

Het tijdsbegrip in de fysica

Fysica is een beschrijvend vak. Een beoefenaar van dat vak, ofwel fysicus, zal zich niet gauw laten verleiden tot het beantwoorden van de vraag wát iets is, want hij realiseert zich dat dit dikwijls niet kan zonder in tautologieën te vervallen. Hij wil weten hoè iets is. Welke eigenschappen of verschijnselen zijn kenmerkend voor één of ander begrip, en wat is de meest elegante samenvattende formulering van de wetmatigheden die we zien.

De fysicus zal u dus niets vertellen over het 'wezen' van de tijd. Wel heeft hij een hoop geleerd over de wijze waarop het tijdsbegrip gehanteerd dient te worden teneinde een beter inzicht te krijgen in de fysische verschijnselen om ons heen. Het onderstaande is hiervan een verslag.

We hebben geleerd dat we alle gebeurtenissen in deze wereld kunnen voorzien van een 'etiket' waarop we de stand van de sterren kunnen noteren, of de stand van de maan, of het niveau van zand dat bezig is door een gaatje in een zandloper te zakken. Dit etiket noemen we 'tijd' (eigenlijk 'tijdstip') van de gebeurtenis. Er worden heel wat verschillende soorten etiketten gebruikt.

Behalve het bovengenoemde kan men met zo'n etiket aangeven welke farao aan het bewind was en hoe lang al, of hoeveel jaren vóór of na de gebeurtenis een zeker jongetje geboren is. Het eerste empirische gegeven is nu dat al deze etiketten 'equivalent' zijn. Uit één van bovengenoemde gegevens kun je, via een omrekeningsformule, alle andere afleiden.

De tweede zeer belangrijke ontdekking is dat deze omrekeningsformule meestal 'lineair' is: de hoeveelheid zand die door een zandloper loopt is recht evenredig met de verplaatsing van de zon aan de hemel, en evenredig met de verplaatsing van de maan tussen de sterren. Dit stelde ons in staat 'tijdseenheden' in te voeren: het jaar, de dag, maand, seconde. En het aantal seconden in een dag, het aantal dagen in een jaar, kunnen we als constant beschouwen. Hiermee is 'tijd' verheven tot een fysische grootheid die gemeten kan worden. Uit het bestaan van omrekeningsformules blijkt dat er maar één tijd is.

Een analoog verhaal kunnen we nu houden voor andere fundamentele fysische grootheden zoals 'lengte' (of 'afstand') en 'gewicht' (of 'massa'). Met deze be-

Gerard 't Hooft (1946) behaalde in 1969 het doctoraalexamen Theoretische Natuurkunde. Hij promoveerde in 1972 op een proefschrift getiteld 'Renormalisation Procedure for Yang-Mills Fields'. Hij is sedert 1977 hoogleraar Theoretische Natuurkunde aan de Universiteit van Utrecht.

grippen kunnen natuurverschijnselen nauwkeurig worden beschreven. Galilei en Newton behoorden tot de eersten die in deze zin exact enige natuurwetten konden formuleren. Het was vooral Huygens die zich realiseerde dat vele oscillerende (trillings-)verschijnselen door dergelijke wetten worden bepaald en hij merkte op dat de tijdsduur van één volledige oscillatie, de 'trillingstijd', veelal zeer constant is.

Dit stelde hem in staat tot het bouwen van zeer stabiele mechanische klokken. Het tellen van trillingen of slingerbewegingen is zo gemakkelijk dat tijdsmetingen bij verre de meest nauwkeurige metingen zijn, ook in de meest moderne fysica. Om een voorbeeld te noemen: een waterstofatoom heeft een interne trillingsfrequentie van 1420.405.715,786 trillingen per seconde. Als men de afstand van hier tot de maan met die nauwkeurigheid kon meten dan zou men nog geen millimeter speling hebben!

