

Lichtverstrooiing

Ralf Simons

20-02-2025

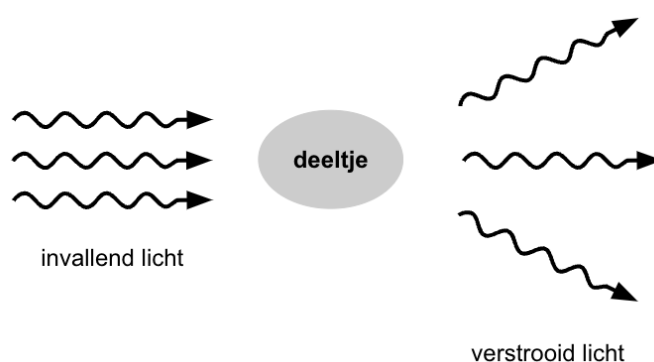


Inhoud

1	Introductie	3
2	Rayleighverstrooiing	4
2.1	Elektromagnetische golven	4
2.2	Wisselwerking van licht met ladingen	5
2.3	Hemelblauw en rode zonsondergang	10
2.4	Het blauwe uur	15
3	Tyndall-effect	16
3.1	Melk	16
3.2	Aerogel	17
3.3	Opaliet	18
3.4	Blauwe ogen	19
3.5	Rookmelder	19
4	Mieverstrooiing	20
5	Bijzondere verschijnselen	22
5.1	Wolkenstralen	22
5.2	Zodiakaal licht	22
5.3	Plejaden	25
6	Weblinks	26

1 Introductie

In het liedje “What a Wonderful World” zingt Louis Armstrong: “I see skies of blue and clouds of white”. Deze observatie van Armstrong is ongetwijfeld juist. De oorzaak hiervan is de verstrooiing van licht aan kleine deeltjes in onze atmosfeer (gasmoleculen respectievelijk waterdruppeltjes). Algemeen is het zo dat bij verstrooiing het invallend licht van zijn oorspronkelijke richting afwijkt wanneer het in aanraking komt met deeltjes of onregelmatigheden in een medium, zoals bijvoorbeeld in lucht of water. Deze verstrooiingsproces hangt af van de grootte en samenstelling van de deeltjes en de golflengte (kleur) van het licht.



In dit document worden verschillende soorten van lichtverstrooiing besproken zoals de Rayleigh-, Tyndall- en Mieverstrooiing (zie hoofdstukken 2, 3 en 4). Deze zorgen hier op aarde voor mooie fenomenen. Maar ook de verstrooiing van licht aan interplanetaire en interstellaire stof is een spectaculair verschijnsel (zie hoofdstukken 5.2 en 5.3).

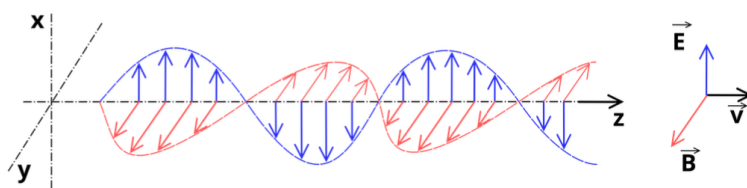
De volgende tabel geeft alvast een overzicht waardoor de verschillende verstrooiingsprocessen gekenmerkt worden:

Verstrooiing	Deeltjes	Grootte	Resultaat
Rayleigh	stik- en zuurstof in atmosfeer	$< 40 \text{ nm}$	hemelblauw
Tyndall	colloïdale deeltjes in medium	tussen 40 nm en $1 \mu\text{m}$	met name verstrooiing van blauw licht
Mie	grotere stofdeeltjes en waterdruppeltjes	$> 1 \mu\text{m}$	gelijkmatige verstrooiing van alle kleuren

2 Rayleighverstrooiing

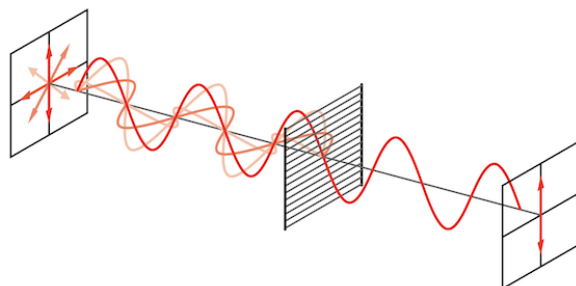
2.1 Elektromagnetische golven

Licht kunnen wij beschrijven als een elektromagnetische golf. Bij elektromagnetische golven trillen een elektrisch veld \vec{E} en een magnetisch veld \vec{B} . Het uitgangspunt om dit wiskundig te beschrijven zijn de Maxwell-vergelijkingen in vacuüm. Met behulp van deze Maxwell-vergelijkingen kun je golfvergelijkingen zowel voor het \vec{E} -veld als het \vec{B} -veld afleiden. De oplossingen van deze golfvergelijkingen leveren dan het volgende plaatje op:



