendelser som vi, i det minste i prinsippet, ennå skulle kunne innvirke på, og som vi kunne forsøke å forandre eller forhindre. Det er riktignok i første omgang vanskelig å erkjenne, hvorfor denne definisjon av ordene "fortid" og "fremtid" skal være særlig hensiktsmessig. Men man kan lett se at den faktisk passer meget godt til den vanlig bruk av disse uttrykkene. Hvis man bruker dem på denne måten, så avhenger, slik resultatene av mange eksperimenter viser, innholdet av fremtid og fortid ikke av iakttagers bevegelsestilstand eller andre egenskaper. I et mer matematisk språk kan man si at den anførte definisjon er invariant overfor iakttagers bevegelse. Det gjelder så vel i den newtonske mekanikk som i den einsteinske relativitetsteori.

Men det består en avgjørende forskjell: I den klassiske teori antar vi at fremtid og fortid er skilt fra hverandre ved et uendelig kort tidsintervall som man kan kalle det nåværende øyeblikk. Men i relativitetsteorien har vi lært, at det forholder seg noe annerledes. Fremtid og fortid er skilt fra hverandre ved et endelig tidsintervall, hvis varighet avhenger av avstanden fra iakttageren. En eller annen virkning kan bare forplante seg med en hastighet som er mindre eller lik lysets hastighet. Derfor kan en iakttagere i et gitt øyeblikk verken kjenne eller influere på en begivenhet som finner sted i et fjernt punkt mellom de to karakteristiske tidene. Den ene tid er det øyeblikk da et lyssignal måtte sendes ut fra stedet for hendelsen, for å nå frem til iakttageren i det øyeblikk han iakttar det. Den andre tid er det øyeblikk, da et lyssignal, som blir sendt fra iakttageren i iakttagelsesøyeblikket når frem til stedet for hendelsen. Hele det endelige tidsintervall mellom disse to øyeblikkene kan for iakttageren i iakttagelsesaktens øyeblikk defineres som "nåtid". For hvilken som helst hendelse i dette tidsintervallet kan i iakttagelsesaktens øyeblikk da verken være kjent eller bli influert på, og slik var det jo

begrepet "nåtid" var blitt definert. Enhver begivenhet som finner sted mellom de to karakteristiske tider, kan kalles "samtidig med iakttagelsesakten".

Bruken av uttrykket "kan kalles" tyder allerede på en tvetydighet i ordet "samtidig", som har sin grunn i at ordet "samtidig" stammer fra det daglige livs erfaringer, hvor lyshastigheten i praksis kan betraktes som uendelig stor. I fysikken kan ordet "samtidig" faktisk også defineres noe annerledes, og Einstein har i sine arbeider brukt denne andre definisjon av "samtidig". Når to begivenheter utspiller seg samtidig i samme rompunkt, sier vi at de sammenfaller. Dette uttrykk er helt entydig. Vi kan nu forestille oss tre punkter, som ligger på en rett linje i rommet, slik at punktet i midten har samme avstand fra de to andre punktene. Når to hendelser som finner sted i de to ytre punktene til slike tider at lyssignalene som utgår fra dem, sammenfaller, når de treffer det midtre punkt, så kan man definere de to hendelsene som "samtidige". Denne definisjon er da snevrere enn den første. En av dens viktigste konsekvenser er at hvis to begivenheter er samtidige for én iakttager, er de kanskje ikke samtidige for en annen. Og dette vil da være tilfelle når den annen iakttager beveger seg relativt til den første. En sammenknytning av de to definisjonene av "samtidig" kan man oppnå ved å si, at hvis to hendelser er samtidige i den første betydning, kan man alltid også finne et referansesystem, hvor de er samtidige i den annen betydning. Sammenhengen kan kanskje fremstilles anskueligere på følgende måte: La oss anta at en satellitt som kretser omkring jorden sender ut et signal som kort tid senere blir fanget opp av en målestasjon på jorden. Målestasjonen gir deretter satellitten en kommando, som ankommer den etter kort tid. Hele tidsintervallet på satellitten, fra utsendingen av signalet til mottagelse av kommandoen, kan i den første definisjon gjelde som "samtidig" med mottagelsesakten på jorden. Hvis man på satellitten griper ut et eller annet bestemt øyeblikk av dette intervall, i den andre definisjonens betydning, er dette øyeblikket riktignok i sin alminnelighet ikke "samtidig" med at signalet mottas på jorden, men vel finnes det et referansesystem, for hvilket denne samtidighet består.

Den første definisjon av ordet samtidig synes å svare noe bedre til den daglige bruk av dette ordet, siden spørsmålet om hvorvidt to hendelser er samtidige i det daglige liv med sikkerhet ikke avhenger av referansesystemet. Men i begge de relativistiske definisjoner har begrepet "samtidig" fått en presisjon, som det absolutt mangler i det daglige livs språk. I kvanteteorien måtte fysikerne allerede tidlig innse at den klassiske mekanikkens begreper bare beskriver naturen unøyaktig, at dens anvendelse begrenses av kvantelovene og at man derfor må være meget forsiktig ved anvendelsen av dem. I relativitetsteorien derimot har fysikerne forsøkt å forandre betydningen av den klassiske fysikkens ord, og å presisere disse begrepene på en slik måte at de svarer nøyaktig til den nyerkjente situasjon i naturen.

Den struktur av rom og tid som relativitetsteorien har brakt for dagen, har mange følger i de forskjellige deler av fysikken. De bevagede legemers elektrodynamikk kan uten vanskelighet avledes av relativitetsprinsippet. Dette prinsippet selv kan formuleres som en meget alminnelig naturlov, som ikke bare refererer seg til elektrodynamikken eller mekanikken, men til hver vilkårlig gruppe av naturlover: Lovene må anta den samme form i alle referansesystemer, som bare skiller seg fra hverandre gjennom en jevn translasjonsbevegelse. De er som man kan si, matematisk invariante overfor Lorentz-transformasjonen.

Kanskje den viktigste følge av relativitetsprinsippet er energiens tregthet eller, som man kan uttrykke det, ekvivalensen av masse og energi. Siden lysets hastighet spiller rollen som en grensehastighet, som aldri kan oppnås av noe materielt legeme, så kan man lett innse, at det må være vanskeligere å akselerere et legeme som allerede er i bevegelse enn ett som ennå er i ro. Tregtheten har altså tiltatt med den kinetiske energi. Helt alminnelig må ut fra relativitetsteorien enhver art av energi bidra til tregtheten, d.v.s. til massen, og massen som er tilordnet en gitt energi er lik denne energi delt på kvadratet av lyshastigheten. Enhver energi bringer altså med seg masse; men selv en, etter normale begreper, meget stor energi bidrar likevel bare meget lite til massen, og det er grunnen til at forbindelsen mellom masse og energi tidligere ikke er blitt iaktatt. De to lover om massens bevarelse og energiens bevarelse mister sin adskilte gyldighet og blir forenet til en eneste lov, som man kan kalle loven om energiens eller massens bevarelse.

For 50 år siden da relativitetsteorien ble begrunnet, syntes hypotesen om ekvivalens av masse og energi som en revolusjon i fysikken, og det fantes den gang bare meget få eksperimentelle grunner for denne loven. I våre dager kan man i mange eksperimenter umiddelbart se hvordan elementærpartikler blir til av kinetisk energi, og hvordan slike partikler igjen kan forsvinne idet de går over i stråling. I dag er derfor forvandlingen av energi til masse og omvendt ikke noe usedvanlig.