Een derde fundamentele waarneming van de fysica heet 'tijdsinvariantie'. Dit betekent dat een experiment dat op een willekeurig later tijdstip herhaald wordt dezelfde uitkomst geeft als voorheen. Dit is lang geen vanzelfsprekendheid want de stand van maan, sterren en planeten verandert wel steeds weer. De wet van 'tijdsinvariantie' geldt dus alleen binnen bepaalde beperkingen. Deze wet verklaart overigens de eerder genoemde lineariteit van de tijd: de meeste trillingen (die je zou kunnen opvatten als steeds maar weer herhaalde 'experimenten') duren steeds even lang.

Andere, vergelijkbare, invarianties in de natuur zijn 'translatie-invariantie' (de uitkomst van een experiment blijft dezelfde als je de opstelling verplaatst over een willekeurige afstand) en 'rotatie-invariantie' (als je de opstelling een slag draait).

Tot hun verbazing ontdekten de natuurkundigen nu dat de meeste wetten die zij exact konden formuleren nog een invariantie hebben, en wel: 'tijdsomkeer-invariantie'. Dit betekent dat als een film van een in de lucht gegooide steen, of een logboek van de stand van de planeten rond de zon, achteruit zou worden afgedraaid, dan voldoet datgene wat getoond wordt weer aan dezelfde natuurwetten, (fig. 1).

Op tweeërlei wijze is deze invariantie niet volmaakt. In de eerste plaats gedraagt de natuur om ons heen zich helemaal niet symmetrisch voor tijdsomkeer: bomen kunnen wel groeien maar niet kleiner worden; fietsen kunnen vooruit maar niet achteruit rijden, enzovoorts. De meeste fysici menen echter dat hiervoor een passende

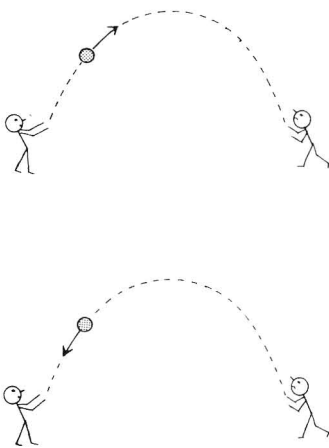


Fig. 1. Tijdsomkeer-invariantie van sommige natuurwetten: de steen gegooid in omgekeerde richting volgt dezelfde baan.

verklaring mogelijk is.

Als we op een biljarttafel een aantal ballen in een keurig symmetrisch patroon leggen en er dan één bal hard tegen aan gooien, dan verdwijnt het patroon, en zolang de ballen aan botsingswetten voldoen die tijdsomkeer-invariantie hebben (en dat doen ze in goede benadering) dan blijven ze rollen en bewegen, maar het oorspronkelijke patroon, met die ene bal die weer terugschiet, komt er nooit meer uit (fig. 2).

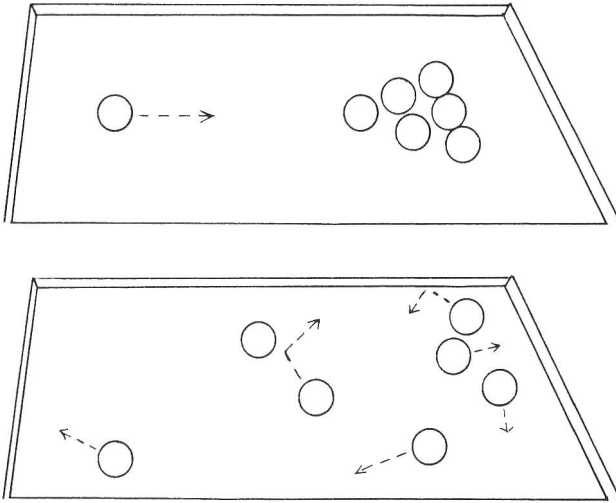


Fig. 2. Ook als voor de botsingen van iedere biljartbal afzonderlijk tijdsomkeer-invariantie geldt, kan de hier geschetste eindtoestand wél uit de begintoestand komen, maar niet andersom: de 'chaos' neemt alleen maar toe.

