

Een licht verhaal over Young en Maxwell

Zonder licht kunnen we letterlijk niks zien. Het is dus ook geen wonder dat mensen zich al duizenden jaren bezighouden met wat licht precies is en waar het van gemaakt is. Thomas Young en James Clerk Maxwell - vandaag respectievelijk 244 en 186 jaar geleden geboren - hebben veel bijgedragen aan ons begrip van licht en zicht, en zelfs aan kleurenfotografie! Hier een klein stukje geschiedenis om hun gezamenlijke verjaardag te vieren.

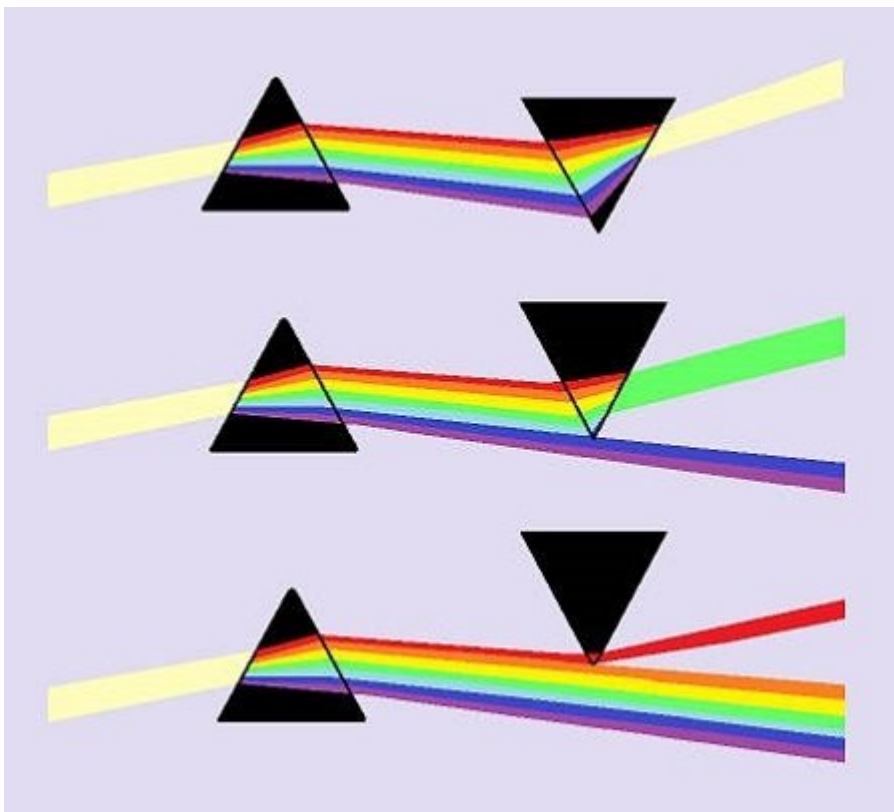
Elementen, golven of deeltjes

In de oudheid werd er al nagedacht over waar licht van gemaakt is, en hoe we ermee kunnen zien. In de vijfde eeuw voor Christus postuleerde de Griek Empedocles dat alles uit vier elementen was gemaakt: vuur, water, lucht, en aarde. Hij geloofde dat de godin Afrodite het vuur in onze ogen had aangestoken, waardoor er licht uit straalde. Aangezien we in het donker niets zien, dacht hij dat we zouden kunnen zien door interacties tussen onze 'oogstralen' en stralen van bronnen zoals de zon. Dezelfde beschrijving voor licht en de werking van de ogen komt voor in oude Hindoeïstische filosofie. Volgens de atomaire theorie van Vaiśeṣika, een van de zes scholen van de Hindoeïstische filosofie, zou licht bestaan uit minuscule, ondeelbare deeltjes van *tejas*, het vuur-element.