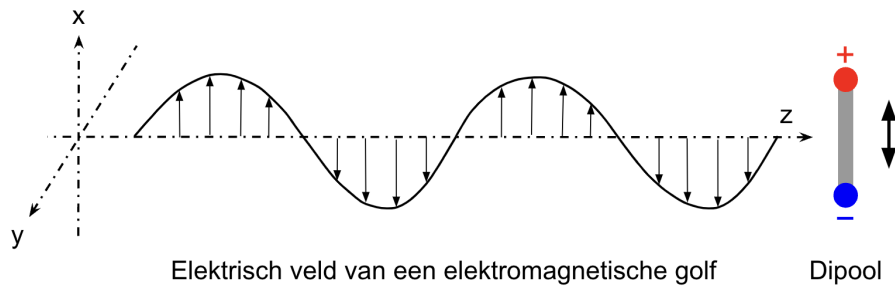
- Het \vec{B} -veld en het \vec{E} -veld staan loodrecht op elkaar.
- Zowel het \vec{B} -veld als het \vec{E} -veld staan loodrecht op de voortplantingsrichting van de golf (\vec{v}).
- Het \vec{B} -veld en \vec{E} -veld zijn in fase. Dit wil zeggen dat ze tegelijk groter en kleiner worden en op hetzelfde moment door nul gaan.

In het voorbeeld bovenaan verandert het \vec{E} -veld in de x-richting. Dit noem je de polarisatierichting. Ongepolariseerd licht bestaat uit vele golven die geen voorkeursrichting hebben. De \vec{E} -velden van deze lichtgolven trillen in alle mogelijke richtingen (zie het plaatje onderaan). Zodra deze verzameling licht op een polarisatiefilter valt wordt alleen maar een richting doorgelaten. Het licht is dan gepolariseerd.

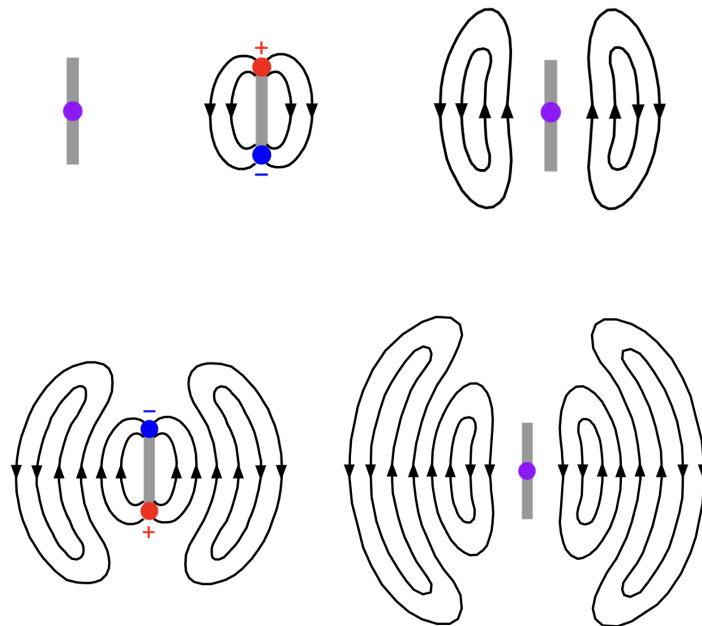


2.2 Wisselwerking van licht met ladingen

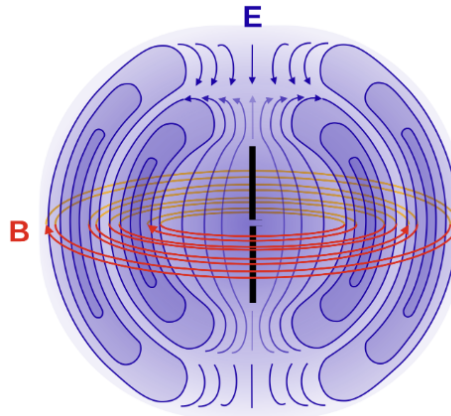
Elektrische ladingen zijn gevoelig voor het elektrische veld van een elektromagnetische golf. We beschouwen hier alleen gebonden elektrische ladingen bijvoorbeeld de elektronen in een zuurstof- of stikstofmolecuul. Door het trillen van het \vec{E} -veld gaan de ladingen ook op en neer. Het resultaat is een dipool zoals aangegeven in het plaatje:



Wanneer ladingen versneld worden dan wordt elektromagnetische straling uitgezonden. Dit is het geval voor de ladingen die door het elektrische veld van het invallende licht beginnen te oscilleren. We zien hier schematisch de elektrische veldlijnen van de dipool bij verschillende posities van de ladingen. De paarse cirkel geeft aan dat op dit moment het dipoolmoment nul is of anders geformuleerd: de positieve en de negatieve lading vallen dan samen. Het volledige elektrische veld is rotatie-symmetrisch rond de dipool-as. Het lijkt dus een beetje op een donut ofwel torus.



De ontwikkeling van de magnetische veldlijnen is boven niet weergegeven. Het \vec{B} -veld zijn cirkels in een vlak dat haaks op de dipool-as staat. Een momentopname van het magnetische veld B (rode lijnen) ten opzichte van het elektrische veld E (blauwe lijnen) wordt hier getoond:



De energie per tijdseenheid (ofwel het vermogen P) dat door een versnelde lading wordt uitgestraald is als volgt:

$$P = \frac{q^2 a^2}{6 \pi \epsilon_0 c^3} \quad (1)$$

Dit is de Larmor-formule¹. Hierbij is q de lading van het deeltje, a is zijn versnelling, ϵ_0 is de elektrische veldconstante en c is de lichtsnelheid.

We kijken nu naar een gebonden elektron dat door het elektrische veld van een golf tot oscillaties gedwongen wordt. Dit E -veld heeft de frequentie f en kan als volgt wiskundig beschreven worden:

$$E = E_{\max} \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

E_{\max} is de amplitude van het veld en $\omega = 2\pi f$. Laten we aannemen dat het elektron in x -richting trilt en dat er geen wrijving is. Dan geldt voor zijn beweging de volgende differentiaalvergelijking:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{q}{m} \cdot E_{\max} \cdot \cos \omega t \quad (3)$$

ω_0 is de resonantiefrequentie² van het trillende deeltje en m is zijn massa. Aan de rechterkant van deze vergelijking staat de dwangkracht

¹zie bv. https://en.wikipedia.org/wiki/Larmor_formula

²Let op: ω_0 is heel iets anders dan ω dat de frequentie van de elektromagnetische golf aangeeft.

(gedeeld door de massa) die het elektrische veld op het elektron uitoefent.

De oplossing van deze vergelijking is:

$$x = A \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{met} \quad A = \frac{q}{m} \cdot \frac{E_{\max}}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (4)$$

Het elektron volgt het elektrische veld met de frequentie ω . Daarom heeft de uitgezonden elektromagnetische straling dezelfde frequentie als het invallend licht. De amplitude van deze beweging is A en de faseverschuiving is φ .

De versnelling a van het elektron is dan:

$$a = \ddot{x} = -\frac{q}{m} \cdot \frac{E_{\max} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t - \varphi)}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (5)$$

De Larmor-formule (zie vergelijking [1]) zegt dat het afgestraalde vermogen evenredig is aan het kwadraat van de versnelling van het elektron ($P \propto a^2$). Met het resultaat van vergelijking [5] zien we dan de volgende proportionaliteit:

$$P \propto \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} \quad (6)$$

Voor elektronen in bijvoorbeeld zuurstof of stikstof is de resonantiefrequentie ω_0 veel groter dan de frequentie van zichtbaar licht ($\omega_0 \gg \omega$). We kunnen dus met een goede benadering het volgende schrijven (λ is de golflengte van het invallend licht en ter herinnering: $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$):