De enorme energimengder som blir frigjort ved atomeksplosjoner, er et annet og meget mer iøynefallende bevis, for riktigheten av den Einsteinske ligning. Men kanskje skulle man her føye inn en kritisk historisk bemerkning. Det blir leilighetsvis hevdet at de enorme energimengdene ved atomeksplosjoner oppstår umiddelbart gjennom en forvandling, av masse til energi og at man bare på grunn av relativitetsteorien kunne forutsi disse gigantiske energimengdene. Men denne oppfatning beror på en misforståelse. De store energimengdene som lagres i atomkjerner, var kjent fra Becquerels, Curies og Rutherfords eksperimenter med radioaktivt sammenbrudd. Ethvert radioaktivt legeme, som f. eks. radium, frembringer en varmemengde som er omtrent en million ganger større enn den varme som kan frigjøres fra den samme mengde materiale i en kjemisk prosess. Energien ved spalting av urankjernen har den samme opprinnelse som energien ved sammenbrudd av en radiumkjerne, nemlig hovedsakelig elektrostatiske frastøtninger mellom de to deler som atomkjernen blir spaltet i. Den energi som blir frigjort ved en atomeksplosjon, stammer altså direkte fra denne kilden og er ikke frembragt gjennom en forvandling av masse og energi. For antallet elementærpartikler med endelig hvilemasse avtar under eksplosjonen. Riktignok viser bindingsenergien mellom byggestenene i en atomkjerne seg også i deres hvilemasser, og derfor er frigivelsen av energi også indirekte knyttet sammen med forandringer i atomkjernenes masser.

Ekvivalensen av masse og energi har i tillegg til sin betydning for den praktiske fysikk også fremkastet problemer som henger sammen med meget gamle filosofiske spørsmålsstillinger. Forskjellige filosofiske systemer fra fortiden gikk ut fra den tese at substans eller masse ikke kan ødelegges. I den moderne fysikk har imidlertid mange eksperimenter vist at elementærpartikler, f. eks. positroner og elektroner, kan tilintetgjøres og forvandles til stråling. Betyr dette at de eldre filosofiske systemer dermed er gjendrevet av moderne erfaring, og at de argumenter som ble fremført i disse tidligere systemer, må anses for gale?

Dette ville sikkert være en noe forhastet og uberettiget følgeslutning, for begrepene "substans" og "materie" i den antikke eller den middelalderske filosofi kan ikke rett og slett identifiseres med uttrykket "masse" i den moderne fysikk. Hvis man vil uttrykke våre moderne erfaringer i disse eldre filosofiske systemers språk, så kunne man f. eks. anse masse og energi for to forskjellige former av den samme substans og på denne måte bibeholde forestillingen om at substansen er ikke ødeleggbar.

På den annen side vil man neppe kunne si at meget er vunnet når man uttaler moderne kunnskaper i et gammelt språk. Fortidens filosofiske systemer var formet ut fra den tids samlede viten og svarte derfor til den tenkemåte som har ført til slik viten. Man kan da sikkert ikke forvente at filosofer som har tenkt over naturen for flere hundre år siden, har kunnet forutse utviklingen av den moderne fysikk eller relativitetsteorien. De begreper som filosofene i en forgangen tid har kommet til gjennom en analyse av sin naturerfaring kan derfor ikke tilpasses de fenomener som vi i dag kan iakttatte med de kompliserteste tekniske hjelpemidler.

Men før vi omtaler de filosofiske konsekvenser av relativitetsteorien, vil vi først skildre den videre utvikling.

Den hypotetiske substansen "eter", som spilte en så viktig rolle for tydingen av Maxwells teori i det 19. århundrede, var, som allerede nevnt, blitt satt til side gjennom relativitetsteorien. Dette blir ofte også uttrykt ved å fastslå at det absolutte rom er satt til side, gjennom relativitetsteorien. Men en slik påstand må uttales med visse forbehold. Riktignok kan man, ifølge den spesielle relativitetsteorien, ikke lenger fremheve et bestemt referansesystem, i hvilket eteren er i ro og som derfor fortjener betegnelsen "absolutt rom". Men det vil likevel være galt å påstå at rommet nå har mistet alle fysiske egenskaper. Bevegelseslikningene for materielle legemer eller felt antar stadig vekk fortsatt forskjellig form i et "normalt" referansesystem, sammenliknet med et annet som i forhold til det normale referansesystem roterer jevnt. Hvis man i første omgang begrenser seg til relativitetsteorien fra 1905 og 1906, så beviser eksistensen av sentrifugalkrefter i et roterende referansesystem, at det finnes fysiske egenskaper ved rommet som tillater å skjelne mellom et roterende og et ikke roterende system.

Dette synes filosofisk utilfredsstillende, og man ville foretrekke å gi fysiske egenskaper bare til fysiske ting, som f. eks. materielle legemer eller felter, men ikke til det tomme rom. Ikke desto mindre, hvis man begrenser seg til å betrakte elektromagnetiske prosesser og mekaniske bevegelser, så følger eksistensen av disse egenskaper ved det tomme rom rett og slett av kjensgjerninger som ikke kan diskuteres bort, f. eks. av sentrifugalkraften.

En omhyggelig analyse av denne situasjonen førte Einstein ca. 10 år senere til en meget viktig utvidelse av relativitetsteorien som vanligvis blir betegnet som "alminnelig relativitetsteori". Før vi gjør rede for grunntankene i denne nye teori, skal det imidlertid sies noen ord om graden av sikkerhet man kan ha for riktigheten av disse to deler av relativitetsteorien. Teorien fra året 1905 og 1906, altså den såkalte "spesielle relativitetsteori" beror på et stort antall meget nøyaktig undersøkte eksperimentelle kjensgjerninger: på forsøkene til Michelson, Morley og mange tilsvarende eksperimenter, på ekvivalensen av masse og energi i et meget stort antall av radioaktive prosesser, enn videre på den meget nøyaktige iakttatte levetid for radioaktive prosesser i deres avhengighet av hastigheten til de radioaktive partikler osv. Denne teori hører altså til de faste sikre grunnlag for moderne fysikk og kan i vår nåværende situasjon ikke bestrides.

Ved den alminnelige relativitetsteori er derimot de eksperimentelle bevis meget mindre overbevisende, siden det eksperimentelle materiale i det store og hele er meget begrenset. Det finnes bare noen få astronomiske iakttagelser, ved hvis hjelp vi kan etterprøve riktigheten av den alminnelige relativitetsteoriens antagelser. Derfor er denne andre teori langt mer hypotetisk enn den første.

Den avgjørende grunnantagelse for den alminnelige relativitetsteori er likheten av tung og treg masse. Meget omhyggelige målinger har vist at et legemes masse, som er bestemt ved dets tyngde, er nøyaktig proporsjonal med den annen masse som er definert ved legemets treghet. Selv de nøyaktigste målinger har aldri gitt et avvik fra denne lov. Hvis den er allmen, kan gravitasjonskreftene settes i parallell til sentrifugalkreftene eller til andre krefter som oppstår som en reaksjon på treghetsvirkninger. Siden sentrifugalkreftene måtte bringes i forbindelse med det tomme roms fysikalske egenskaper, slik som tidligere nevnt, kom Einstein til den hypotese at også gravitasjonskreftene svarte til egenskaper ved det tomme rom. Dette var et meget viktig skritt, som øyeblikkelig nødvendiggjorde et videre skritt i samme retning. Vi vet at tyngdekraften blir fremkalt gjennom masser. Hvis derfor gravitasjonen henger sammen med rommets egenskaper, må disse egenskaper ved rommet være forårsaket av eller påvirket av massene. Sentrifugalkreftene i et roterende referansesystem må være frembragt av kanskje meget fjerne masser som roterer relativt til dette systemet.

For å utføre det program som er antydnet med disse satsene måtte Einstein forbinde de underliggende fysikalske tanker med det matematiske skjema for en alminnelig geometri som var utviklet av Riemann. Siden rommets egenskaper åpenbart endrer seg kontinuerlig med gravitasjonsfeltene, måtte geometrien sammenlignes med den geometri på krumme overflater hvor den rette linje i den euklidske geometri blir erstattet med en *geodetisk* linje, nemlig linjen for den korteste avstand, idet krumningen stadig endrer seg. Som sluttresultat kunne Einstein foreslå en matematisk formulering av relasjonen mellom massefordelingen og de parametre som bestemmes av geometrien. Denne teori fremstilte gravitasjonens kjente kjensgjerninger riktig. Den var i en meget god tilnærming identisk med den vanlig gravitasjonsteori, men utover det forutsa den noen få meget interessante effekter, som ligger på grensen til det målbare. Til dem hørte f. eks. tyngdekraftens virkning på lyset.

