

RUIMTETIJD

David Atkinson

18 november 2003

Notities behorende bij een Powerpoint presentatie

1. Ruimtetijd

Op mijn homepage kan men een link vinden naar deze powerpoint presentatie:
<http://www-th.phys.rug.nl/~atkinson/ruimtetijd.html/>

2. Ruimtetijd

Het verschijnsel licht staat aan het fundament van de twee pilaren van de twintigste eeuwse fysica: relativiteitstheorie en quantummechanica. Een keuze moest gemaakt worden: wij zullen het alleen over de eerste van deze theorieën hebben en niet de tweede.

Mijn doel zal zijn om iedereen hier aanwezig Einsteins gedachtegang uit te leggen, met behulp van plaatjes, de zogenoemde Minkowski diagrammen. In de reader kan je het begin van Einsteins baanbrekende artikel vinden, alsmede Minkowski's heldere betoog.

Ik ben me ervan bewust dat sommige van de fysici onder jullie reeds weten wat een Lorentz transformatie is, de anderen wellicht niet. Nadat we over de natuur van het licht hebben gedacht, zullen we kijken naar het begrip relatieve snelheid, en we zullen zien waarom Einstein de absolute tijd van Newton door een relatieve tijd heeft moeten vervangen.

Wij zullen het onder andere hebben over de "tweelingparadox"; een stuk daarover is ook in de reader te vinden: science fiction die gebaseerd is op science fact.

Wij zullen ook ingaan op de natuur van de ruimtetijd: het tweede hoofdstuk van Sklars boek gaat hierover, en, op een minder technisch niveau, de Studium Generale lezingen van Jan Hilgevoord.

3. Hilgevoord

Jan Hilgevoord was een aantal jaren hoogleraar in de theoretische natuurkunde te Amsterdam, en daarna hoofd van het Instituut voor de Wijsbegeerte van de Exacte Wetenschappen in Utrecht. Momenteel geeft hij een reeks lezingen. Aanstaande maandag gaat het over licht en de ether: perfecte timing dus!

4. Natuur van het licht

Newton poneerde in de 17de eeuw dat een lichtstraal uit een bundel bewegende deeltjes bestond. Hij deed dit vooral om te kunnen begrijpen hoe de rand van zo een straal scherp kan zijn.

Huygens daarentegen postuleerde dat licht uit golven bestaat, aldus kon hij dan veel makkelijker dan Newton het verschijnsel interferentie verklaren.

Aan het begin van de 19de eeuw, overtuigde het dubbele spleet experiment van Young de fysici ervan dat Huygens gelijk, en Newton ongelijk had.

Dit lijkt op het eerste gezicht een klassiek voorbeeld te zijn van twee concurrerende theoriën, waar een nieuw experiment één theorie falsifeert en en ander ondersteunt. Zo simpel is het echter niet: de quantummechanica leert ons dat licht noch een klassiek deeltje noch een klassiek golf is.

5. Natuur van het licht

In de laatste kwart van de 19de eeuw hebben de Amerikanen Michelson en Morley getracht de invloed van de beweging van de aarde op de snelheid van licht door de luminifere (lichtdragende) ether te meten.

Zij verwachtten dat de snelheid in de richting van deze beweging anders zou zijn dan in een richting loodrecht op deze richting. Hun apparatuur zou het verwachte

verschil in snelheid moeten kunnen meten. Maar ze hebben geen significant verschil in snelheid waargenomen.
Om dit beter te begrijpen, laten we kijken eerst naar het analoge geval van geluid in de lucht.

6. Relatieve snelheid

Geluid bestaat uit trillingen in de lucht, die een bepaalde snelheid, c , hebben (ongeveer 340 meter per seconde). Een geluidssignaal gaat van een bron, S , in de richting van een waarnemer, O .

O beweegt zich, weg van S , met een snelheid, v , ten opzichte van de geluidsdrager, de lucht.

Als v gelijk is aan c (de snelheid van het geluid), of groter, zal O het signaal niet kunnen horen, daar het geluid O niet zal inhalen.