De discussie over waar licht uit bestaat is dus al duizenden jaren geleden begonnen, maar kwam in de 17e eeuw pas echt op gang. Centraal in de discussie stond het fenomeen *straalbreking*: de verandering van richting van licht bij de overgang tussen twee media met een andere dichtheid. De Franse filosoof René Descartes beweerde dat het gedrag van licht beschreven kan worden als een golf, en dat straalbreking voortkwam uit de verschillen van de lichtsnelheid in verschillende media. Dit idee kreeg navolging van Robert Hooke, die in zijn boek *Micrographia* (1665) zijn observaties door verschillende lenzen beschreef. Daarbij postuleerde hij ook dat licht zich voortplant als golven waarbij de trillingen loodrecht staan op de voortplantingsrichting. De golftheorie van licht werd later wiskundig uitgewerkt door de

Nederlander Christiaan Huygens 1678 en gepubliceerd in *Traité de la Lumière* (1690).

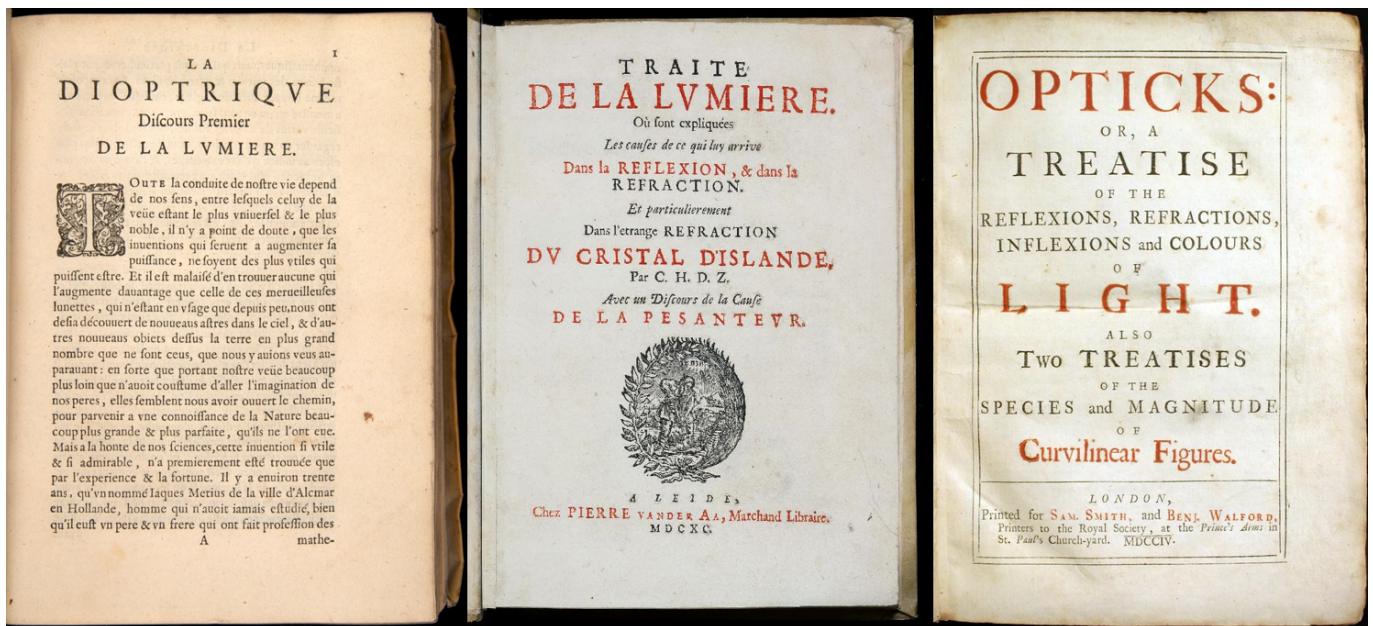
Wanneer wit licht door een prisma schijnt, leidt straalbreking tot de opsplitsing van het licht in verschillende kleuren. Bij de golftheorie van licht werd oorspronkelijk gedacht dat lichtgolven gemaakt zijn van wit licht, en dat het prisma het licht onzuiver maakt. Hoe groter de afstand dat het licht door het prisma moest bewegen, hoe onzuiverder het werd, waardoor het licht verschillende kleuren kreeg. Isaac Newton was het hier niet mee eens. Hij liet zien dat wit licht, wanneer het door een eerste prisma is opgesplitst in verschillende kleuren, weer wit kan worden gemaakt door een tweede prisma (Afbeelding 1). Een prisma maakt wit licht dus niet 'onzuiver', maar laat juist zien dat het zélf al alle mogelijke kleuren bevat.