Når monokromatisk lys sendes ut fra en tung stjerne, mister lyskvantene energi under bevegelsen bort fra stjernen gjennom stjernens tyngdefelt. Følgelig må det fremkomme en rødforskyvning av de utsendte spektrallinjer. Det finnes hittil intet motsigelsesfritt eksperimentelt bevis for eksistensen av denne rødforskyvning, hvilket diskusjonen av forsøkene til Freundlich har vist meget klart. Men det er for tidlig å slutte at forsøkene har gjendrevet den Einsteinske teoriens forutsigelser.

En lysstråle som går nær forbi solen, skulle bli avbøyet av solens tyngdefelt. Denne avbøyning er påvist eksperimentelt i den riktige størrelsesorden av Freundlich og andre astronomer. Men om avbøyningen stemmer nøyaktig overens med den verdi som den Einsteinske teori har forutsagt, har ikke kunnet avgjøres.

Det beste eksperimentelle bevis av gyldigheten for den alminnelige relativitetsteori synes å være presesjonen i baneellipsen for planeten Merkur, en presesjon som åpenbart er i meget god overensstemmelse med den verdi som teorien har forutsagt.

Selv om altså det eksperimentelle grunnlag for den alminnelige relativitetsteori ennå er temmelig smalt, inneholder teorien likevel tanker av den største viktighet. I hele perioden fra antikkens matematikere frem til det 19. århundredet ble den Euklidske geometri, oppfattet som selvfølgelig. Euklids aksiomer gjaldt som grunnlaget for enhver matematisk geometri, et grunnlag som det ikke kunne stilles spørsmål ved. Da fant i det 19. århundre matematikerne Bolyai og Lobatschewski, Gauss og Riemann, at man kan konstruere andre geometrier, som utvikles med den samme matematiske strenghet som den Euklidske. Spørsmålet om hvilken geometri som er den riktige, ble derfor fra da av et empirisk spørsmål. Men først gjennom Einsteins verk kunne spørsmålet virkelig gripes opp av fysikerne. Den geometri som ble utviklet i den alminnelige relativitetsteori, refererte seg ikke bare til det tredimensjonale rom alene, men til den firedimensjonale helheten av tid og rom. Teorien oppretter en forbindelse mellom geometrien i denne helhet og fordelingen av masse i verdensaltet. Derfor reiste teorien de gamle spørsmål i en ny form, spørsmålene om rom og tid i de største dimensjoner. Den kunne foreslå svar som kunne etterprøves gjennom iakttagelser.

Man kunne derfor gripe meget gamle filosofiske spørsmål, som hadde beskjeftiget menneskeånden siden de tidligste epoker av filosofi og vitenskap: Er rommet endelig eller uendelig? Hva var før tiden begynte? Hva vil skje ved tidens slutt? Eller har tiden ingen begynnelse og ingen slutt? Disse spørsmålene hadde fått forskjellige svar i de forskjellige filosofier og religioner. I Aristoteles' filosofi f. eks. var universets samlede rom endelig selv om det var uendelig delbart. Rommet oppsto gjennom legemenes utstrekning, det var på sett og vis utspent av legemene. Derfor fantes intet rom, når intet legeme fantes. Universet besto av jorden og solen og stjernene, et endelig antall av legemer. Hinsides stjernenes sfære fantes intet rom. Derfor var universets rom endelig. I Kants filosofi hørte dette spørsmål til det som han kalte "antinomier", spørsmål som ikke kan besvares siden to forskjellige argumenter fører til motsatte resultater. Rommet kan ikke være endelig, for vi kan ikke forestille oss at det finnes en ende på rommet. Til hvilket punkt av rommet vi enn kunne komme, må vi alltid forestille oss at vi kunne gå enda lenger. Men rommet kan også heller ikke være uendelig, for rommet er noe, som vi kan forestille oss, ellers ville begrepet rom i det hele tatt ikke være dannet, og vi kan ikke forestille oss et uendelig rom. Med hensyn til denne annen påstand er Kants argument ikke blitt gjengitt ordrett. Satsen: "rommet er uendelig", betyr for oss noe negativt, vi kan ikke komme til noen ende av rommet. Men for Kant betydde rommets uendelighet noe som virkelig er gitt, noe som "eksisterer" på en måte, som vi knapt kan gjengi. Kant kommer til det resultat at det ikke finnes noe rasjonelt svar på spørsmålet om rommet er endelig eller uendelig, for det samlede univers kan ikke være gjenstand for vår erfaring.

På samme måte stiller det seg med hensyn til problemet om tidens uendelighet. I Augustins bekjennelser blir f. eks. spørsmålet stilt i denne form: "Hva har Gud gjort, før han skapte verden?" Augustin sa seg ikke tilfreds med det kjente svar: "Gud var beskjeftiget med å opprette helvetet for folk som stilte dumme spørsmål." Dette ville være et altfor billig svar, mener Augustin; og han forsøker seg på en rasjonal analyse av problemet: "Bare for oss løper tiden, bare vi forventer tiden som fremtid; den løper for oss som det nærværende øyeblikk og vi erindrer oss om den som fortid." Men Gud er ikke i tiden. Tusen år er for ham som en dag og en dag er som tusen år. Tiden er blitt skapt sammen med verden, den hører altså til verden, og derfor fantes ingen tid før

universet eksisterte. Universets samlede forløp er for Gud gitt på en gang. Det fantes altså ingen tid før han hadde skapt verden.

Man erkjenner riktignok lett, at i slike formuleringer, reiser begrepet ”skapt”, straks alle vesentlige vanskeligheter. Dette ord betyr slik det vanligvis blir brukt, forutsetter noe som oppstår, og som tidligere ikke har bestått, og i denne forstand forutsetter det allerede begrepet tid. Derfor ville det vel være umulig å definere i rasjonelle uttrykk hva man kan mene med vendingen at tiden er blitt skapt. Denne kjensgjerning minner oss om den lære som må trekkes av den moderne fysikk, at nemlig hvert ord eller hvert begrep, så klart det enn kan synes for oss, dog alltid bare har et begrenset anvendelsesområde.

I den alminnelige relativitetsteori kan spørsmålene om rommets og tidens uendelighet stilles og også delvis besvares på et empirisk grunnlag. Hvis sammenknytningen mellom den firedimensjonale geometri for rom og tid og massefordelingen i universet blir riktig beskrevet av teorien, kan astronomiske iakttagelser gi oss informasjon om universets geometri i sin helhet. Man kan da i det minste konstruere modeller for universet, kosmologiske bilder, hvis konsekvenser vil kunne sammenlignes med de empiriske kjensgjerninger.

Vår nåværende astronomiske kunnskap tillater oss ikke å skjelne endelig mellom visse mulige modeller. Det kan være at universets rom er endelig. Dette vil ikke bety at det på noe sted finnes en slutt, en ende for universet. Det vil bare medføre, at vi når vi går videre og videre i en bestemt retning i universet, vil vi til slutt måtte vende tilbake til det punkt vi har kommet fra. Situasjonen ville altså være lignende ved den todimensjonale geometri på ordoverflaten, hvor vi jo også når vi skrider videre fra et bestemt punkt, la oss si i østlig retning, til slutt vil vende tilbake til dette punkt fra vest.

Hva tiden angår, så synes det her å foreligge noe som en begynnelse. Mange iakttagelser tyder på at universet ”begynte” for ca. 4 milliarder år siden – eller i det minste, at på den tid all materie i universet var konsentrert i et meget mindre rom enn nu, og at universet senere har utvidet seg fra dette lille rom stadig videre med forskjellige hastigheter. Denne tid på 4 milliarder år opptrer stadig igjen i forskjellige iakttagelser f. eks. i meteorittenes alder og mineralenes alder på jorden osv., og derfor vil det være vanskelig å finne en tydning som skulle være forskjellig fra tanken på en verdensopprikkelse for 4 milliarder år siden. Hvis tanken om en opprikkelse i denne form viser seg å være riktig, betyr det at bak denne tid – dvs. for mer enn 4 milliarder år siden – ville det innebære at tidens begrep må gjennomgå vesentlige forandringer. Denne meget mer forsiktige formulering trer da i stedet for den enklere formulering av verdens skapelse. Ut fra de nåværende astronomiske iakttagelser kan disse spørsmål om rom–tidens geometri i det store og det hele ennå ikke besvares med noen grad av sikkerhet. Men det er allerede interessant nok å vite at spørsmålene kanskje senere en gang vil kunne besvares på det faste grunnlag av astronomiske erfaringer.