Als v kleiner is dan c , zal O het signaal wel krijgen, en de snelheid van de golven ten opzichten van O , d.w.z. de snelheid van het geluid, zoals O die zou kunnen meten, is $c - v$.

7. Relatieve snelheid

Als Bob zich 300 000 km (ongeveer driekwart de afstand maan-aarde) van een kernexplosie bevindt, zal het licht (inclusief gevaarlijke gammastraling) hem in precies één seconde bereiken.

Zodra hij getroffen is, vliegt Bob weg in zijn ruimteschip met een snelheid v . Hij kan de snelheid van de binnenvallende gammastraling meten, en men zou kunnen verwachten, naar analogie met het geval van geluid, dat de relatieve snelheid van het licht $c - v$ moet zijn.

Maar, zoals Michelson en Morley hebben gevonden, zal Bob eigenlijk ook waarnemen dat deze relatieve snelheid *niet* $c - v$ *maar* c is.

Hoe is dat mogelijk? De snelheid van iets kan berekend worden als de afstand afgelegd in een bepaalde tijd, gedeeld door die tijd. Dus als een lichtpuls 300 000 km aflegt in een seconde, is zijn snelheid 300 000 km/sec.

8. Relatieve snelheid Lorentz-transformatie

In 1905 heeft Einstein, toen 25 jaar oud, gesuggereerd dat ruimte en tijd afhankelijk zijn van de relatieve bewegingen van waarnemers.

Aannamen:

(Lege) ruimtetijd is uniform

(Lege) ruimte is isotropisch

De snelheid van het licht is invariant

Gevolgen:

Een bewegend lichaam lijkt ingekrompen.

Een bewegende klok lijkt vertraagd te zijn.

9. Relatieve snelheid

De bewegende trein lijkt korter dan de stilstaande trein.

De bewegende klok gaat langzamer dan de stilstaande klokken.

10. Relatieve snelheid -- Minkowski-diagram

Stel dat ruimteschip Enterprise fotontorpedo's wegvuurt tegen het Borgschip. Het Borgschip heeft een snelheid v t.o.v. Enterprise, en de fotonen bewegen zich met een snelheid c t.o.v. Enterprise. Hoe kan het zijn dat de fotonen zich bewegen met een snelheid c t.o.v. het Borg schip? Alléén als afstanden en tijdsintervallen anders zijn voor de Borg dan voor Enterprise! Voor Enterprise zijn de gelijktijdigheidslijnen horizontaal in het Minkowski-diagram, maar voor de Borg zijn die lijnen schuin.