De reden is hier duidelijk: we waren in staat de begin-toestand naar believen te kiezen, niét de eindtoestand. Deze is chaotischer. Dit nu kan de reden zijn van het niet tijd-symmetrisch zijn van de *macroscopische* natuur ondanks het feit dat de *microscopische* natuurwetten wél tijdsomkeer-invariantie vertonen: de 'chaos' kan alleen maar toenemen.

Of: niet de natuurwetten zelf, maar de 'begin- en eindvoorwaarden' schenden deze invariantie, omdat we steeds wél de begintoestand maar niet de eindtoestand in de hand hebben. Ik moet er onmiddellijk bij zeggen dat deze 'verklaring' niet alle moeilijkheden op dit punt wegneemt: waarom was er kennelijk in het verleden zoveel meer ordening, en in de toekomst zoveel meer chaos? Het is niet zeker of de natuurkunde alléén een dergelijke 'waarom'-vraag zal kunnen beantwoorden.

Een tweede schending van de tijdsomkeer-invariantie komt van de microscopische wetten zelf. Er bestaat één soort subatomair deeltje, dat we K_L^0 meson noemen. (In deze naam betekent '0' dat het deeltje electrisch neutraal is, en de 'L' duidt aan dat we van de twee K^0 deeltjes

de variant kiezen die de langste levensduur heeft, nl. één 20-miljoenste seconde.) Dit nu valt in ongeveer 0,3% van de waarnemingen op afwijkende wijze uitéén, en wel in twee pionen. De enige kracht waarmee men dit verschijnsel kan verklaren is er één die niet tijdsomkeersymmetrisch is. Laat ik trachten dit nader toe te lichten. Er zijn nl. nog twee andere 'omkeringen' te beschouwen. De eerste is 'pariteitsomkeer', aangeduid met de letter P . Dat is de vergelijking van een verschijnsel met zijn *spiegelbeeld*. In 1956 werd voor het eerst opgemerkt door de natuurkundigen Lee en Yang dat wanneer bepaalde radioactieve atoomkernen een electron uitzenden, dit proces anders is dan zijn spiegelbeeld (zie fig. 3) omdat het uitgezonden electron vaker linksom dan rechtsom draait. We noemen dit een 'schending van P-invariantie'. Een tweede 'omkering' is echter de vervanging van deeltjes door de bijbehorende *antideeltjes*. Dit duiden we aan met de letter C (voor 'conjugatie'). Atoomkernen van *antimaterie* zenden *anti-electronen* uit die bij voorkeur *rechtsom* draaien. Het radioactieve vervalsproces van atoomkernen is dus precies als het *spiegelbeeld* van *anti-atoomkernen*, en we noemen dat 'CP-invariantie'. Al onze natuurwetten blijken CP-invariantie te vertonen met één enkele uitzondering: die 0,3% van de K_L^0 -mesonen die in pionen uiteenvallen (fig. 4) zien er *anders* uit dan in de spiegel, terwijl ze *gelijk* zijn aan hun eigen antideeltjes. (Wat er precies anders is in het spiegelbeeld kan ik niet in populaire termen uiteenzetten; het is de quantummechanische golf functie die in tegengestelde richting trilt.)

Wat heeft dit alles met tijdsomkeer(T) te maken? Welnu, volgens alle bekende deeltjestheorieën moeten alle deeltjesprocessen gelijk verlopen als de tijdsomgekeerde, gespiegelde processen van de bijbehorende antideeltjes: iedere kracht die we kennen is 'CPT-invariant'. Dit klopt met alle waarnemingen, bijvoorbeeld dat de massa

Fig. 3. Een atoomkern zendt een electron uit dat bij voorkeur linksom draait (links boven). Gezien in de spiegel (P) draait het rechtsom. Bij de antideeltjes (C) is dit andersom. De antideeltjes in de spiegel (CP) gedragen zich dus net als het oorspronkelijke systeem. Alleen K_L^0 vormt hierop een uitzondering. Als we nu in de spiegel ook nog de tijdsrichting omkeren (CPT), dan zien we daarin een proces dat volgens exact dezelfde natuurwetten verloopt als het oorspronkelijke.