Selv om man begrenser de videre betraktninger til den spesielle relativitetsteorien som er sikkert begrunnet, så kan man ikke tvile på at denne teori i høyeste grad har forandret vår oppfatning av strukturen av rom og tid. Det mest foruroligende ved disse forandringer er kanskje ikke så meget deres spesielle natur, men den kjensgjerning, at de overhodet har vært mulige.

Den struktur av rom og tid som Newton fastla som grunnlag for sin beskrivelse av naturen inneholdt ingen indre motsetninger. Den var enkel og tilsvarte meget nøyaktig den bruk av begrepene rom og tid, som vi har vennt oss til i det daglige liv. Korrespondansen var faktisk så tett at Newtons repetisjon rett og slett kan betraktes som den presise matematiske formulering av de begreper om rom og tid som brukes i det daglige liv. Før relativitetsteorien ble det betraktet som selvfølgelig at prosessene i tiden kan ordnes uavhengig av deres ordning i rommet. Vi vet at dette inntrykk i den daglige erfaring oppstår derved at lyshastigheten er svært meget større enn noen annen hastighet som man har å gjøre med i det praktiske liv. Denne begrensning var man naturligvis den gang ikke blitt klar over. Men selv om man kjenner denne begrensning kan man neppe forestille seg at prosessenes orden i tiden skulle avhenge av deres romlige orden dvs. av det sted hvor de finner sted.

Kants filosofi vendte senere oppmerksomheten mot den kjensgjerning at begrepene rom og tid hører til vårt forhold til naturen, ikke bare til naturen selv; at vi ikke kan beskrive naturen uten å betjene oss av disse begrepene. Derfor er disse begrepene i en viss forstand a priori, de er betingelsen for erfaring og ikke primært et resultat av erfaring, og man antok derfor alminnelig at de ikke vil kunne endres gjennom nye erfaringer. Derfor kom nødvendigheten av en forandring som en stor overraskelse. For første gang erfarte vitenskapsmennene, hvor forsiktig man må være, når man forsøker å anvende det daglige livs begreper på den forfinede erfaring som fremkommer gjennom den moderne eksperimentelle teknikk. Selv den presise og motsigelsesfrie formulering av disse begreper i den Newtonske mekanikkens matematiske språk, eller den omhyggelige analyse i Kants filosofi, hadde ikke gitt noen beskyttelse mot den kritiske analyse som senere ble muliggjort gjennom overordentlig nøyaktige målinger. Denne advarsel viste seg senere som overordentlig nyttig for utviklingen av den moderne fysikk og det ville helt sikkert vært ennå meget vanskeligere å forstå kvanteteorien, hvis ikke relativitetsteoriens suksess hadde advart fysikerne mot den ukritiske anvendelse av begreper, som blir hentet fra det daglige liv eller klassiske fysikk.





Werner Heisenberg

## RELATIVITETSTEORIEN

I den moderne fysikk har relativitetsteorien spilt en særlig viktig rolle. Her viste det seg for første gang nødvendig å forandre fysikkens grunnleggende prinsipper. En diskusjon av de problemer som relativitetsteorien reiser og som delvis er blitt løst, hører derfor hjemme i behandlingen av den filosofiske side ved den moderne fysikk. I en viss forstand kan man si at utviklingen av relativitetsteorien – i motsetning til kvanteteorien – har brukt relativt kort tid fra den endelige erkjennelse av de vanskeligheter det dreier seg om, til man fant deres løsning. Moreley og Millers gjentakelse av Michelsons eksperiment i året 1904 var det første sikre bevis for umuligheten av å påvise jordens translasjonsbevegelse ved hjelp av optiske metoder, og Einsteins avgjørende arbeid kom allerede mindre enn to år etter dette. På den annen side var Moreley og Millers eksperimenter og Einsteins arbeider det siste skritt i en utvikling som var begynt meget tidligere, og som man kanskje kan sammenfatte under overskriften ”bevegede legemers elektrodynamikk”.

Bevegede legemers elektrodynamikk var et viktig område i fysikk og teknikk etter at man hadde konstruert elektromotoren. En alvorlig vanskelighet dukket først opp på dette området da Maxwell hadde oppdaget lysbølgenes elektromagnetiske natur. Disse bølgene skiller seg fra tidligere kjente bølger, f. eks. lydbølger, ved en vesentlig egenskap. De kan utbre seg i det tomme rom. Når en klokke står i et kar som er pumpet tomt for luft, trenger lyden ikke ut. Men lyset trenger uten vanskelighet gjennom det lufttomme rom. Derfor antok man at lysbølgene kunne oppfattes som elastiske bølger i en meget lett substans som man kalte ”eteren”. Denne kunne verken sees eller føles, men den fylte det lufttomme rom, slik den fyller det rom hvor det eksisterer annen materie som f. eks. luft eller glass. Det falt ikke fysikerne inn at elektromagnetiske bølger kunne ha sin egen realitet uavhengig av noen som helst slags legemer. Siden dette hypotetiske stoff, eteren, kunne gjennomtrengte all annen materie, oppsto spørsmålet om hva som hender når materien blir satt i bevegelse? Deltar eteren i denne bevegelsen, og i så fall, hvordan forplanter en lysbølge seg i den bevegede eter?

Eksperimenter som bidrar til å besvare dette spørsmålet, er av følgende grunner vanskelige å gjennomføre: hastigheten av de bevegede legemer er vanligvis svært liten i forhold til lysets hastighet. Derfor kan bevegelsen av disse legemene bare fremkalle meget små virkninger, kanskje proporsjonale med forholdet mellom legemets hastighet og lysets hastighet, eller en høyere potens av dette forholdet. I forskjellige eksperimenter av Wilson, Rowland, Röntgen, og Eichenwald og Fizeau var det mulig å måle slike effekter med en nøyaktighet som tilsvarer første potens av det nevnte forhold. Elektron-teorien, som var blitt utviklet av Lorentz i året 1895, ga nok en tilfredsstillende beskrivelse av disse effektene i ”første orden”. Men med eksperimentet til Michelson, Moreley og Miller ble det skapt en ny situasjon.

Dette eksperimentet skal beskrives i detalj. For å oppnå større effekter og dermed også nøyaktigere resultater, syntes det hensiktsmessig å eksperimentere med legemer som beveger seg meget raskt. Jorden beveger seg rundt solen med en hastighet av ca. 30 km/sek. Hvis eteren er i ro relativt til solen og ikke følger med i jordens bevegelse, måtte denne raske bevegelse av eteren relativt til jorden merkes som en forandring av lysets

hastighet på jorden. Man skulle da få forskjellige verdier for lysets hastighet, alt ettersom lyset beveger seg parallelt med jordens bevegelse eller normalt på denne. Selv om eteren delvis følger med jorden, skulle man kunne oppnå en viss effekt, og siden det da ville foreligge en slags etervind, ville effekten sannsynligvis avhenge av hvor høyt over havet eksperimentet ble utført. En beregning av den ventede effekt viste at den måtte bli meget liten da den skulle være proporsjonal med kvadratet av forholdet mellom jordhastigheten og lyshastigheten. Man måtte derfor gjøre meget omhyggelige forsøk med interferens av to lysstråler, hvorav den ene er parallell med jordbevegelsen og den andre står normalt på denne. Michelsons første eksperiment av denne type, som ble utført i 1881, hadde ikke vært nøyaktig nok. Men heller ikke senere gjentakelser av eksperimentet viste det minste tegn på den forventede effekt, og Moreleys og Millers eksperimenter i 1904 ble betraktet som det endelige bevis for at det her ikke finnes en effekt av den størrelsesorden man hadde regnet med

Dette resultatet syntes i første omgang uforståelig, men det berørte også et spørsmål som fysikerne allerede tidligere hadde diskutert. I den newtonske mekanikk gjelder et visst relativitetsprinsipp som kan beskrive slik: hvis legemenes mekaniske bevegelse i et bestemt referansesystem oppfyller lovene for den newtonske mekanikk, da gjelder dette også for et hvert annet referansesystem som beveger seg jevnt translatorisk [rettlinjet] i forhold til det første. En jevn translasjonsbevegelse frembringer altså ingen som helst iakttagbar mekaniske effekter i dette system og kan derfor heller ikke på noen måter iakttas gjennom slike effekter.