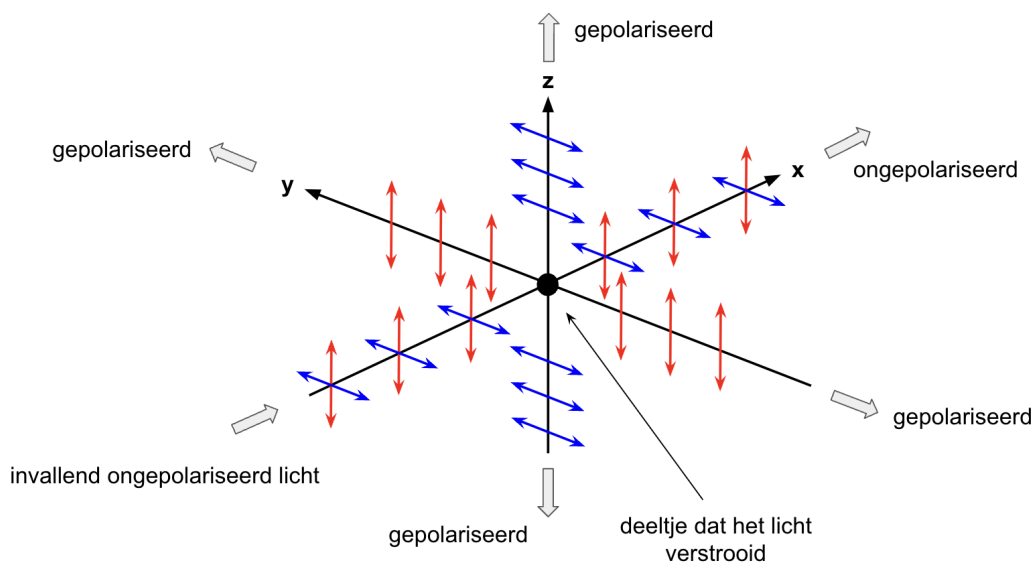
$$P \propto \omega^4 \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (7)$$

Dezelfde proportionaliteit geldt ook voor de intensiteit I (vermogen per oppervlakte-eenheid):

$$I \propto \omega^4 \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (8)$$

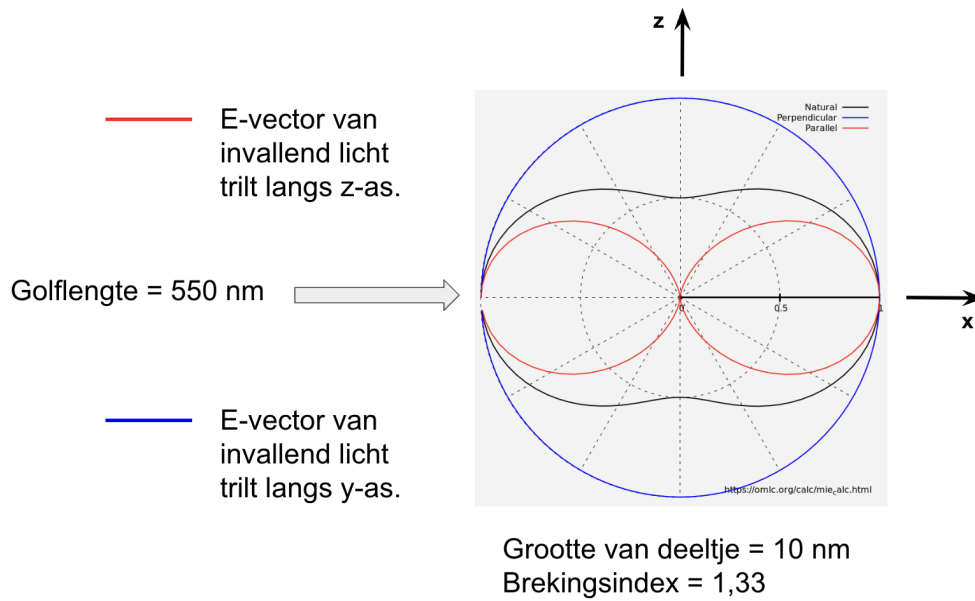
Dit is een heel belangrijk resultaat: Licht met korte golflengtes (blauw) wordt sterker verstrooid dan licht met grote golflengtes (rood). Dit noemt je Rayleighverstrooiing. De naamgever is John William Strutt, derde baron van Rayleigh (1842-1919). Zijn aanspreektitel was Lord Rayleigh.

We hebben bovenaan gezien dat de elektromagnetische straling van de dipool zich niet in de lengterichting van de dipool uitbreidt. Ongepolariseerd licht dat onder een hoek van 90° verstrooid wordt is daarom volledig gepolariseerd. Dit legt het volgende plaatje uit: In het centrum van een cartesisch coördinatenstelsel zit een deeltje dat het licht verstrooid. Vanuit de negatieve x-richting valt ongepolariseerd licht op dit deeltje. De rode en blauwe pijlen geven de trillende elektrische velden van de verschillende lichtgolven weer. Verstrooid licht in de positieve x-richting is nog steeds ongepolariseerd. Je vindt dus zowel lichtgolven waar het elektrische veld langs de rode pijlen als ook langs de blauwe pijlen op een neer gaat. Maar in de y- en z-richting is dit niet meer het geval. Wanneer het elektron langs de y-as trilt dan straalt het geen licht langs de y-as uit! Dus in y-richting vindt je alleen lichtgolven waar het \vec{E} -veld parallel aan de z-as trilt (rode pijlen). En andersom vind je in z-richting alleen lichtgolven waar het \vec{E} -veld evenwijdig aan de y-as trilt (blauwe pijlen).