Afbeelding 1. Newtons prisma-experiment. Newton liet hiermee zien dat wit licht is opgebouwd uit alle kleuren van de regenboog, en dat gekleurd licht soms ook nog opgesplitst kan worden in meerdere kleuren. Afbeelding: Helen Klus.

In tegenstelling tot Descartes, Hooke, en Huygens, geloofde Newton niet dat licht uit golven zou kunnen bestaan. Zijn argument was dat licht alleen in rechte lijnen lijkt te bewegen, terwijl golven om obstakels heen kunnen buigen, zoals geluidsgolven dat doen. Hij publiceerde in 1675 een [hypothese](#), en later ook een boek *Opticks* (1704) waarin hij voorstelde dat licht bestaat uit kleine deeltjes ("corpuscles"). Onze ogen zouden

verschillende groottes van deze deeltjes interpreteren als verschillende kleuren. Ten onrechte claimde hij dat licht sneller beweegt in dichtere media, omdat de trek van zwaartekracht op de lichtdeeltjes hierin groter zou zijn. Zijn theorie kon niet alles verklaren: hij had bijvoorbeeld moeite met het verklaren van diffractie van licht door kleine openingen, en waarom het blijkt dat lichtdeeltjes niet tegen elkaar aan botsen wanneer twee stralen elkaar kruisen. Onder andere Hooke en Huygens waren zeer uitgesproken in hun kritiek op de lichttheorie van Newton. Newton heeft zelfs gewacht met het publiceren van zijn boek *Opticks* tot na Hooke's dood in 1703.



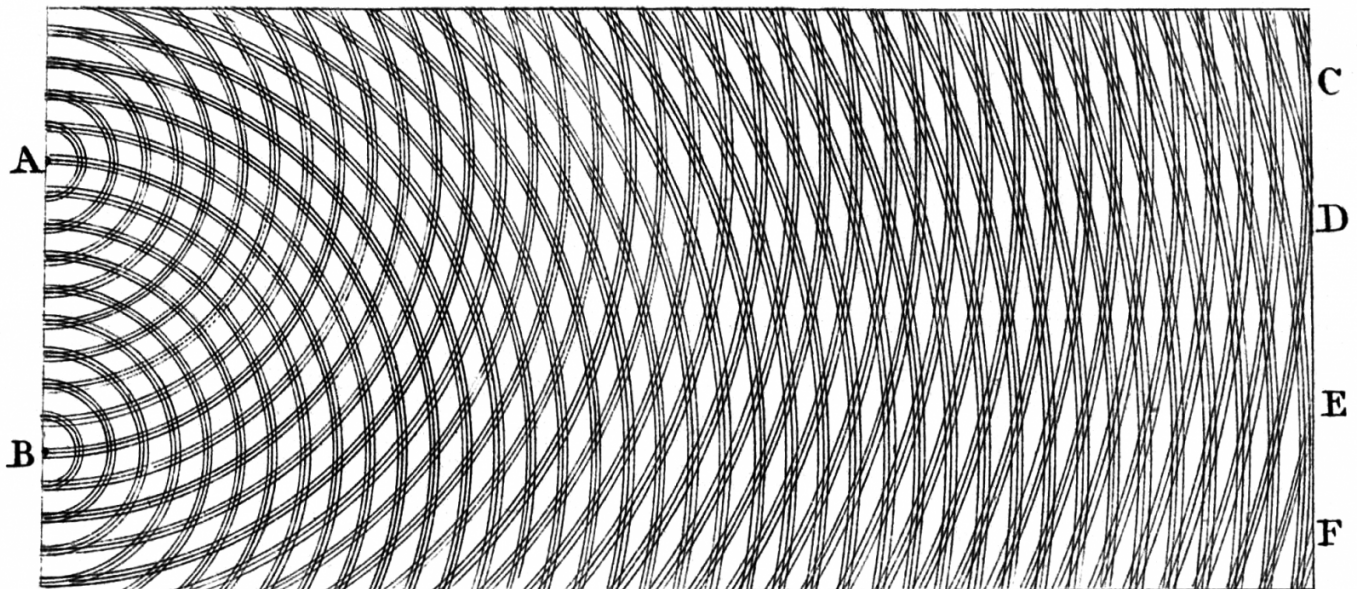
Afbeelding 2. Belangrijke werken over het licht. V.l.n.r *La Dioptrique* (1637) van René Descartes ; *Traite de la Lumière* (1690) van Christiaan Huygens; en *Opticks* (1704) van Sir Isaac Newton. Afbeeldingen: Wikipedia.

