

Einstein's tweede postulaat

Matthijs Melissen

14 november 2005

Samenvatting

Het tweede postulaat van de speciale relativiteitstheorie van Einstein zegt dat de snelheid van licht in vacuüm gelijk is in alle inertiaalstelsels. In dit paper worden enkele aspecten van dit postulaat besproken. Het laat zien dat veranderingen in de denkwijze over c hebben gezorgd voor een enorme opwaardering van de status van deze constante. Tevens wordt besproken of c variabel kan zijn, en wordt aangetoond dat we experimenteel kunnen onderzoeken of de lichtsnelheid in alle richtingen even groot is.

1 Inleiding

De speciale relativiteitstheorie [1], in 1905 opgesteld door Albert Einstein, bestaat uit slechts twee postulaten [2]. Het eerste postulaat, het relativiteitsprincipe, zegt dat de wetten van de natuurkunde in elk inertiaalstelsel hetzelfde zijn. Einstein's tweede postulaat zegt dat de snelheid van licht in vacuüm gelijk is in alle inertiaalstelsels. De lichtsnelheid is dus ook onafhankelijk van de beweging van de bron.

In dit paper zal ik enkele aspecten van dit tweede postulaat bespreken. Eerst zal ik in het kort weergeven hoe er in de loop der geschiedenis tegen de lichtsnelheid aangekeken is. Vervolgens ga ik in op de vraag of c wel echt gelijk is voor elk punt in de ruimtetijd. Tot slot behandel ik de vraag hoe we kunnen weten dat de lichtsnelheid in elke richting even groot is.

2 Geschiedenis

Voor zover we weten, was Galileo de eerste die experimenteel onderzoek deed naar de snelheid van het licht. Tot die tijd beschouwde men de snelheid van het licht als oneindig. De experimenten van Galileo mislukten, maar de astronoom Ole Roemer slaagde er een halve eeuw later, in 1676, wel in om de lichtsnelheid te meten. In dit tijdperk was de status van de snelheid van het licht niet anders dan die van de snelheid van het geluid. De lichtsnelheid was simpelweg een eigenschap van licht.

In 1850 toonde Foucault aan dat de lichtsnelheid in water kleiner is dan die in vacuüm.

Hierdoor gingen de meeste natuurkundigen geloven dat licht altijd een medium, de *ether*, nodig had om zich voort te planten, en dat de lichtsnelheid een eigenschap van de ether was.

In 1856 maten Weber en Kohlrausch de waarden van ϵ_0 en μ_0 - twee constanten die verschenen in wetten die betrekking hadden op elektriciteit en magnetisme. Zij kwamen tot de ontdekking dat $(\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$ een waarde had die gelijk was aan de lichtsnelheid. Dat dit resultaat niet op toeval berustte, bleek in 1865, toen Maxwell zijn theorie van elektromagnetisme formuleerde, waaruit bleek dat licht een elektromagnetische verstoring is, die zich volgens elektromagnetische wetten voortplant. Op dit moment nam de status van c enorm toe, omdat deze constante niet meer alleen een voortplantingssnelheid was, maar ook gemeten kon worden bij elektrostatische en magnetostatische experimenten die niets met een snelheid te maken hadden.

De grootste verandering van de manier waarop er naar de lichtsnelheid gekeken werd, werd ongetwijfeld veroorzaakt door Einstein. Met de introductie van de speciale relativiteitstheorie werd c nu ook de verbinding tussen de concepten ruimte en tijd. Bovendien bleek de constante ook de snelheid te zijn waarmee zwaartekrachtgolven en alle massaloze deeltjes zich voortplanten.

De laatste grote verandering vond plaats in 1983, toen de meter opnieuw werd gedefinieerd in termen van de lichtsnelheid. Tot die tijd was de meter gedefinieerd als de grootte van een fysieke standaardmeter. De lichtsnelheid kon niet nauwkeuriger worden bepaald dan de grootte van dit object. Vanaf 1983 werd de meter gedefinieerd als de afstand die licht aflegt in 299 792 458 seconden. De grootte van de meter kon vanaf toen net zo nauwkeurig bepaald worden als dat de lichtsnelheid gemeten kon worden.