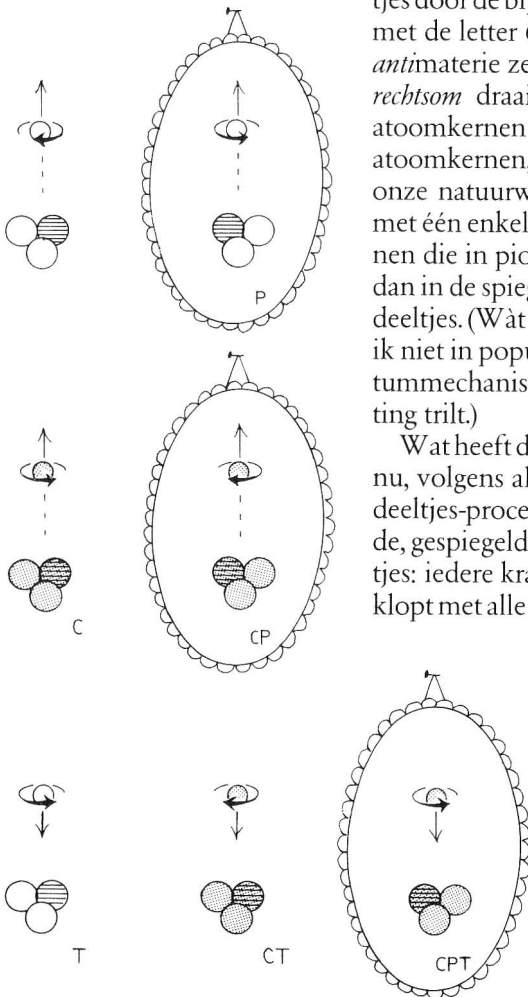
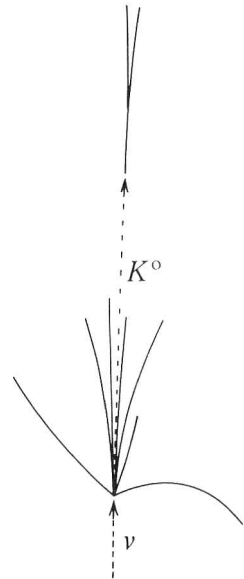




Fig. 4. Foto van een K^0 deeltje dat in twee pionen uiteenvalt. De schets geeft weer hoe we de foto moeten interpreteren. Een neutrino (ν) geproduceerd met de deeltjesversneller SPS (Superproton-synchrotron) van het Europese versneller instituut CERN, reageert met een atoomkern (deuterium) in een z.g. 'bellenvat', dat in dit geval gesierd wordt met de codenaam BEBC. Er worden elektrisch geladen deeltjes geproduceerd die sporen van microscopische belletjes achterlaten. Het tevens geproduceerde K^0 zien we niet direct, maar even verder zien we wel dat het uiteenvalt in twee geladen pionen.



van een deeltje altijd zeer nauwkeurig overeenkomt met die van zijn antideeltje. Als het K_L^0 meson niet CP-invariant is, dan kan het ook niet T-invariant zijn, alhoewel we nog nooit direct de tijdsomgekeerde reactie, 2 pionen $\rightarrow K_L^0$, hebben kunnen zien (het proces zou uiterst zeldzaam zijn). Dus als we alléén de tijd omkeren, maar niet spiegelen of deeltjes door antideeltjes vervangen, dan zien de natuurwetten er niet precies eender uit.