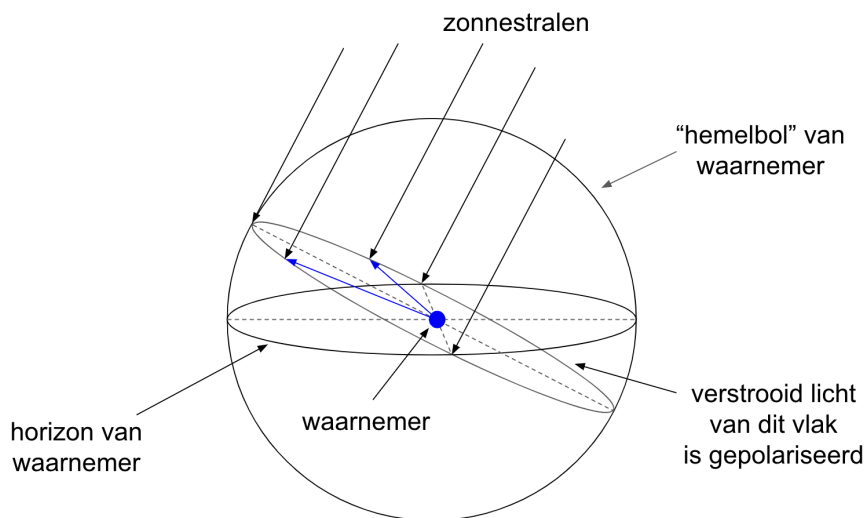


Met het tool op de website https://omlc.org/calc/mie_calc.html kun je het verstrooiingspatroon gaan berekenen. In het voorbeeld onderaan zie je het resultaat voor invallend licht (van links) met een golflengte van 550 nm. Het verstrooiende bolvormige deeltje zit in de oorsprong van het coördinatenstelsel en heeft een grootte van 10 nm en een brekingsindex van 1,33. (Denk bijvoorbeeld aan een minuscule waterdruppeltje.) De rode lijn in het diagram geeft de intensiteiten weer voor invallend licht waarbij de vector van het elektrische veld \vec{E} in het xz-vlak langs de z-as trilt. Voor licht met een \vec{E} -vector langs de y-as (dus haaks op de tekening) geeft de blauwe lijn de intensiteiten

van het verstrooiingspatroon weer:



Een waarnemer hier op aarde kan zien dat het verstrooide licht van de hemelbol in bepaalde richtingen gepolariseerd is. Dit illustreert het plaatje onderaan. We identificeren een vlak dat onder een hoek van 90 graden ten opzichte van de inkomende zonnestralen (ongepolariseerd licht) staat. Stikstof- of zuurstofmoleculen die zich in dit vlak bevinden verstrooien het zonlicht en voor de waarnemer is dit licht volledig gepolariseerd. Dit kan hij bijvoorbeeld met een polarisatiefilter constateren wanneer hij in de richtingen van de blauwe pijltjes kijkt.