Et slikt relativitetsprinsipp syntes for fysikerne ikke å kunne gjelde i optikken og i elektrodynamikken. For hvis det første system var i ro i forhold til eteren så ville det bevegede system ikke være i ro, og derfor skulle man kunne iakttas dettes bevegelse relativt til eteren gjennom effekter av den typen som Michelson hadde undersøkt. Det negative resultat av eksperimentet til Moreley og Miller i året 1904 førte til en gjenopplivelse av ideen om at det relativitetsprinsipp som gjelder i den newtonske mekanikk kunne være like sant i elektrodynamikken.

På den annen side fantes det gammelt forsøk av Fizeau fra året 1851, som syntes å stride mot dette relativitetsprinsippet. Fizeau hadde målt lysets hastighet i en beveget væske. Hvis relativitetsprinsippet var riktig, skulle den samlede hastighet av lyset i den bevegede væsken være lik summen av væskens hastighet og lyshastigheten i den hvilende væske. Men det var ikke tilfelle. Fizeaus forsøk viste at den samlede hastighet var noe mindre enn den nevnte sum.

Det negative resultat av alle forsøk på å bestemme bevegelsen relativt til eteren, ga imidlertid fysikerne og matematikerne anledning til å se seg om etter en matematisk tydning av disse forsøkene, som kunne bringe bølgeligningen for lysets utbredelse i samklang med relativitetsprinsippet. Lorentz foreslo derfor i året 1904 en matematisk formel, som oppfylte dette kravet. Han måtte da innføre den hypotese, at bevegede legemer kontraherer (trekker seg sammen) i retning av sin bevegelse, og da med en faktor som avhang av legemets hastighet, og at i forskjellige referansesystemer blir det også målt forskjellige tilsynelatende tider, som i mange forsøk spiller den samme rolle som tidligere den virkelige tid. På denne måten kom Lorentz til et resultat som tilfredsstilte relativitetsprinsippet. Lysets tilsynelatende hastighet var nu den samme i et hvert referansesystem. Liknende tanker var blitt diskutert av Poincaré, Fitzgerald og andre fysikere.

Det avgjørende skritt ble tatt av Einstein i 1905, idet han erklærte Lorentz-transformasjonens tilsynelatende tid for å være den virkelige tid, mens den tid som Lorentz hadde kalt "virkelig" ble eliminert fra betraktningen. Det betydde en forandring i fysikkens grunnlag, en helt uventet og radikal forandring, som krevet et ungt og revolusjonært genis hele mot. For å fullbyrde dette skritt behøvde man i den matematiske fremstilling av naturen ikke gjøre mer enn å anvende Lorentz-transformasjonen på erfaringen på en motsigelsesfri måte. Men gjennom den nye tyding av denne transformasjonen ble fysikernes oppfatning av tidens og rommets struktur forandret og mange av fysikkens problemer viste seg i et nytt lys. Substansen eter viste seg f. eks. å være unødvendig og kunne ganske enkelt strykes fra fysikken. For siden alle referansesystemer, som befinner seg i jevn translasjonsbevegelse i forhold til hverandre, er ekvivalente i beskrivelsen av naturen, har det ikke lenger noen mening at det skulle finnes en substans eter, som er i ro i et bestemt av disse referansesystemene. En slik substans trenges ikke, og det er meget enklere å si at lysbølgene forplanter seg i det tomme rom, og at de elektromagnetiske felter har sin egen realitet og kan forekomme i det tomme rom.

Men den avgjørende forandring gikk på strukturen av rom og tid. Det er meget vanskelig å beskrive denne forandringen i det vanlige språkets ord, uten å benytte matematikk, siden de vanlige ordene rom og tid refererer til en struktur av rom og tid, som faktisk fremstiller en idealisering og forenkling av den virkelige struktur. Likevel må man forsøke å beskrive den nye struktur, og kanskje kan det skje på følgende måte: Når vi bruker ordet "fortid", mener vi alle hendelser som vi, i det minste i prinsippet, kan vite noe om, som vi har kunnet erfare noe om. På tilsvarende måte omfatter ordet "fremtid" alle de hendelser som vi, i det minste i prinsippet, ennå skulle kunne innvirke på, og som vi kunne forsøke å forandre eller forhindre. Det er riktignok i første omgang vanskelig å erkjenne, hvorfor denne definisjon av ordene "fortid" og "fremtid" skal være særlig hensiktsmessig. Men man kan lett se at den faktisk passer meget godt til den vanlig bruk av disse uttrykkene. Hvis man bruker dem på denne måten, så avhenger, slik resultatene av mange eksperimenter viser, innholdet av fremtid og fortid ikke av iakttagers bevegelsestilstand eller andre egenskaper. I et mer matematisk språk kan man si at den anførte definisjon er invariant overfor iakttagers bevegelse. Det gjelder så vel i den newtonske mekanikk som i den einsteinske relativitetsteori.

Men det består en avgjørende forskjell: I den klassiske teori antar vi at fremtid og fortid er skilt fra hverandre ved et uendelig kort tidsintervall som man kan kalle det nåværende øyeblikk. Men i relativitetsteorien har vi lært, at det forholder seg noe annerledes. Fremtid og fortid er skilt fra hverandre ved et endelig tidsintervall, hvis varighet avhenger av avstanden fra iakttageren. En eller annen virkning kan bare forplante seg med en hastighet som er mindre eller lik lysets hastighet. Derfor kan en iakttagere i et gitt øyeblikk verken kjenne eller influere på en begivenhet som finner sted i et fjernt punkt mellom de to karakteristiske tidene. Den ene tid er det øyeblikk da et lyssignal måtte sendes ut fra stedet for hendelsen, for å nå frem til iakttageren i det øyeblikk han iakttar det. Den andre tid er det øyeblikk, da et lyssignal, som blir sendt fra iakttageren i iakttagelsesøyeblikket når frem til stedet for hendelsen. Hele det endelige tidsintervall mellom disse to øyeblikkene kan for iakttageren i iakttagelsesaktens øyeblikk defineres som "nåtid". For hvilken som helst hendelse i dette tidsintervallet kan i iakttagelsesaktens øyeblikk da verken være kjent eller bli influert på, og slik var det jo

begrepet "nåtid" var blitt definert. Enhver begivenhet som finner sted mellom de to karakteristiske tider, kan kalles "samtidig med iakttagelsesakten".