Uit bovenstaande blijkt wel dat de invloed van c , de constante die we hebben leren kennen als de lichtsnelheid, de laatste anderhalve eeuw dramatisch is toegenomen.

3 Is c constant in de loop der tijd?

Volgens het tweede postulaat van de speciale relativiteitstheorie van Einstein is de lichtsnelheid constant in elk inertiaalstelsel. Ellis en Uzan [3] menen echter dat c niet per se constant hoeft te zijn. Wat zou het betekenen als deze 'constante' niet constant zou zijn? Algemeen wordt aangenomen dat c een fundamentele constante is. Fundamentele constanten zijn fundamenteel in de zin dat ze 'niet met precisie kunnen worden uitgedrukt in fundamenteelere constanten; niet omdat de berekening te ingewikkeld is, maar omdat we niets fundamenteelers kennen'. Er bestaan twee typen van deze constanten: dimensieloze verhoudingen, en fundamentele eenheden. Fundamentele eenheden brengen altijd twee concepten die tot dan toe gescheiden waren samen tot één nieuw concept. Zo verenigt de Planckconstante \hbar door middel van de relatie $E = \hbar\omega$ de energie en frequentie van een deeltje tot één concept, waarvan frequentie en energie aspecten zijn. Op dezelfde manier verenigt de lichtsnelheid de concepten van ruimte en tijd.

Voor zover we weten hebben we maar drie onafhankelijke, fundamentele eenheden, namelijk die van massa, afstand en tijd, nodig om alle fysische grootheden te kunnen beschrijven.

De numerieke waarden van deze numerieke eenheden zijn arbitrair. We kunnen ze naar voorkeur alledrie op 1 stellen of zodanig dat de massa's, afstanden en gewichten die we in het dagelijks leven tegenkomen niet extreem groot of klein zijn.

Alleen van dimensieloze grootheden is het natuurkundig gezien betekenisvol om te zeggen dat de waarde hiervan verandert. Het meten van een fundamentele grootte is immers niets anders dan het vergelijken van die grootte met een fysisch systeem dat als referentie gekozen is. De waarden van de fysieke grootheden die we normaal gebruiken hangen af van historische definities, en de numerieke waarden van natuurconstanten hangen weer van deze grootheden af. Dat betekent dat alleen de variatie van 'constanten' die de verhouding tussen twee grootheden met dezelfde eenheid - dimensieloze constanten - fysisch betekenisvol is.

Toch kunnen we volgens Ellis en Uzan een nuttige theorie bedenken door aan te nemen dat c in de loop der tijd verandert terwijl de andere fundamentele constanten gelijk blijven, zodat een dimensieloze verhouding in de loop der tijd ook verandert. Zo laat Dirac de gravitatieconstante veranderen als de inverse van de kosmische tijd, terwijl de massa van elektronen, de Plankconstante en de lichtsnelheid constant blijven, zodat de dimensieloze verhouding $G(m_e)^2/\hbar c$ varieert. In deze theorie zouden atoomklokken niet synchron blijven lopen met op gravitatiekracht gebaseerde klokken zoals omloopbanen van hemellichamen.

Als we c laten variëren, moeten we volgens Ellis en Uzan wel oppassen *welke* c we laten variëren. Volgens deze auteurs moeten we conceptueel onderscheid maken tussen 4 verschillende opvattingen van c . Ten eerste is er c_{EM} , de elektromagnetische constante die zoals we al gezien hebben gelijk is aan $(\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$. Ten tweede is er een c_{ST} , de ruimte-tijdconstante. Dit is de c zoals we die kennen uit de Lorentz-transformaties. Ten derde is er c_{GW} , de snelheid van zwaartekrachtgolven. Ten vierde bestaat er een c_E , de ruimte-tijd-materieconstante van Einstein.