Deze waarnemingen hebben aanleiding gegeven tot interessante speculaties. In het allereerste beginstadium van de kosmos (waarvan astrofysici geloven dat die door een grote 'oerknal' is ontstaan) was er nog geen stationaire situatie. Doordat het heelal zeer snel bezig was uit te dijen was de omgeving van ieder deeltje heel anders dan bij tijdsomkeer (als het heelal even snel inkrimpt). Dus konden krachten die weliswaar CPT-invariant zijn maar niet CP- of C-invariant, een situatie doen ontstaan waar-

bij méér deeltjes dan antideeltjes werden gecreëerd. Een verklaring voor de aanwezigheid van meer materie dan antimaterie in het heelal? Een mogelijkheid waar hard aan wordt gerekend.

Tijd en relativiteit

Geen van de ontwikkelingen in de natuurkunde heeft zozeer tot de verbeelding gesproken als de prestaties van één man, Albert Einstein. In de volksmond gelden diens theorieën als het summum van scherpzinnigheid. Zij leggen een grote beperking op het maken van verre ruimte-reizen: je mag niet sneller gaan dan het licht. Dat is vervelend als men bedenkt dat vele interessante werelden duizenden lichtjaren ver van ons vandaan zijn. Ik vermoed dat dit alles de grote aantrekkingskracht verklaart die dit soort theorieën uitoefent op amateur-natuurkundigen: ze proberen deze op grond van 'nog scherpzinniger' argumenten te weerleggen.

Welnu, weliswaar was er zeer veel scherpzinnigheid voor nodig om op het idee te komen, maar de intelligentie van de gemiddelde natuurkundige, en enige wiskundige scholing, zijn meer dan voldoende voor het begrijpen en accepteren daarvan. De logica blijkt simpel en onwrikbaar te zijn. Natuurlijk waren dit theorieën, die als zodanig langs experimentele weg geverifieerd dienden te worden. Dit is nu talloze malen, direct of indirect, gebeurd. Afwijkingen zijn eigenlijk alleen nog maar denkbaar bij extreme omstandigheden zoals uiterst sterke gravitatievelden die in het laboratorium niet zijn te realiseren.

Inderdaad hebben zowel de speciale als de algemene relativiteitstheorie het begrip 'tijd' in een geheel nieuw daglicht gezet. Allereerst werd ontdekt dat het begrip 'gelijktijdigheid' geen vanzelfsprekendheid meer is, omdat ieder signaal dat van één punt naar een ander punt reist, een zekere minimumtijd nodig heeft om aan te komen. Ook hier weer heeft de natuurkundige door schade en schande geleerd dat men niet moet vragen: 'Wat is gelijktijdigheid?' maar: 'hoe ga ik met dat begrip om?' Een klok die in Rotterdam staat zou men gelijk kunnen zetten met een klok die in Utrecht staat door middel van een tijdsein, uitgezonden bijvoorbeeld vanuit Utrecht. Maar dan moeten we er wel rekening mee houden dat zo'n signaal een zekere looptijd heeft, ca. 0,00016 seconde. Daar zou je voor moeten corrigeren, of je zou een tijdsein kunnen laten uitzenden vanuit Gouda, ongeveer halverwege tussen Rotterdam en Utrecht. Dit is allemaal best

zolang alle klokken en zenders stilstaan. Maar wat als men een klok wil gelijkzetten in de trein van Rotterdam naar Utrecht? Niet alleen moeten we de positie van die trein precies kennen, maar er is een fundamentele moeilijkheid: gedurende die 0,00016 seconde heeft de trein een eindje gereden en dus is de positie niet éénduidig gedefinieerd. Het gelijkzetten van de klok kan op verschillende manieren, met verschillende resultaten als uitkomst.