Thomas Young en een paar spleten

Op 13 juni 1773 werd Thomas Young geboren. Na de publicatie van *Opticks* heerste Newtons 'corpusculaire' theorie van licht. Young groeide dus op met het idee dat licht bestaat uit deeltjes, niet golven. Tijdens zijn geneeskundestudie in Göttingen schreef hij een proefschrift over de natuurkundige en wiskundige eigenschappen van geluid. In 1800 presenteerde hij een paper aan de Britse *Royal Society* waarin hij beweerde dat licht zich - net als geluid - als een golf gedraagt. Dit werd sceptisch ontvangen, aangezien Newtons theorie al honderd jaar lang de gevestigde theorie was. Toch zette Young stug door. In 1802 gaf hij een [lezing](#) waarin hij al het bewijs voor de golftheorie van licht samenvatte, inclusief bewijs uit Newtons eigen

onderzoek.

Zijn grote doorbraak kwam in 1803, toen hij zijn beroemde tweespletenexperiment verrichtte. Hij leidde licht eerst door een enkele dunne verticale spleet en vervolgens door twee, en keek naar het patroon dat werd afgebeeld op een achterliggend scherm. Young liet zien dat hierdoor een patroon van lichte en donkere plekken ontstaat, een zogenaamd interferentiepatroon. Dit patroon kan het beste uitgelegd worden als de interferentie van twee lichtgolven als zij elkaar kruisen nadat ze door de spleten zijn gegaan: net zoals golven in het water kunnen deze combineren tot pieken of dalen of elkaar juist uitdoven. Wanneer twee pieken in golven met elkaar kruisen, tellen deze samen op tot een hogere piek, die op het scherm leiden tot een lichte plek. Wanneer een dal van de ene golf combineert met een piek van een andere golf, wordt de golf uitgedoofd en zie je op het scherm een donkere plek.



Afbeelding 3. Het tweespletenexperiment. Youngs schets van twee interfererende golven in het tweespletenexperiment. A en B geven de twee spleten aan, de lijnen de locaties van de pieken in de golven, en C-F de locaties van de lichte plekken op het scherm. Afbeelding: Wikipedia.

Young liet zien dat er in zo'n situatie een interferentiepatroon op het scherm ontstaat, zoals zou worden verwacht van golven. De lichtbron die hij gebruikte was zonlicht, waar veel verschillende golflengtes in voorkomen. De afstand tussen twee lichte plekken in het interferentiepatroon hangt af van de golflengte van het interfererende licht, dus verschillende kleuren van licht creëren ieder een patroon met verschillende afstanden. Young

gebruikte dit om correct te schatten dat de golflengte van violet licht ongeveer 400 nanometer is, en die van rood licht ongeveer twee keer zo groot.