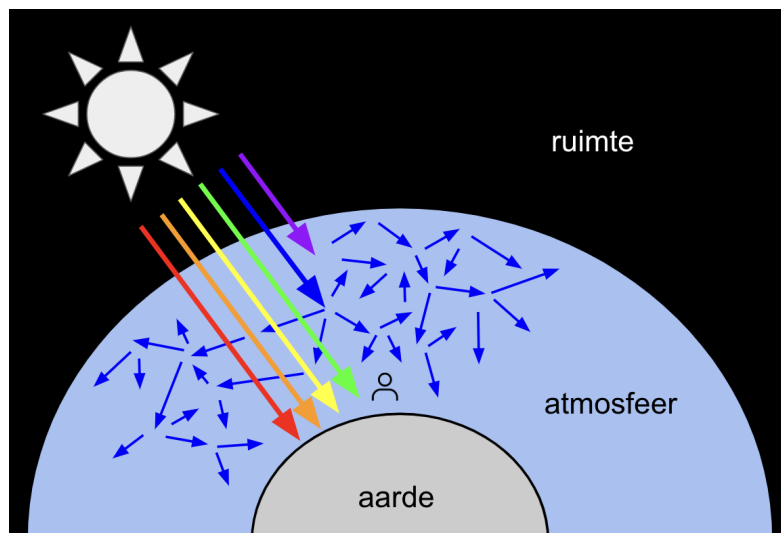


2.3 Hemelblauw en rode zonsondergang

Rayleighverstrooiing treedt op wanneer de deeltjes die het licht verstrooien veel kleiner zijn dan de golflengte van het licht³ (minder dan een tiende van de golflengte, dus minder dan 40 nm). Dit zijn vaak moleculen of kleine gasdeeltjes, zoals stikstof en zuurstof in de atmosfeer. Zoals we bovenaan gezien hebben is de Rayleighverstrooiing sterk afhankelijk van de golflengte van het licht. De verstrooide intensiteit is omgekeerd evenredig met de vierde macht van de golflengte ($I \propto 1/\lambda^4$). Hierdoor worden korte golflengtes veel sterker verstrooid dan grote golflengtes. Voor de intensiteiten van verstrooid blauw licht ($\lambda_{\text{blauw}} = 450 \text{ nm}$) en verstrooid rood licht ($\lambda_{\text{rood}} = 650 \text{ nm}$) geldt:

$$\frac{I_{\text{blauw}}}{I_{\text{rood}}} = \frac{\lambda_{\text{rood}}^4}{\lambda_{\text{blauw}}^4} = \left(\frac{650 \text{ nm}}{450 \text{ nm}}\right)^4 \approx 4,4 \quad (9)$$

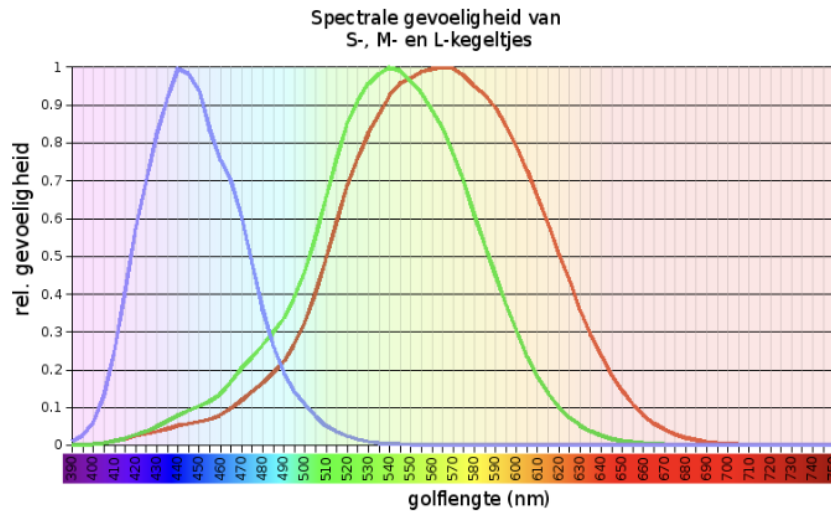
De blauwe kleur van de hemel wordt veroorzaakt door Rayleighverstrooiing van zonlicht. Wat we zien is een verzameling strooilicht uit alle lagen van de atmosfeer met als achtergrond de zwarte ruimte. Moleculen in de atmosfeer zoals stikstof (N_2) en zuurstof (O_2) zijn veel kleiner dan de golflengte van zichtbaar licht. Zoals we inmiddels weten wordt daarom met name het blauwe (en paarse) licht verstrooid. Dit is schematisch weergegeven in het volgende plaatje:



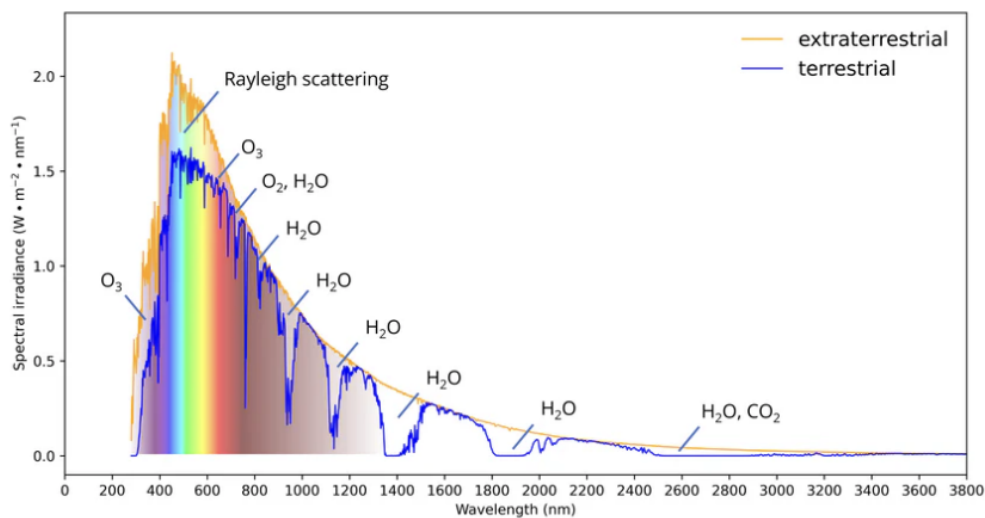
Waarom is de hemel voor ons niet paars? De golflengte daarvan is immers nog kleiner dan die van blauw licht. Hiervoor zijn twee redenen:

³Zichtbaar licht heeft een golflengte tussen 400 en 750 nm.

- Het menselijk oog is minder gevoelig voor paars licht dan voor blauw licht. In het netvlies zitten drie soorten kegeltjes die verantwoordelijk zijn voor het zien van kleuren: De S-, M- en L-kegeltjes. Hierbij "S" staat voor short, "M" voor medium en "L" voor long. De S-kegeltjes zijn het meest gevoelig voor blauw licht met een golflengte van 443 nm.



- In het spectrum van de zon zit er minder paars dan blauw licht. Het volgende diagram laat dit zien. De oranje lijn geeft het spectrum weer voor het zonlicht dat we boven onze atmosfeer ontvangen. De blauwe lijn toont de metingen in de buurt van het aardoppervlak. (Bron: <https://www.ossila.com/pages/the-solar-spectrum>)



Een strak blauwe hemel is hier in Nederland vrij zeldzaam. Op de volgende foto (10 januari 2025) zien we de hemel boven Leiden. Geen wolkje aan de lucht (en ook geen vliegtuig).



Vanuit de ruimte is ook heel goed te zien dat de aardse atmosfeer met name het blauwe licht verstrooid. Het is een heel dunne blauwe lijn die de aarde omringt. In het Engels: *The Thin Blue Line*

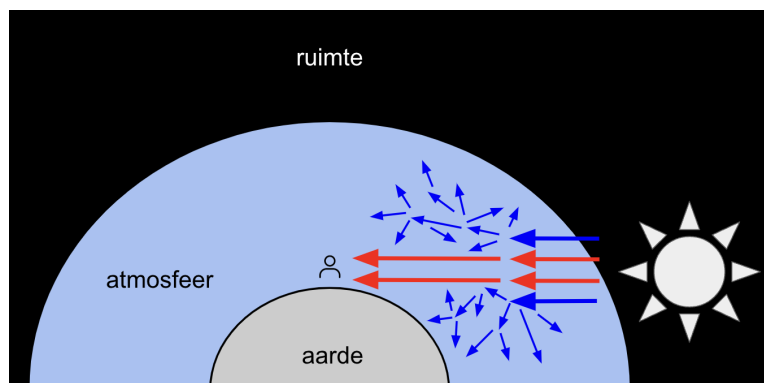


Op 14 februari 1990 maakte het *Voyager 1* ruimtevaartuig een foto (zie volgende pagina). Deze laat de aarde vanuit een afstand van 6 miljard kilometer zien. Ze is dan alleen maar nog een piepkleine zwakke blauwe stip, of in het Engels: *The Pale Blue Dot*. De aarde verschijnt als een blauwe stip op de foto, voornamelijk vanwege Rayleighverstrooiing van zonlicht in de atmosfeer. De oceaan draagt ook bij aan

de blauwheid van de aarde, maar in mindere mate dan de verstrooiing. Het is een lichtblauwe stip, in plaats van donkerblauw, omdat wit licht dat door wolken wordt gereflecteerd, zich combineert met het verstrooide blauwe licht.



De blauwe kleur van de hemel is dus te danken aan de Rayleighverstrooiing van licht aan de moleculen (stik- en zuurstof) in de atmosfeer. Wanneer de zon heel laag boven de horizon staat (bij opkomst of ondergang) dan moet het licht een heel lange weg door de atmosfeer afleggen tot het de waarnemer op aarde bereikt. Hierbij wordt al het blauwe licht verstrooid (en ook het groene, gele en oranje licht) en wat overblijft is het rode aandeel in het spectrum. Daarom zijn zonsopkomsten en ondergangen rood⁴. Dit wordt schematisch in het volgende plaatje weergegeven:



⁴De aanwezigheid van stof in de atmosfeer speelt hierbij ook nog een belangrijke rol.