Hoewel het op theoretische en empirische gronden hoogstwaarschijnlijk is dat alle vier deze c 's gelijk aan elkaar zijn, kunnen we niet met zekerheid uitsluiten dat enkele van deze waardes verschillen. Zo verschillen c_{EM} en c_{ST} in het geval dat fotonen, in tegenstelling tot de heersende opvatting, toch een kleine rustmassa zouden hebben.

Het heeft dus geen fysische betekenis om c te laten variëren in de loop van de tijd, als we fundamentele eenheden tegelijk mee laten veranderen. Toch zijn er zinvolle theorieën op te stellen door c groter of kleiner te laten worden naarmate de tijd van een waarnemer verstrijkt.

4 Is c constant in elke richting?

Tot nu toe ben ik er vanuit gegaan dat de lichtsnelheid in alle richtingen even groot is. Deze eigenschap is vaak in twijfel getrokken. De meeste methoden om de lichtsnelheid te meten gaan er namelijk vanuit dat de lichtsnelheid in alle richtingen even groot is [4].

Het is bijvoorbeeld mogelijk een lichtbundel op een veraf verwijderde spiegel te laten vallen en de tijd te meten tot de lichtstraal weer terug is. Op die manier is het echter alleen mo-

gelijk de gemiddelde snelheid over de heen- en de terugweg te berekenen; het is niet mogelijk te achterhalen of deze beide snelheden aan elkaar gelijk zijn. Om dat te kunnen weten, moeten we gebruik maken van twee gesynchroniseerde klokken. De standaardmanier om twee klokken te synchroniseren is eerst het midden tussen de twee klokken te bepalen, en tegelijk twee lichtsignalen uit te zenden, een naar elke klok. De klokken worden vervolgens gestart op het moment dat de lichtstraal aankomt. Maar deze methode werkt alleen als de lichtsnelheid in beide richtingen even groot is! We lijken dus vast te zitten: om te kunnen meten dat de lichtsnelheid in alle richtingen constant is, moeten we klokken kunnen synchroniseren. Maar om klokken te kunnen synchroniseren, moet de lichtsnelheid in alle richtingen constant zijn.

Toch is er hiervoor een oplossing. Er bestaat wel degelijk een manier om te onderzoeken of de lichtsnelheid in alle richtingen even groot is. Laat hiertoe twee evenwijdig lichtstralen met gelijke frequentie schuin invallen op een spiegel. Wanneer de eerste lichtstraal de spiegel raakt, moet de straal die hieraan evenwijdig loopt nog een stuk verder om de spiegel te raken. Noem dit stuk a . Daarnaast heeft de eerste lichtstraal al weer een stuk afgelegd na de weerkaatsing op het moment dat de tweede straal de spiegel raakt. Noem dit stuk b . We kunnen nu afleiden dat als de lichtsnelheid in de richting van a en b even groot is, de frequentie van a en b na terugkaatsing nog steeds gelijk is. Dit laatste is een uitspraak die empirisch te onderzoeken is. Omdat we dit experiment voor alle ruimterichtingen kunnen uitvoeren door de spiegel te verdraaien, kunnen we wel degelijk onderzoeken of de lichtsnelheid in alle richtingen gelijk is.

5 Conclusie

De invloed van c is de laatste 2 eeuwen enorm toegenomen. Terwijl deze constante vroeger alleen een voortplantingssnelheid was, komt deze tegenwoordig voor in bijna alle natuurkundige wetten. Het heeft geen fysische betekenis om c te laten variëren, maar onder bepaalde omstandigheden kan het sommige theorieën wel eenvoudiger maken. Wel kunnen we experimenteel onderzoeken of de lichtsnelheid in alle richtingen even groot is.

Referenties

- [1] A. Einstein, Ann. Phys. 17, 891, 1905.
- [2] H.D. Young, R.A. Freedman. University Physics. 11th ed. San Fransisco: Pearson Education Inc., 2004.
- [3] G. Ellis, J. Uzan. c is the speed of light, isn't it? Am. J. Phys. 73 (3), 240-247, Mar. 2005.
- [4] Shing-Fai Fung, K.C. Hsieh. Is the isotropy of the speed of light a convention? Am. J. Phys. 48 (8), 654-657, Aug. 1980.