Lasers: van hier tot de maan

Lasers, in het dagelijks leven te vinden in supermarktscanners en lichtshows, zijn een resultaat van onze kennis van de quantummechanica. Een belangrijke toepassing van lasers is LiDAR, een techniek waarmee je lange afstanden heel precies kunt meten – zelfs de afstand van hier tot de maan!

Lasers

De naam ‘laser’ staat voor ***l****ight* ***a****mplification by* ***s****timulated* ***e****mission of* ***r****adiation*, oftewel lichtversterking door gestimuleerde uitzending van straling. Dit houdt in dat je licht op een atoom in een aangeslagen toestand schijnt, en hiermee het atoom stimuleert om naar een toestand met lagere energie te gaan. De energie die in die laatste stap vrijkomt, zendt het atoom uit als een extra foton (een ‘quantum’ van licht). Zo kun je dus per ‘foton in’, twee ‘fotonen uit’ krijgen.

Zulke emissie werkt alleen wanneer de stimulerende lichtpuls de juiste energie heeft, namelijk exact zo groot als het energieverschil tussen het energieniveau waarin het aangeslagen atoom zich bevindt en een lager energieniveau. Lasers gebruiken daarmee een van de basisprincipes van quantumfysica: energieniveaus en licht komen allebei voor in discrete hoeveelheden: ze zijn *gequantiseerd*.

Door een groot aantal aangeslagen atomen tussen twee spiegels te plaatsen kun je met dit proces heel veel fotonen genereren, die ook nog eens allemaal dezelfde energie hebben. Dit houdt in dat ze dezelfde golflengte hebben, wat wij herkennen als dezelfde kleur. De precieze golflengte van de laser hangt af van de elektronische structuur van de atomen die je gebruikt.

Video 1. De werking van een laser. Video van http://toutestquantique.fr/

In fundamenteel natuurkundig onderzoek spelen lasers een belangrijke rol als lichtbron, als koelmethode in ultrakoude experimenten, en zelfs voor het meten van zogeheten

zwaartekrachtsgolven. Buiten de wetenschap worden ze gebruikt voor (onder andere) metaalbewerking; chirurgie, tandheelkunde en oogheelkunde; datacommunicatie; cd-, dvd- en Blu-ray-spelers; en natuurlijk de bekende supermarktscanners. Toepassingen genoeg, dus!

Een lange-afstandsliniaal

De toepassing die we in deze serie van twee artikelen onder de loep zullen nemen is **Li**ght **D**etection **A**nd **R**anging, oftewel LiDAR. *Ranging* is een Engels woord voor het meten van afstanden. De naam LiDAR doet je misschien al denken aan de bekendere 'radar' en 'sonar', waarin respectievelijk radiogolven en geluidsgolven gebruikt worden voor hetzelfde doel. Het principe achter deze meettechniek werkt als volgt: je zendt een laser-lichtpuls uit, en meet hoe lang het duurt voordat je het gereflecteerde licht weer ontvangt. Omdat we de snelheid van licht kennen, weet je dat de afstand tussen jou en het object waar de lichtpuls van is gereflecteerd, te berekenen is door de totale afgelegde weg door twee te delen:

afstand= (tijdsverschil × snelheid van licht)/2

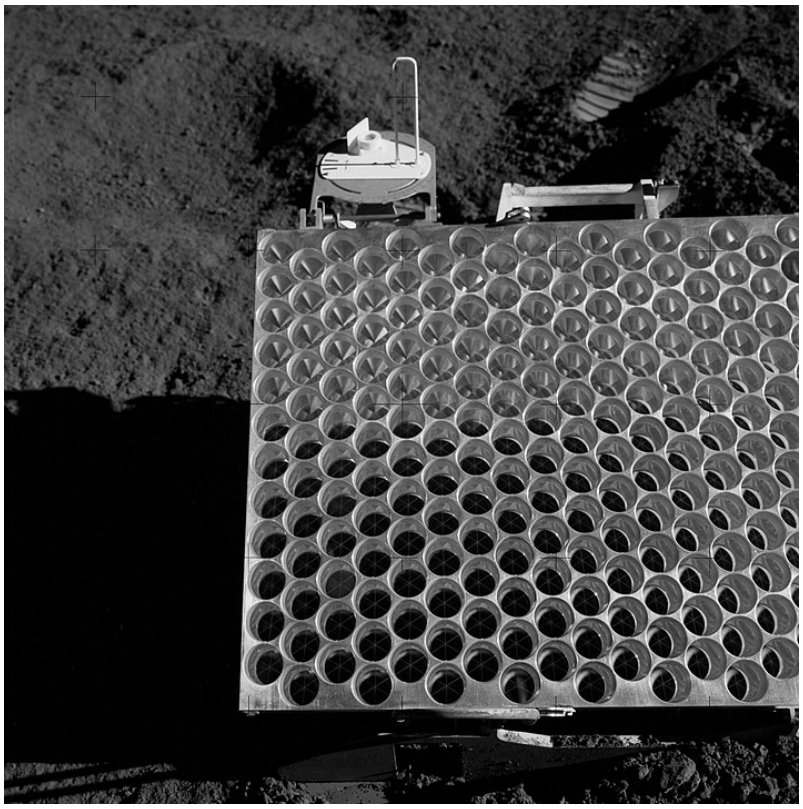
Die factor twee komt natuurlijk van het feit dat het uitgezonden licht eerst naar het object moet vliegen, en dan weer terug naar de detector.

De speciale eigenschappen van laserlicht komen hier bijzonder goed van pas. Ten eerste weet je precies welke golflengte de lichtpuls heeft, zodat het gereflecteerde licht makkelijk te herkennen is tussen al het andere licht dat de detector raakt. Ten tweede wordt het laserlicht in één richting uitgezonden, in een relatief smalle straal, waardoor je meer controle hebt over waar het licht terechtkomt. Hierdoor heeft LiDAR een veel betere resolutie dan radar of sonar.

Van hier tot de maan

Een van de eerste grote toepassingen van LiDAR was het meten van de afstand tussen de aarde en de maan met het zogeheten Lunar Laser Ranging-experiment. De eerste successvolle meting met hoge precisie (een onnauwkeurigheid van ongeveer 25 cm) slaagde in 1969. Valt het jaartal je op? Dat was het jaar dat de Apollo 11 de eerste succesvolle bemande maanlanding maakte. Na die landing hebben de astronauten een speciale spiegel,

ter grootte van een koffer, op het maanoppervlak gezet. Latere maanlandingen lieten ook spiegels achter op de maan, vijf in totaal. De spiegels geven genoeg informatie om regelmatig de afstand tussen het midden van de aarde en het midden van de maan te meten.



Afbeelding 1. Een spiegel op de maanDeze speciale spiegel (een 'retroreflector') is op de maan gezet door de bemanning van Apollo 15. Iedere cilinder die hierboven te zien is, heeft erin een driezijdig glazen prisma, dat al het inkomende licht terugzendt in de richting waar het vandaan kwam. Foto: NASA/D. Scott

Fotonen doen ongeveer 2,5 seconden over de reis naar de maan en terug. Met de nieuwste lasers, detectoren, en algoritmes kunnen we nu met *millimeterprecisie* de afstand tussen de maan en de aarde in de loop van de tijd volgen. Hiervoor moeten nog allerlei andere factoren meegerekend worden, zoals de draaiing van de aarde, de samenstelling van de atmosfeer, relativistische effecten, het weer, etc. Ondanks dat we lasers hebben die een heel smalle straal uitzenden, is de lichtstraal toch nog ongeveer 6,5 km breed als die het maanoppervlak bereikt, en ontvangt de detector na de weerkaatsing per oorspronkelijke lichtpuls van 10^{17} fotonen er slechts één terug. Dat is dus 1 foton uit de 100.000.000.000.000.000 – knap dat het lukt!