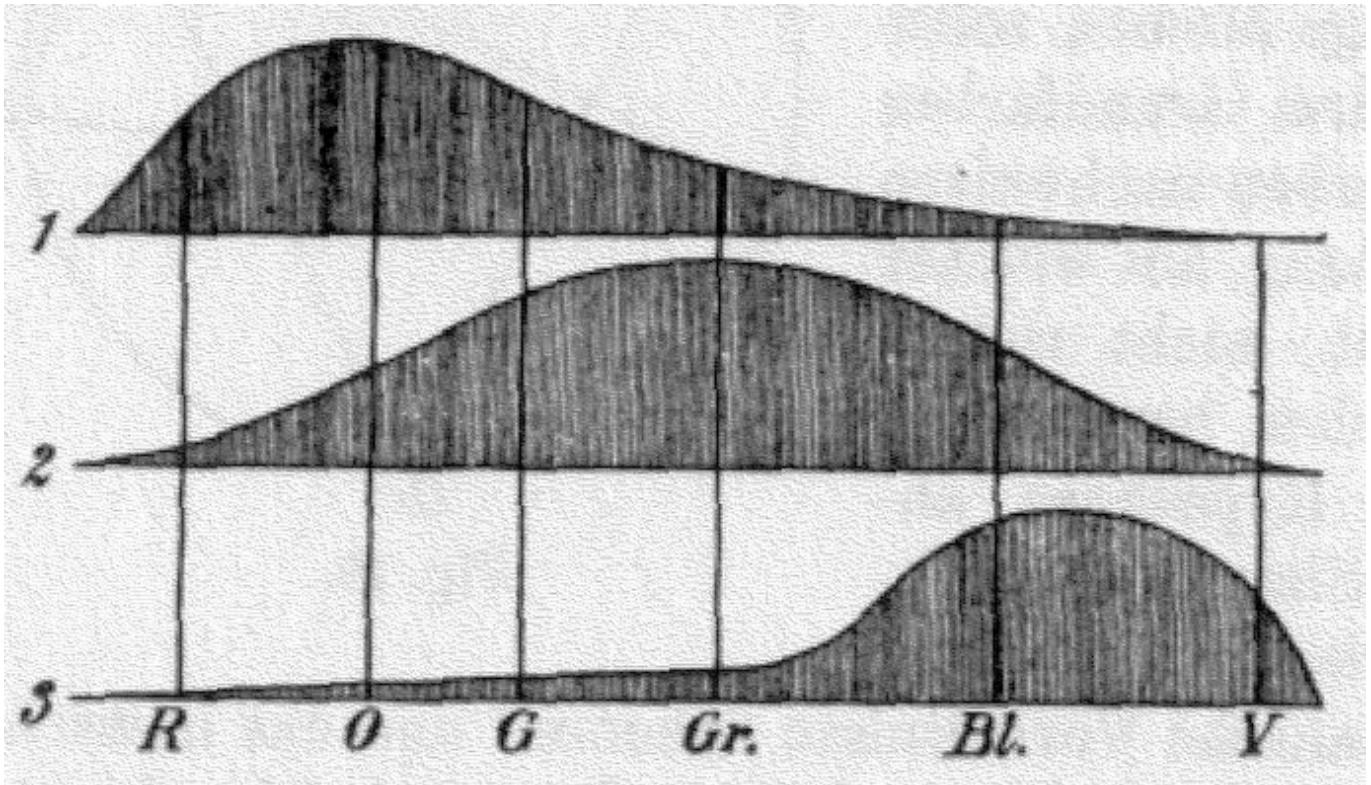
Er was veel kritiek op Youngs werk, en de golftheorie van licht werd nog steeds niet algemeen aanvaard. Pas zo'n twintig jaar later, mede dankzij het werk van de Fransman Auguste-Jean Fresnel op het gebied van lichtdiffractie, werd de golftheorie van licht weer breed geaccepteerd. Het is maar de vraag hoe lang het zou hebben geduurd om de corpusculaire theorie van het licht om te gooien zonder Youngs vastberadenheid.

Pas tweehonderd jaar later met de opkomst van quantumfysica in de 20e eeuw, is aangetoond dat licht zich tóch ook kan gedragen als deeltjes. De oplossing van deze paradox is dat [deeltjes zich kunnen gedragen als golven](#). Youngs experiment, maar dan gedaan met elektronen in plaats van licht, is een van de grootste bewijzen van deze bijzondere voorspelling van de quantumfysica.

Kleurenvisie

Naast zijn bewijs van de golfeigenschappen van licht, is Young ook een van de grondleggers van 'fysiologische optica', oftewel het bestuderen van hoe onze ogen lichtsignalen interpreteren. In 1793 legde hij uit hoe het menselijk oog objecten op verschillende afstanden kan scherpstellen door het aanpassen van de kromming van de lens in ons oog. In 1801 was hij de eerste persoon die astigmatisme (oftewel slecht zicht) verklaarde. In dezelfde lezing in 1802 waarin hij argumenten voor de golftheorie van licht presenteerde, stelde hij ook de hypothese dat onze perceptie van kleuren afhangt van drie soorten receptoren (kegels) in de retina. Dit werd later uitgewerkt door Hermann von Helmholtz tot de Young-Helmholtztheorie.