Bruken av uttrykket "kan kalles" tyder allerede på en tvetydighet i ordet "samtidig", som har sin grunn i at ordet "samtidig" stammer fra det daglige livs erfaringer, hvor lyshastigheten i praksis kan betraktes som uendelig stor. I fysikken kan ordet "samtidig" faktisk også defineres noe annerledes, og Einstein har i sine arbeider brukt denne andre definisjon av "samtidig". Når to begivenheter utspiller seg samtidig i samme rompunkt, sier vi at de sammenfaller. Dette uttrykk er helt entydig. Vi kan nu forestille oss tre punkter, som ligger på en rett linje i rommet, slik at punktet i midten har samme avstand fra de to andre punktene. Når to hendelser som finner sted i de to ytre punktene til slike tider at lyssignalene som utgår fra dem, sammenfaller, når de treffer det midtre punkt, så kan man definere de to hendelsene som "samtidige". Denne definisjon er da snevrere enn den første. En av dens viktigste konsekvenser er at hvis to begivenheter er samtidige for én iakttager, er de kanskje ikke samtidige for en annen. Og dette vil da være tilfelle når den annen iakttager beveger seg relativt til den første. En sammenknytning av de to definisjonene av "samtidig" kan man oppnå ved å si, at hvis to hendelser er samtidige i den første betydning, kan man alltid også finne et referansesystem, hvor de er samtidige i den annen betydning. Sammenhengen kan kanskje fremstilles anskueligere på følgende måte: La oss anta at en satellitt som kretser omkring jorden sender ut et signal som kort tid senere blir fanget opp av en målestasjon på jorden. Målestasjonen gir deretter satellitten en kommando, som ankommer den etter kort tid. Hele tidsintervallet på satellitten, fra utsendingen av signalet til mottagelse av kommandoen, kan i den første definisjon gjelde som "samtidig" med mottagelsesakten på jorden. Hvis man på satellitten griper ut et eller annet bestemt øyeblikk av dette intervall, i den andre definisjonens betydning, er dette øyeblikket riktignok i sin alminnelighet ikke "samtidig" med at signalet mottas på jorden, men vel finnes det et referansesystem, for hvilket denne samtidighet består.

Den første definisjon av ordet samtidig synes å svare noe bedre til den daglige bruk av dette ordet, siden spørsmålet om hvorvidt to hendelser er samtidige i det daglige liv med sikkerhet ikke avhenger av referansesystemet. Men i begge de relativistiske definisjoner har begrepet "samtidig" fått en presisjon, som det absolutt mangler i det daglige livs språk. I kvanteteorien måtte fysikerne allerede tidlig innse at den klassiske mekanikkens begreper bare beskriver naturen unøyaktig, at dens anvendelse begrenses av kvantelovene og at man derfor må være meget forsiktig ved anvendelsen av dem. I relativitetsteorien derimot har fysikerne forsøkt å forandre betydningen av den klassiske fysikkens ord, og å presisere disse begrepene på en slik måte at de svarer nøyaktig til den nyerkjente situasjon i naturen.

Den struktur av rom og tid som relativitetsteorien har brakt for dagen, har mange følger i de forskjellige deler av fysikken. De bevagede legemers elektrodynamikk kan uten vanskelighet avledes av relativitetsprinsippet. Dette prinsippet selv kan formuleres som en meget alminnelig naturlov, som ikke bare refererer seg til elektrodynamikken eller mekanikken, men til hver vilkårlig gruppe av naturlover: Lovene må anta den samme form i alle referansesystemer, som bare skiller seg fra hverandre gjennom en jevn translasjonsbevegelse. De er som man kan si, matematisk invariante overfor Lorentz-transformasjonen.

Kanskje den viktigste følge av relativitetsprinsippet er energiens treghet eller, som man kan uttrykke det, ekvivalensen av masse og energi. Siden lysets hastighet spiller rollen som en grensehastighet, som aldri kan oppnås av noe materielt legeme, så kan man lett innse, at det må være vanskeligere å akselerere et legeme som allerede er i bevegelse enn ett som ennå er i ro. Tregheten har altså tiltatt med den kinetiske energi. Helt alminnelig må ut fra relativitetsteorien enhver art av energi bidra til tregheten, d.v.s. til massen, og massen som er tilordnet en gitt energi er lik denne energi delt på kvadratet av lyshastigheten. Enhver energi bringer altså med seg masse; men selv en, etter normale begreper, meget stor energi bidrar likevel bare meget lite til massen, og det er grunnen til at forbindelsen mellom masse og energi tidligere ikke er blitt iaktatt. De to lover om massens bevarelse og energiens bevarelse mister sin adskilte gyldighet og blir forenet til en eneste lov, som man kan kalle loven om energiens eller massens bevarelse.

For 50 år siden da relativitetsteorien ble begrunnet, syntes hypotesen om ekvivalens av masse og energi som en revolusjon i fysikken, og det fantes den gang bare meget få eksperimentelle grunner for denne loven. I våre dager kan man i mange eksperimenter umiddelbart se hvordan elementærpartikler blir til av kinetisk energi, og hvordan slike partikler igjen kan forsvinne idet de går over i stråling. I dag er derfor forvandlingen av energi til masse og omvendt ikke noe usedvanlig.

De enorme energimengder som blir frigjort ved atomeksplosjoner, er et annet og meget mer iøynefallende bevis, for riktigheten av den Einsteinske ligning. Men kanskje skulle man her føye inn en kritisk historisk bemerkning. Det blir leilighetsvis hevdet at de enorme energimengdene ved atomeksplosjoner oppstår umiddelbart gjennom en forvandling, av masse til energi og at man bare på grunn av relativitetsteorien kunne forutsi disse gigantiske energimengdene. Men denne oppfatning beror på en misforståelse. De store energimengdene som lagres i atomkjerner, var kjent fra Becquerels, Curies og Rutherfords eksperimenter med radioaktivt sammenbrudd. Ethvert radioaktivt legeme, som f. eks. radium, frembringer en varmemengde som er omtrent en million ganger større enn den varme som kan frigjøres fra den samme mengde materiale i en kjemisk prosess. Energien ved spalting av urankjernen har den samme opprinnelse som energien ved sammenbrudd av en radiumkjerne, nemlig hovedsakelig elektrostatiske frastøtninger mellom de to deler som atomkjernen blir spaltet i. Den energi som blir frigjort ved en atomeksplosjon, stammer altså direkte fra denne kilden og er ikke frembragt gjennom en forvandling av masse og energi. For antallet elementærpartikler med endelig hvilemasse avtar under eksplosjonen. Riktignok viser bindingsenergien mellom byggestenene i en atomkjerne seg også i deres hvilemasser, og derfor er frigivelsen av energi også indirekte knyttet sammen med forandringer i atomkjernenes masser.

Ekvivalensen av masse og energi har i tillegg til sin betydning for den praktiske fysikk også fremkastet problemer som henger sammen med meget gamle filosofiske spørsmålsstillinger. Forskjellige filosofiske systemer fra fortiden gikk ut fra den tese at substans eller masse ikke kan ødelegges. I den moderne fysikk har imidlertid mange eksperimenter vist at elementærpartikler, f. eks. positroner og elektroner, kan tilintetgjøres og forvandles til stråling. Betyr dette at de eldre filosofiske systemer dermed er gjendrevet av moderne erfaring, og at de argumenter som ble fremført i disse tidligere systemer, må anses for gale?

Dette ville sikkert være en noe forhastet og uberettiget følgeslutning, for begrepene "substans" og "materie" i den antikke eller den middelalderske filosofi kan ikke rett og slett identifiseres med uttrykket "masse" i den moderne fysikk. Hvis man vil uttrykke våre moderne erfaringer i disse eldre filosofiske systemers språk, så kunne man f. eks. anse masse og energi for to forskjellige former av den samme substans og på denne måte bibeholde forestillingen om at substansen er ikke ødeleggbar.

På den annen side vil man neppe kunne si at meget er vunnet når man uttaler moderne kunnskaper i et gammelt språk. Fortidens filosofiske systemer var formet ut fra den tids samlede viten og svarte derfor til den tenkemåte som har ført til slik viten. Man kan da sikkert ikke forvente at filosofer som har tenkt over naturen for flere hundre år siden, har kunnet forutse utviklingen av den moderne fysikk eller relativitetsteorien. De begreper som filosofene i en forgangen tid har kommet til gjennom en analyse av sin naturerfaring kan derfor ikke tilpasses de fenomener som vi i dag kan iakttatte med de kompliserteste tekniske hjelpemidler.

Men før vi omtaler de filosofiske konsekvenser av relativitetsteorien, vil vi først skildre den videre utvikling.