- 11. Tweelingparadox**
 Een startrek begint op Nieuwjaarsdag van het jaar 3000, de 30ste verjaardag van de kapitein. Doel is de ster τ -ceti, 12 lichtjaren weg.
 Het ruimteschip, Sakharov, heeft een snelheid $12/13$ van de snelheid van het licht. Licht doet er 12 jaar over om τ -ceti te bereiken, de Sakharov 13 jaar, dus het schip komt aan op Nieuwjaarsdag van het jaar 3013, aardse tijd.
 Mission Control op aarde stuurt een radioboodschap op Nieuwjaarsdag van het jaar 3001, d.w.z. één jaar na het vertrek van Sakharov.
 Deze boodschap bereikt τ -ceti net op tijd om door de kapitein van het Sakharov ontvangen te worden. Hij stuurt meteen een boodschap terug, die precies 12 jaar later aankomt, d.w.z. op Nieuwjaarsdag van het jaar 3025.
- 12. Tweelingparadox**
 De 3001 boodschap van Mission Control is ontvangen door de kapitein op zijn 35de verjaardag, en het antwoord dat hij terugstuurt komt aan bij Mission Control op nieuwjaarsdag, 3025. Dit betekent dat de boodschappen, die de kapitein op elk van zijn 5 verjaardagen op weg naar τ -ceti, elk 5 jaar aankomen. Dus de 31ste verjaardagsboodschap komt aan op aarde in 3005, de 32ste verjaardagsboodschap in 3010, tot zijn 35ste verjaardags boodschap, die in 3025 aankomt.
 Op weg terug, is de Sakharov in een nieuw inertiaële stelsel, waarin de kapitein weer 5 verjaardagen zal doorbrengen.
 Alle 5 verjaardagsboodschappen, inclusief diegene die hij op zijn 40ste verjaardag stuurt, zijn tussen 2 januari 3025 en 1 Jan 3026 ontvangen, dus één elke tien weken!
- 13. Tweelingparadox**
 Zwaartekracht en algemene relativiteit
 Gelijktijdigheidslijnen
- 14. Tweelingparadox**
 μ deeltjes zijn in de bovenlucht gemaakt door botsingen tussen protonen van de 'zonnwind' en moleculen in de lucht.
 μ deeltjes vervallen in een microseconde, maar ze bereiken de oppervlakte van de aarde vanwege tijdsuitrekking: wat minder dan één microseconde voor het deeltje is, ervaren wij als minuten.
- 15. Tweelingparadox**
 Elke dag wordt rekening gehouden met het effect van tijdsuitrekking om de atoomklokken van de 24 Global Positioning System (GPS) satellieten synchroon te laten lopen.
- 16. Natuur van de ruimtetijd --- Machs principe**
 Twee vloeibare lichamen drijven in de ruimte. Elk lichaam, bekeken door een waarnemer, die zich niet beweegt t.o.v. het andere lichaam, draait met een constante draaisnelheid. Stel voor dat elk lichaam opgemeten is door instrumenten die niet bewegen t.o.v. dat lichaam. Een der lichamen blijkt een bol te zijn, het andere een ellipsoïde. Wij stellen ons de vraag — Wat is de reden voor dit verschil tussen de twee lichamen?

 “Der berechtigte Galileische Raum ... ist aber eine *bloß fingierte* Ursache, keine beobachtbare Sache.”

 “Mach’s Principle states more formally that inertial mass is engendered by the matter in the rest of the universe. If the rest of the universe were removed, both of Einstein’s spheroids would be perfect spheres and neither would have any

inertial mass (according to Mach and Einstein, but entirely against the intuition of Newton, for whom absolute space would still exist, implying for him that S2 would remain ellipsoidal). Mach's thought experiment is breathtaking in its audacity, removing at a flourish the starry firmament above us; but it is also sterile so long as no theory exists that tells us how to calculate the difference in the inertial mass of, say, the earth as we know it, and what it would be if we were to remove the universe beyond our own galaxy, or perhaps beyond the cluster of which the Milky Way is a part."

"Von dem Mach'schen Prinzip sollte man eigentlich überhaupt nicht mehr sprechen."

(Citaten uit de reader).

17. **Natuur van de ruimtetijd**-- Eötvös experiment
Er is geen waarneembaar verschil tussen de krachten gevoeld in een uniform zwaartekrachtveld en die ondergaan als effect van versnelling.
De meetkunde van ruimtetijd in een gravitationele veld is niet-euclidisch.
Klokken lopen traag in een zwaartekrachtveld.
18. **Niet-euclidische meetkunde**
C: omtrek van een cirkel
D: diameter van de cirkel
 $\pi = C/D = 3.14159265358979323846264338327950\dots$
19. **Natuur van de tijd**
Als niemand het mij vraagt, weet ik het; als ik het wil uitleggen aan iemand die het vraagt, weet ik het niet. *Augustinus* (± 600)
20. **Philosophy of Physics – L. Sklar – Chapter 2**
Traditional Philosophical Problems of Space and Time
The Debate between Newton and Leibniz
From Space and Time to Spacetime
Gravity and the Curvature of Spacetime
How Do We Know the True Geometry of the World?
What Kind of Being Does Spacetime Have?
21. **Energie en Materie**
 - It followed from the special theory of relativity that mass and energy are [both of] a different manifestation of the same thing, a somewhat unfamiliar conception for the average man. Furthermore, the equation
 - $E = mc^2$
 - in which energy is put equal to mass multiplied with the square of the velocity of light, showed that (a) very small amount of mass may be converted into a very large amount of energy, and vice versa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned above. This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932 experimentally.