Een correcte manier om hier te werk te gaan is eenvoudig: we voorzien iedere gebeurtenis in het heelal van vier etiketten: één voor tijd en drie voor ruimte. Tijd en ruimte worden nauw verweven, want onze omrekeningsformules kunnen nu alle vier etiketten betrekken. Dit bleek onvermijdelijk voor een precieze formulering van nóg een alledaagse invariantie, die ik hier zal aanduiden als 'snelheids-invariantie': een experiment uitgevoerd in een rijdende trein geeft hetzelfde resultaat als wanneer de trein stilstaat. Doordat licht- en radiostralen hieraan óók moeten voldoen werd dit 'Lorentz-invariantie': de basis voor de relativiteitstheorie. Het ligt echter niet in mijn bedoeling de hele relativiteitstheorie uiteen te zetten. Eén resultaat is zeer wel bekend: het is onmogelijk sneller te reizen dan het licht: 300.000 km per seconde.

Wat u wellicht niet verwacht had is dat de relativiteitstheorie strikt genomen toch nog de mogelijkheid openlaat binnen een tijdsduur van zo'n 50 jaar het ganse heelal te doorkruisen. Om dat te illustreren heb ik voor u een rekensommetje gemaakt. Om de details te begrijpen is een beetje wiskunde nodig waar ik niet op in wil gaan. Stel dat u een ruimteschip tot uw beschikking had met onbeperkte motorcapaciteit: U start de motor en laat hem voortdurend aan, maar u wenst een niet noemenswaardig grotere versnelling te ondergaan dan die welke u tegen de achterkant van uw schip aandrukt met een kracht gelijk aan uw eigen gewicht. Eén g, heet dat. U voelt zich dan comfortabel, net als op aarde.

Hoe ver kunt u komen? Thuisblijvers zullen uit uw signalen na 8 jaar constateren dat u de dichtstbijzijnde ster hebt bereikt. U bent dan 4 lichtjaar van ons verwijderd. Maar volgens uw eigen tijdrekening zijn er dan pas twee jaren verstreken. Het punt is namelijk dat uw eigen tijdsbesef (en ook uw horloge) dan niet meer synchroon loopt met dat van de thuisblijvers.

Als er volgens uw eigen tijdrekening 8 jaren zijn verlopen bevindt u zich al op meer dan 2000 lichtjaar afstand van uw vertrekpunt en hebt u dus al heel wat vreemde sterren en planeten langs zien flitsen. Na wat

voor u op 14 jaren lijkt zit u al op een miljoen lichtjaren van ons vandaan, en na 25 jaar bent u voorbij het verste stukje van het heelal dat ooit is waargenomen. Denkt u er echter wel aan dat voor het afremmen even veel tijd nodig is als voor de versnelling. Dus nog eens 25 jaar als u in die verre uithoek van het heelal wilt neerstrijken.

U kunt dan ook geen berichtje meer sturen naar uw geliefden thuis want het zal hen pas vele miljarden jaren na hun overlijden bereiken. Het is ook niet raadzaam weer terug te keren want dan komt u terecht op een aarde die al miljarden jaren lang is afgeleefd door een elkaar uitmoordende en uithongerende mensheid. Dat zijn dus de beperkingen die de speciale relativiteitstheorie stelt, en die door fysici niet redelijkerwijs nog in twijfel worden getrokken.

Het is onwaarschijnlijk dat ooit iemand de reis die ik schilderde echt zal maken, want de hoeveelheid energie die ervoor nodig zou zijn is onvoorstelbaar: in de formule $E = mc^2$ zou m zeker zo groot moeten zijn als de massa van de maan.

De tweede relativiteitstheorie van Einstein heet 'algemene relativiteitstheorie'. Deze beschrijft in detail eigenaardigheden van de zwaartekracht (gravitatie). Ook hier is het begrip tijd in het geding. Door de zwaartekracht krijgen ruimte en tijd een nog complexere structuur ('ruimte-tijd kromming'). Een directe consequentie is dat tijd gemeten in het zwaarte-veld van een zeer zware ster langzamer verloopt dan daar buiten. Dit is ook waargenomen: licht uitgezonden door trillende atomen in een ster-atmosfeer zien we langzamer trillen dan dat van atomen daarbuiten ('gravitationele roodverschuiving').