Den hypotetiske substansen "eter", som spilte en så viktig rolle for tydingen av Maxwells teori i det 19. århundrede, var, som allerede nevnt, blitt satt til side gjennom relativitetsteorien. Dette blir ofte også uttrykt ved å fastslå at det absolutte rom er satt til side, gjennom relativitetsteorien. Men en slik påstand må uttales med visse forbehold. Riktignok kan man, ifølge den spesielle relativitetsteorien, ikke lenger fremheve et bestemt referansesystem, i hvilket eteren er i ro og som derfor fortjener betegnelsen "absolutt rom". Men det vil likevel være galt å påstå at rommet nå har mistet alle fysiske egenskaper. Bevegelseslikningene for materielle legemer eller felt antar stadig vekk fortsatt forskjellig form i et "normalt" referansesystem, sammenliknet med et annet som i forhold til det normale referansesystem roterer jevnt. Hvis man i første omgang begrenser seg til relativitetsteorien fra 1905 og 1906, så beviser eksistensen av sentrifugalkrefter i et roterende referansesystem, at det finnes fysiske egenskaper ved rommet som tillater å skjelne mellom et roterende og et ikke roterende system.

Dette synes filosofisk utilfredsstillende, og man ville foretrekke å gi fysiske egenskaper bare til fysiske ting, som f. eks. materielle legemer eller felter, men ikke til det tomme rom. Ikke desto mindre, hvis man begrenser seg til å betrakte elektromagnetiske prosesser og mekaniske bevegelser, så følger eksistensen av disse egenskaper ved det tomme rom rett og slett av kjensgjerninger som ikke kan diskuteres bort, f. eks. av sentrifugalkraften.

En omhyggelig analyse av denne situasjonen førte Einstein ca. 10 år senere til en meget viktig utvidelse av relativitetsteorien som vanligvis blir betegnet som "alminnelig relativitetsteori". Før vi gjør rede for grunntankene i denne nye teori, skal det imidlertid sies noen ord om graden av sikkerhet man kan ha for riktigheten av disse to deler av relativitetsteorien. Teorien fra året 1905 og 1906, altså den såkalte "spesielle relativitetsteori" beror på et stort antall meget nøyaktig undersøkte eksperimentelle kjensgjerninger: på forsøkene til Michelson, Morley og mange tilsvarende eksperimenter, på ekvivalensen av masse og energi i et meget stort antall av radioaktive prosesser, enn videre på den meget nøyaktige iakttatte levetid for radioaktive prosesser i deres avhengighet av hastigheten til de radioaktive partikler osv. Denne teori hører altså til de faste sikre grunnlag for moderne fysikk og kan i vår nåværende situasjon ikke bestrides.

Ved den alminnelige relativitetsteori er derimot de eksperimentelle bevis meget mindre overbevisende, siden det eksperimentelle materiale i det store og hele er meget begrenset. Det finnes bare noen få astronomiske iakttagelser, ved hvis hjelp vi kan etterprøve riktigheten av den alminnelige relativitetsteoriens antagelser. Derfor er denne andre teori langt mer hypotetisk enn den første.

Den avgjørende grunnantagelse for den alminnelige relativitetsteori er likheten av tung og treg masse. Meget omhyggelige målinger har vist at et legemes masse, som er bestemt ved dets tyngde, er nøyaktig proporsjonal med den annen masse som er definert ved legemets treghet. Selv de nøyaktigste målinger har aldri gitt et avvik fra denne lov. Hvis den er allmen, kan gravitasjonskreftene settes i parallell til sentrifugalkreftene eller til andre krefter som oppstår som en reaksjon på treghetsvirkninger. Siden sentrifugalkreftene måtte bringes i forbindelse med det tomme roms fysikalske egenskaper, slik som tidligere nevnt, kom Einstein til den hypotese at også gravitasjonskreftene svarte til egenskaper ved det tomme rom. Dette var et meget viktig skritt, som øyeblikkelig nødvendiggjorde et videre skritt i samme retning. Vi vet at tyngdekraften blir fremkalt gjennom masser. Hvis derfor gravitasjonen henger sammen med rommets egenskaper, må disse egenskaper ved rommet være forårsaket av eller påvirket av massene. Sentrifugalkreftene i et roterende referansesystem må være frembragt av kanskje meget fjerne masser som roterer relativt til dette systemet.

For å utføre det program som er antydnet med disse satsene måtte Einstein forbinde de underliggende fysikalske tanker med det matematiske skjema for en alminnelig geometri som var utviklet av Riemann. Siden rommets egenskaper åpenbart endrer seg kontinuerlig med gravitasjonsfeltene, måtte geometrien sammenlignes med den geometri på krumme overflater hvor den rette linje i den euklidske geometri blir erstattet med en *geodetisk* linje, nemlig linjen for den korteste avstand, idet krumningen stadig endrer seg. Som sluttresultat kunne Einstein foreslå en matematisk formulering av relasjonen mellom massefordelingen og de parametre som bestemmes av geometrien. Denne teori fremstilte gravitasjonens kjente kjensgjerninger riktig. Den var i en meget god tilnærming identisk med den vanlig gravitasjonsteori, men utover det forutsa den noen få meget interessante effekter, som ligger på grensen til det målbare. Til dem hørte f. eks. tyngdekraftens virkning på lyset.

Når monokromatisk lys sendes ut fra en tung stjerne, mister lyskvantene energi under bevegelsen bort fra stjernen gjennom stjernens tyngdefelt. Følgelig må det fremkomme en rødforskyvning av de utsendte spektrallinjer. Det finnes hittil intet motsigelsesfritt eksperimentelt bevis for eksistensen av denne rødforskyvning, hvilket diskusjonen av forsøkene til Freundlich har vist meget klart. Men det er for tidlig å slutte at forsøkene har gjendrevet den Einsteinske teoriens forutsigelser.

En lysstråle som går nær forbi solen, skulle bli avbøyet av solens tyngdefelt. Denne avbøyning er påvist eksperimentelt i den riktige størrelsesorden av Freundlich og andre astronomer. Men om avbøyningen stemmer nøyaktig overens med den verdi som den Einsteinske teori har forutsagt, har ikke kunnet avgjøres.

Det beste eksperimentelle bevis av gyldigheten for den alminnelige relativitetsteori synes å være presesjonen i baneellipsen for planeten Merkur, en presesjon som åpenbart er i meget god overensstemmelse med den verdi som teorien har forutsagt.

Selv om altså det eksperimentelle grunnlag for den alminnelige relativitetsteori ennå er temmelig smalt, inneholder teorien likevel tanker av den største viktighet. I hele perioden fra antikkens matematikere frem til det 19. århundredet ble den Euklidske geometri, oppfattet som selvfølgelig. Euklids aksiomer gjaldt som grunnlaget for enhver matematisk geometri, et grunnlag som det ikke kunne stilles spørsmål ved. Da fant i det 19. århundre matematikerne Bolyai og Lobatschewski, Gauss og Riemann, at man kan konstruere andre geometrier, som utvikles med den samme matematiske strenghet som den Euklidske. Spørsmålet om hvilken geometri som er den riktige, ble derfor fra da av et empirisk spørsmål. Men først gjennom Einsteins verk kunne spørsmålet virkelig gripes opp av fysikerne. Den geometri som ble utviklet i den alminnelige relativitetsteori, refererte seg ikke bare til det tredimensjonale rom alene, men til den firedimensjonale helheten av tid og rom. Teorien oppretter en forbindelse mellom geometrien i denne helhet og fordelingen av masse i verdensaltet. Derfor reiste teorien de gamle spørsmål i en ny form, spørsmålene om rom og tid i de største dimensjoner. Den kunne foreslå svar som kunne etterprøves gjennom iakttagelser.