Afbeelding 2. Zo meten we de afstand naar de maan.De Laser Ranging Facility van het Goddard Space Flight Center richt een laser naar de maan. Foto: NASA/Tom Zagwodzki

Een goede test van zwaartekrachttheorieën

Het nog steeds lopende Lunar Laser Ranging experiment heeft ons al aardig wat opgeleverd. Een overzicht van dingen die we tot nu toe met behulp van dit project hebben geleerd:

- Gemiddeld is de afstand tussen het midden van de aarde en het midden van de maan zo'n 385.000,6 km.
- De maan verwijdert zich langzaam van de aarde, en komt ieder jaar ongeveer 3,8 cm verder van de aarde af te staan.
- We kunnen ook allerlei indirecte informatie uit het afstandsverloop halen. Waarschijnlijk heeft de maan bijvoorbeeld een vloeibare kern die ongeveer 20% van de grootte van de straal van de maan zelf heeft. De straal van deze kern is daarmee 381±12 km.
- Een ander indirect resultaat: de universele zwaartekrachtconstante is heel erg stabiel.

> De verandering in deze constante, G, is kleiner dan een factor van $(2\pm7)\times10^{-13}$ per jaar. (Zie dit artikel, of deze, voor uitleg van wat deze constante betekent.)

Einsteins algemene relativiteitstheorie voorspelt de baan van de maan goed, tot binnen de precisie van het experiment. (Zie ook ons dossier over relativiteit.) Het precieze meten van de baan van de maan is dan ook een fantastische test van zwaartekrachtstheorieën – die van Einstein, en mogelijke concurrerende ideeën die kleine afwijkingen daarvan voorspellen – en we zijn (zoals altijd) nog lang niet klaar. Een van de openstaande vragen is bijvoorbeeld in welke mate het equivalentieprincipe standhoudt.

Een versie van dit principe, het 'zwakke' equivalentieprincipe, zegt dat de baan van een vallend lichaam slechts afhangt van zijn aanvankelijke positie en snelheid, en *niet* van zijn samenstelling. Het zogenaamde 'sterke' equivalentieprincipe is wellicht nog interessanter om te testen. In algemene relativiteitstheorie bestaat de massa van een object uit twee delen, namelijk de (rust)massa van de atomen, en de 'massa' van de energie die de atomen bijeenhoudt. Het sterke equivalentieprincipe stelt dat het energie-gedeelte van de massa even sterk bijdraagt als de rustmassa aan de gemeten zwaartekracht van het object, en aan zijn traagheid. De algemene relativiteitstheorie is de enige mogelijke zwaartekrachtstheorie die exact compatibel is met het sterke equivalentieprincipe; moderne theorieën zoals snaartheorie en diverse andere quantumzwaartekrachttheorieën zijn dat niet.

De maan en de aarde hebben verschillende samenstellingen, en draaien allebei om de zon heen. Hiernaast bestaan hun massa's in verschillende verhoudingen uit de hierbovengenoemde 'energiemassa' en 'rustmassa'. Als de maan en de aarde nu anders zouden worden beïnvloed door de zwaartekracht van de Zon, door het schenden van een van de hierbovengenoemde equivalentieprincipes, zou dit direct invloed hebben op de baan van de maan om de aarde. Tot nu toe lijkt het erop dat de maan en de aarde wél op precies dezelfde manier naar de zon toe vallen, in elk geval met een nauwkeurigheid van 1 deel in 10^{12}. Met de nieuwste detectoren zal deze nauwkeurigheid in de toekomst nóg preciezer gemaakt worden – zodat we ofwel afwijkingen kunnen vinden, of nog meer vertrouwen in Einsteins theorie kunnen hebben.

Nog meer LiDAR

De exacte baan van de maan meten, was een van de eerste toepassingen van LiDAR, maar je kunt met deze techniek nog veel meer. Niet alleen natuurkundigen hebben er wat aan – LiDAR wordt ook gebruikt door ecologen, archeologen, boeren, bouwvakkers, en zelf-rijdende auto’s! Meer over deze toepassingen kun je lezen in het vervolg van dit tweeluik.