Causaliteit

Weliswaar zijn in Einsteins theorieën ruimte en tijd nauw met elkaar verweven, maar in één opzicht is tijd fundamenteel anders dan ruimte: tijd is georiënteerd. We zeggen dat de gebeurtenissen in ons universum 'partiël geordend' zijn, waarmee we bedoelen dat van twee gebeurtenissen de éne hetzij eerder plaatsvindt, hetzij later, of ze zijn 'ruimte-achtig gescheiden', d.w.z. een signaal uitgezonden bij de eerste gebeurtenis kan de andere niet tijdig bereiken en andersom. Bij het formuleren van de natuurwetten gaan we ervan uit dat het nooit en nergens mogelijk is een signaal uit te zenden dat weer op hetzelfde punt terugkomt nog vóór dat het uitgezonden is. Want anders zouden er tegenstrijdigheden ontstaan die ons het formuleren van natuurwetten onmogelijk

lijk maakt, en natuurwetten die op grond hiervan in strijd zijn met de logica verwerpen we. Dit principe heet 'causaliteit' en is in drie opzichten belangrijk in de natuurkunde.

Ten eerste legt causaliteit beperkingen op bij het formuleren van nieuwe theorieën. Niet alleen de relativiteitstheorie maar ook de quantumveldentheorie voor elementaire deeltjes is tot stand gekomen door dit principe nauwkeurig in de gaten te houden.

Ten tweede kunnen wij bepaalde eigenschappen afleiden van systemen zelfs als we niet precies weten volgens welke natuurwetten ze functioneren. Vooral voor systemen waarin zich golven voortplanten is dit nuttig. Voorbeelden zijn seismische golven in de aarde, lichtgolven in een medium, de-Broglie-golven van electronen en andere deeltjes, en elektrische trillingen in versterkers, 'chips', etc. Ieder inkomend signaal kan gezien worden als superposities van lange golfreinen met verschillende trillingsfrequenties.

Nu planten deze verschillende golven zich met verschillende snelheden voort, zodat het uitkomend signaal er heel anders uit kan zien dan wat er in ging. Niettemin mag geen enkel signaal eerder aankomen dan het vertrok. Hieruit leidt men, met wat wiskunde, vergelijkingen af waaraan de verschillende voortplantingssnelheden van de verschillende frequenties moeten voldoen: de z.g. dispersierelaties, voor het eerst afgeleid door de Nederlanders Kramers en Kronig.

Ten derde levert causaliteit handige rekenmethodes op. Zo is er enige tijd geleden nog bij ons instituut een proefschrift tot stand gekomen waarin stralingscorrecties van het uiteenvallingsproces van muonen werden uitgerekend, uitsluitend met behulp van dispersierelaties. Aangezien de gehanteerde theorie aan het causaliteitsbeginsel voldoet, mochten deze relaties zonder meer aangenomen worden.

Verdere speculaties

Zou alles wat er nu door fysici gezegd wordt over 'tijd' wel juist zijn? We lezen tegenwoordig zoveel science-fiction waarin met de huidige fysica (en vooral Einstein) de spot wordt gedreven. Men speculeert over reizen veel sneller dan het licht, over 'antigravitatie', en nog grotere onzin: telepatische machines, 'tijdreizen' naar verleden of toekomst en wat al niet. De natuurkunde is nog niet klaar. Niettemin meen ik met overtuiging te kunnen vaststellen dat zulke fantasieën die flagrant in strijd zijn

met alles wat de fysica ons nu leert, nooit realiseerbaar zullen zijn en ik zal trachten u duidelijk te maken waarop dat standpunt gebaseerd is.