De drie soorten kegels zijn ieder gevoelig voor een bepaald golflengtegebied, en de relatieve sterkten van de signalen die door de drie soorten kegels worden gedetecteerd worden door de hersenen als een zichtbare kleur geïnterpreteerd. Volgens de oorspronkelijke Young-Helmholtz theorie zouden de drie soorten kegels respectievelijk gevoelig zijn voor rood, groen en blauw licht. Pas in 1956 werd door Gunnar Svaetichin bewezen dat onze ogen inderdaad drie soorten kegels hebben, maar dat deze gevoelig zijn voor geelgroen, cyaangroen en blauw in plaats van rood, groen en blauw.



Afbeelding 4. Gevoeligheid van het oog. Een diagram gemaakt door Helmholtz waarin de gevoeligheid van drie soorten kegels in het oog (volgens de Young-Helmholtz theorie) is uitgelicht. De x-as geeft de golflengte aan (hier geannoteerd met de bijbehorende kleur), en de y-as de gevoeligheid van de kegel. Afbeelding: Wikipedia.

Newton had met zijn experimenten laten zien dat oranje licht gemaakt van puur geel en puur rood licht precies dezelfde kleur kon hebben als puur oranje licht dat niet is opgebouwd uit meerdere kleuren. Dat twee kleuren fysisch anders kunnen zijn maar er hetzelfde uitzien (zogenoeten *metameren*) was een puzzel voor natuurkundigen. Youngs kleurtheorie verklaarde dit omdat we maar een beperkt aantal (drie) soorten kegels hebben, en dus niet alle mogelijke informatie uit een lichtsignaal kunnen krijgen.

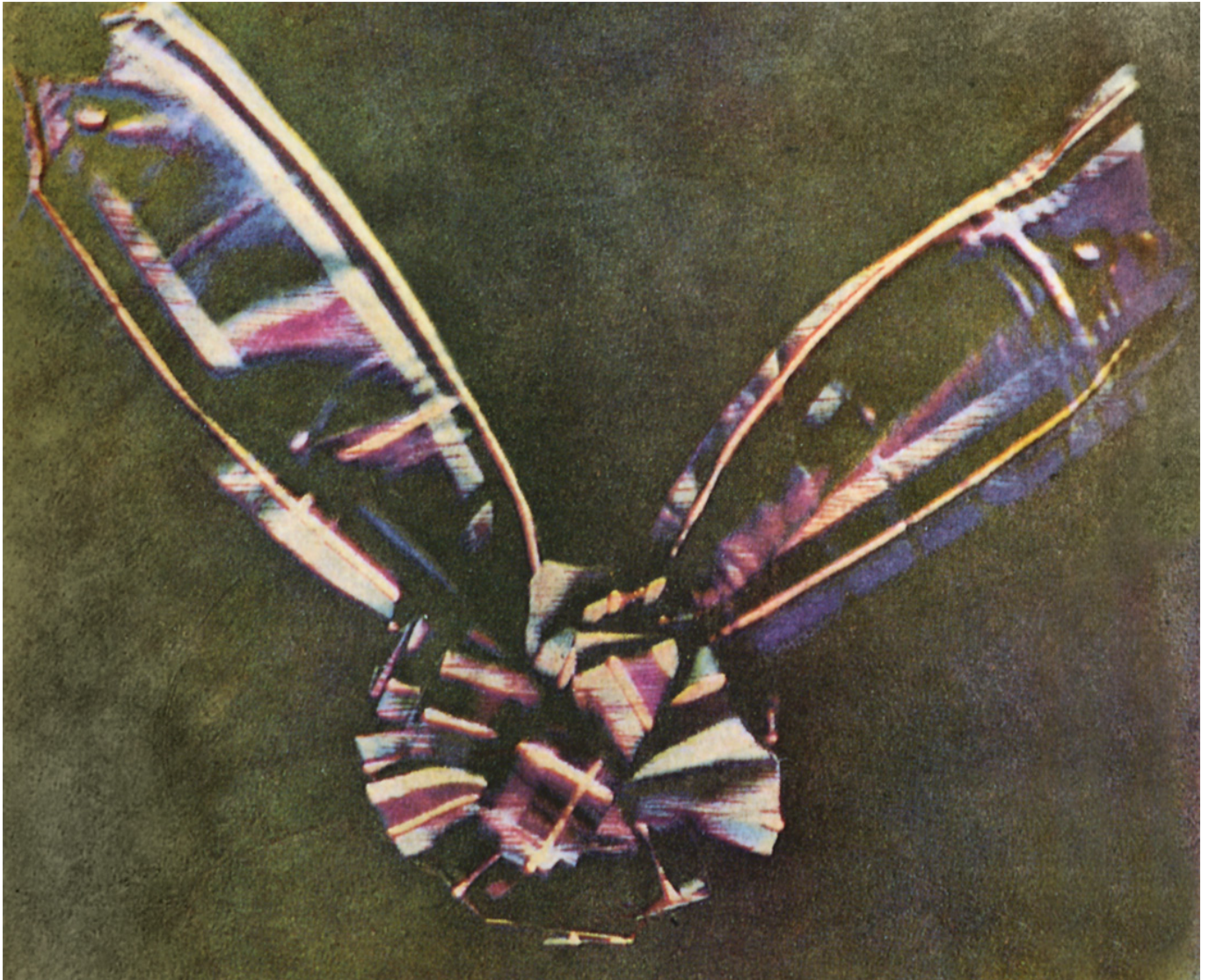
Maxwell, elektromagnetisme en kleurenfotografie