Man kunne derfor gripe meget gamle filosofiske spørsmål, som hadde beskjeftiget menneskeånden siden de tidligste epoker av filosofi og vitenskap: Er rommet endelig eller uendelig? Hva var før tiden begynte? Hva vil skje ved tidens slutt? Eller har tiden ingen begynnelse og ingen slutt? Disse spørsmålene hadde fått forskjellige svar i de forskjellige filosofier og religioner. I Aristoteles' filosofi f. eks. var universets samlede rom endelig selv om det var uendelig delbart. Rommet oppsto gjennom legemenes utstrekning, det var på sett og vis utspent av legemene. Derfor fantes intet rom, når intet legeme fantes. Universet besto av jorden og solen og stjernene, et endelig antall av legemer. Hinsides stjernenes sfære fantes intet rom. Derfor var universets rom endelig. I Kants filosofi hørte dette spørsmål til det som han kalte "antinomier", spørsmål som ikke kan besvares siden to forskjellige argumenter fører til motsatte resultater. Rommet kan ikke være endelig, for vi kan ikke forestille oss at det finnes en ende på rommet. Til hvilket punkt av rommet vi enn kunne komme, må vi alltid forestille oss at vi kunne gå enda lenger. Men rommet kan også heller ikke være uendelig, for rommet er noe, som vi kan forestille oss, ellers ville begrepet rom i det hele tatt ikke være dannet, og vi kan ikke forestille oss et uendelig rom. Med hensyn til denne annen påstand er Kants argument ikke blitt gjengitt ordrett. Satsen: "rommet er uendelig", betyr for oss noe negativt, vi kan ikke komme til noen ende av rommet. Men for Kant betydde rommets uendelighet noe som virkelig er gitt, noe som "eksisterer" på en måte, som vi knapt kan gjengi. Kant kommer til det resultat at det ikke finnes noe rasjonelt svar på spørsmålet om rommet er endelig eller uendelig, for det samlede univers kan ikke være gjenstand for vår erfaring.

På samme måte stiller det seg med hensyn til problemet om tidens uendelighet. I Augustins bekjennelser blir f. eks. spørsmålet stilt i denne form: "Hva har Gud gjort, før han skapte verden?" Augustin sa seg ikke tilfreds med det kjente svar: "Gud var beskjeftiget med å opprette helvetet for folk som stilte dumme spørsmål." Dette ville være et altfor billig svar, mener Augustin; og han forsøker seg på en rasjonal analyse av problemet: "Bare for oss løper tiden, bare vi forventer tiden som fremtid; den løper for oss som det nærværende øyeblikk og vi erindrer oss om den som fortid." Men Gud er ikke i tiden. Tusen år er for ham som en dag og en dag er som tusen år. Tiden er blitt skapt sammen med verden, den hører altså til verden, og derfor fantes ingen tid før

universet eksisterte. Universets samlede forløp er for Gud gitt på en gang. Det fantes altså ingen tid før han hadde skapt verden.

Man erkjenner riktignok lett, at i slike formuleringer, reiser begrepet ”skapt”, straks alle vesentlige vanskeligheter. Dette ord betyr slik det vanligvis blir brukt, forutsetter noe som oppstår, og som tidligere ikke har bestått, og i denne forstand forutsetter det allerede begrepet tid. Derfor ville det vel være umulig å definere i rasjonelle uttrykk hva man kan mene med vendingen at tiden er blitt skapt. Denne kjensgjerning minner oss om den lære som må trekkes av den moderne fysikk, at nemlig hvert ord eller hvert begrep, så klart det enn kan synes for oss, dog alltid bare har et begrenset anvendelsesområde.

I den alminnelige relativitetsteori kan spørsmålene om rommets og tidens uendelighet stilles og også delvis besvares på et empirisk grunnlag. Hvis sammenknytningen mellom den firedimensjonale geometri for rom og tid og massefordelingen i universet blir riktig beskrevet av teorien, kan astronomiske iakttagelser gi oss informasjon om universets geometri i sin helhet. Man kan da i det minste konstruere modeller for universet, kosmologiske bilder, hvis konsekvenser vil kunne sammenlignes med de empiriske kjensgjerninger.

Vår nåværende astronomiske kunnskap tillater oss ikke å skjelne endelig mellom visse mulige modeller. Det kan være at universets rom er endelig. Dette vil ikke bety at det på noe sted finnes en slutt, en ende for universet. Det vil bare medføre, at vi når vi går videre og videre i en bestemt retning i universet, vil vi til slutt måtte vende tilbake til det punkt vi har kommet fra. Situasjonen ville altså være lignende ved den todimensjonale geometri på ordoverflaten, hvor vi jo også når vi skrider videre fra et bestemt punkt, la oss si i østlig retning, til slutt vil vende tilbake til dette punkt fra vest.

Hva tiden angår, så synes det her å foreligge noe som en begynnelse. Mange iakttagelser tyder på at universet ”begynte” for ca. 4 milliarder år siden – eller i det minste, at på den tid all materie i universet var konsentrert i et meget mindre rom enn nu, og at universet senere har utvidet seg fra dette lille rom stadig videre med forskjellige hastigheter. Denne tid på 4 milliarder år opptrer stadig igjen i forskjellige iakttagelser f. eks. i meteorittenes alder og mineralenes alder på jorden osv., og derfor vil det være vanskelig å finne en tydning som skulle være forskjellig fra tanken på en verdensopprikkelse for 4 milliarder år siden. Hvis tanken om en opprikkelse i denne form viser seg å være riktig, betyr det at bak denne tid – dvs. for mer enn 4 milliarder år siden – ville det innebære at tidens begrep må gjennomgå vesentlige forandringer. Denne meget mer forsiktige formulering trer da i stedet for den enklere formulering av verdens skapelse. Ut fra de nåværende astronomiske iakttagelser kan disse spørsmål om rom–tidens geometri i det store og det hele ennå ikke besvares med noen grad av sikkerhet. Men det er allerede interessant nok å vite at spørsmålene kanskje senere en gang vil kunne besvares på det faste grunnlag av astronomiske erfaringer.

Selv om man begrenser de videre betraktninger til den spesielle relativitetsteorien som er sikkert begrunnet, så kan man ikke tvile på at denne teori i høyeste grad har forandret vår oppfatning av strukturen av rom og tid. Det mest foruroligende ved disse forandringer er kanskje ikke så meget deres spesielle natur, men den kjensgjerning, at de overhodet har vært mulige.

Den struktur av rom og tid som Newton fastla som grunnlag for sin beskrivelse av naturen inneholdt ingen indre motsetninger. Den var enkel og tilsvarte meget nøyaktig den bruk av begrepene rom og tid, som vi har vennt oss til i det daglige liv. Korrespondansen var faktisk så tett at Newtons repetisjon rett og slett kan betraktes som den presise matematiske formulering av de begreper om rom og tid som brukes i det daglige liv. Før relativitetsteorien ble det betraktet som selvfølgelig at prosessene i tiden kan ordnes uavhengig av deres ordning i rommet. Vi vet at dette inntrykk i den daglige erfaring oppstår derved at lyshastigheten er svært meget større enn noen annen hastighet som man har å gjøre med i det praktiske liv. Denne begrensning var man naturligvis den gang ikke blitt klar over. Men selv om man kjenner denne begrensning kan man neppe forestille seg at prosessenes orden i tiden skulle avhenge av deres romlige orden dvs. av det sted hvor de finner sted.

Kants filosofi vendte senere oppmerksomheten mot den kjensgjerning at begrepene rom og tid hører til vårt forhold til naturen, ikke bare til naturen selv; at vi ikke kan beskrive naturen uten å betjene oss av disse begrepene. Derfor er disse begrepene i en viss forstand a priori, de er betingelsen for erfaring og ikke primært et resultat av erfaring, og man antok derfor alminnelig at de ikke vil kunne endres gjennom nye erfaringer. Derfor kom nødvendigheten av en forandring som en stor overraskelse. For første gang erfarte vitenskapsmennene, hvor forsiktig man må være, når man forsøker å anvende det daglige livs begreper på den forfinede erfaring som fremkommer gjennom den moderne eksperimentelle teknikk. Selv den presise og motsigelsesfrie formulering av disse begreper i den Newtonske mekanikkens matematiske språk, eller den omhyggelige analyse i Kants filosofi, hadde ikke gitt noen beskyttelse mot den kritiske analyse som senere ble muliggjort gjennom overordentlig nøyaktige målinger. Denne advarsel viste seg senere som overordentlig nyttig for utviklingen av den moderne fysikk og det ville helt sikkert vært ennå meget vanskeligere å forstå kvanteteorien, hvis ikke relativitetsteoriens suksess hadde advart fysikerne mot den ukritiske anvendelse av begreper, som blir hentet fra det daglige liv eller klassiske fysikk.