Er zijn heel wat fundamentele fysische verschijnselen denkbaar waarvan de huidige theoretische natuurkunde niet weet hoe er een mathematisch passende beschrijving voor gevonden moet worden. Bijna zonder uitzondering betreft dit processen onder extreme omstandigheden die in het laboratorium niet te realiseren zijn, zoals wat ik reeds noemde, extreem sterke zwaartekrachtsvelden, maar ook: extreem sterke magneetvelden of botsingen van deeltjes met extreem hoge energieën, enzovoorts.

Ons inzicht maakt een snelle ontwikkeling door, en het kan best zijn dat we nieuwe aspecten van het begrip tijd zullen tegenkomen waar we nu nog geen weet van hebben. Over dit wetenschappelijke bewustwordingsproces bestaat echter veel misverstand, vooral helaas naar het schijnt bij wetenschapsgeschiedkundigen. Bij sommigen heeft de opvatting postgevat dat het wetenschappelijke inzicht zich beweegt van revolutie tot revolutie, waarbij iedere revolutie de ideeën van de vorige generaties ('paradigma') weer omverwerpt.

Deze gedachte is natuurlijk vooral populair bij hen voor wie de huidige wetenschappelijke kennis te moeilijk, te onbereikbaar is. Je kunt dan zeggen dat dat alles straks toch wel een verouderd paradigma zal zijn, en er je huidige simplistische ideeën voor in de plaats aanbieden. Het behoeft geen betoog dat dan enige argwaan op zijn plaats is.

Ik wil mij tegen deze interpretatie van het wetenschappelijke gebeuren krachtig teweerstellen. Het is waar dat de ontwikkelingen dikwijls stootsgewijs plaatsvinden, en soms moeten verouderde theorieën wijken voor modernere. Maar in de belangrijkste gevallen in dit vak wijken de oudere theorieën helemaal niet. Zij vormen juist de fundamenten van de nieuwere theoretische constructies. Galilei, Newton en Maxwell zullen nooit worden 'onttroond'. Wat zij zeiden blijft waar, maar er zijn systemen waar hun theorieën verder voor moesten worden aangevuld. Dit werd door Einstein gedaan, en voor hem zal op zijn beurt hetzelfde gelden. We weten al van voorbeelden waar zijn theorieën niet toereikend zijn voor een goed inzicht van wat er gebeurt. Maar waar zijn theorieën van toepassing zijn, zoals de ruimtereis die ik schetste, daar zullen zij blijven gelden.

U kunt deze situatie heel goed vergelijken met de wiskundige wet die door de Griek Pythagoras twee millen-

nia geleden werd ontdekt. Hij vond een mathematisch verband tussen de drie zijden van een rechte driehoek. Tegenwoordig weten we dat er niet-Euclidische meetkunde bestaat waarin deze wet niet meer geldt. Zelfs in de ruimte om ons heen is volgens Einstein de wet van Pythagoras niet exact; er is een minieme afwijking. Niettemin zal iedere bruggebouwer de wet van Pythagoras moeten blijven respecteren, en er is geen reden te denken dat die situatie ooit zal veranderen.

Een speculatie die wel door fysici serieus genomen wordt, en onze kijk op het begrip 'tijd' betreft, werd niet lang geleden door de beroemde fysicus Paul Dirac precies geformuleerd en verdedigd. Dit is de mogelijkheid dat de nu waargenomen natuurconstanten zoals de gravitatieconstante, en de fijnstructuurconstante, in feite niet constant zijn maar heel langzaam met de tijd veranderen.

De tijdschaal waarin deze veranderingen optreden zou de leeftijd van het heelal zelf moeten zijn, in de orde van 10 miljard jaar. Gedurende een jaar zouden sommige grootheden dus 0,00000001% veranderen. Het interessante van deze speculatie is dat de nu bereikte meetnauwkeurigheden, vooral in de ruimtevaart, soms de vereiste precisie bereiken en dat deze ideeën dus getoetst kunnen worden. Er is nog geen verandering waargenomen, en in sommige indirecte metingen is de precisie groot genoeg om te kunnen zeggen dat de natuurconstanten waarschijnlijk inderdaad constant zijn.