Twee jaar na Youngs dood, in 1831, werd James Clerk Maxwell geboren in Edinburgh, Schotland. Hij is het meest bekend om zijn werk met elektromagnetisme. Al in 1855 had hij laten zien dat elektriciteit en magnetisme aan elkaar verwant zijn, en gezamenlijk kunnen worden beschreven met een set van twintig vergelijkingen met twintig variabelen. Oliver Heaviside versimpelde deze twintig uitdrukkingen later naar vier differentiaalvergelijkingen, nu bekend als de vier *Maxwellvergelijkingen*. Tot Maxwells verrassing leidde hij uit zijn

vergelijkingen af dat de snelheid van een elektromagnetisch veld overeenkomt met [de snelheid van licht](#). Hieruit concludeerde hij dat licht ook een elektromagnetische golf is, en dus ook door zijn vergelijkingen beschreven kan worden.

Waar Maxwell minder bekend om staat, is zijn werk met kleurenvisie. Net zoals Young was hij heel geïnteresseerd in onze perceptie van kleuren. Met het toen zojuist ontwikkelde lineaire algebra bewees Maxwell Youngs kleurentheorie. Hij kon wiskundig aantonen dat ieder puur (oftewel monochromatisch, met een enkele golflengte) licht exact hetzelfde neurologische signaal kan geven als het signaal van drie verschillende kleuren licht bij elkaar opgeteld. Hiermee was hij de uitvinder van colorimetrie. Hij vond ook meteen een toepassing voor zijn werk met kleurperceptie: kleurenfotografie. Als de som van drie lichten alle mogelijke kleuren kan produceren, zou een kleurenfoto gemaakt moeten kunnen worden met een set van drie kleurenfilters.

In 1855 kwam hij met manier om met een simpele zwart-wit camera kleurenfoto's te kunnen nemen. Als je drie zwart-witfoto's neemt van dezelfde scene, met drie verschillende kleurenfilters (bijvoorbeeld rood, groen en blauw) voor de lens, en de drie plaatjes op een scherm projecteert met vergelijkbare kleurenfilters, zou het geprojecteerde plaatje een kleurenfoto moeten zijn. In 1861 demonstreerde Maxwell met deze methode 's werelds eerste kleurenfoto (Afbeelding 5). Het werkte niet perfect, omdat de fotografische platen niet even gevoelig waren voor rood en groen als blauw, maar hetzelfde principe wordt nog steeds gebruikt in hedendaagse kleurenfotografie!



Afbeelding 5. De oudste kleurenfoto. De eerste kleurenfoto ter wereld, van een lint met een Schots ruitpatroon. De foto was gemaakt onder Maxwells begeleiding door Thomas Sutton. Afbeelding: Wikipedia.