Bij een volledige maansverduistering wordt het zonlicht dat door de luchtlagen van de aardatmosfeer valt enigszins naar binnen gebroken. Zoals we inmiddels weten worden de blauwe componenten door verstrooiing verzwakt. De rode componenten bereiken de maan en daarom zien we bij een totale maansverduistering de maan als een bruin-rode schijf. De volgende foto's laten een zonsondergang vanaf het strand in Katwijk (22-06-2022) zien en de kleur van de maan bij een volledige maansverduistering:



Op de planeet Mars is het trouwens precies andersom: Een zonsondergang is daar blauw. Deze foto werd gemaakt met een camera op de marsrover *Curiosity* in 2015:



De atmosfeer van Mars is heel dun (ongeveer 1% van de dichtheid van de aardse atmosfeer) en is hoofdzakelijk samengesteld uit koolstofdioxide (95%), met een aanzienlijke hoeveelheid fijne stofdeeltjes. Deze stofdeeltjes in de atmosfeer verstrooien het rode licht sterker dan het blauwe licht. Bij zonsondergang op Mars is al het rode licht verstrooid en wat overblijft is blauw.

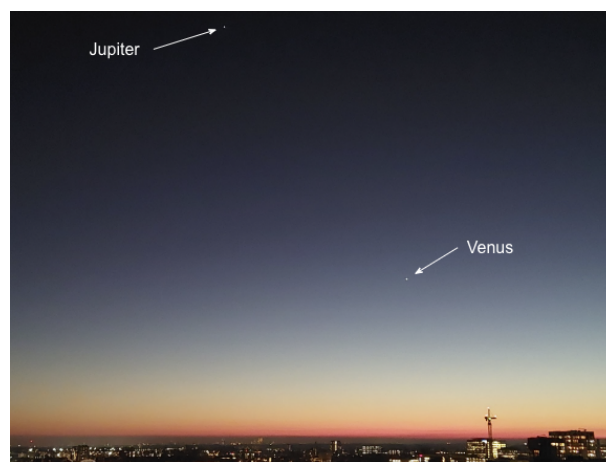
2.4 Het blauwe uur

Het blauwe uur is een bijzondere periode net na zonsondergang of net vóór zonsopkomst. Tijdens dit tijdvenster, dat hier bij ons meestal ongeveer 30 tot 50 minuten duurt, neemt de hemel een diepe, intens blauwe kleur aan. Hierbij staat de zon dan zo 4 tot 8 graden onder de horizon.

Zoals we inmiddels weten wordt de blauwe lucht overdag door Rayleigh-verstrooiing veroorzaakt. Naarmate de schemering vordert neemt het zonlicht een steeds langere pad door de atmosfeer. Dit zou betekenen dat steeds meer blauw licht verstrooid wordt voordat het de hemel boven de plaats van de schemering kan bereiken. Daarom zou de lucht na zonsondergang richting het zenit eigenlijk geler en roder moeten zijn. Maar ze is mooi blauw. Wat is de oorzaak hiervan?

Door de schuine lichtinval heeft het licht op een hoogte van 15 tot 30 kilometer ook een langere weg door de ozonlaag. Hierbij speelt *Chappuis-absorptie* dan een rol. James Chappuis (1854-1934) had in 1880 ozon onderzocht. Hij had de blauwe kleur opgemerkt die door dit gas werd veroorzaakt. Dit effect schreef hij toe aan absorptie in het gele, oranje en rode spectrum. Dus blauw blijft over. Bij een zonsondergang is slechts een derde van de kleuring te wijten aan Rayleighverstrooiing en tweederde aan *Chappuis-absorptie*. Naarmate de schemering vordert, wordt dit laatste het enige significante effect.

We zien hier een opname vanuit mijn woning op 7 februari 2023 om 18:35 CET. De zonsondergang was ongeveer één uur eerder. De blauwe kleur wordt dus met name veroorzaakt door *Chappuis-absorptie*.



3 Tyndall-effect

Het Tyndall-effect⁵ beschrijft de verstrooiing van licht door deeltjes met een grootte tussen ongeveer 40 nm en 1 μm in een transparant medium. Ook bekend als Tyndallverstrooiing, is het vergelijkbaar met Rayleighverstrooiing, in die zin dat de intensiteit van het verstrooide licht omgekeerd evenredig is met de vierde macht van de golflengte, zodat blauw licht veel sterker wordt verstrooid dan rood licht.

Het Tyndall-effect is vooral bekend van colloïdale oplossingen en suspensies. Colloïdale deeltjes bevinden zich in een gasvormig, vloeibaar of vast medium. De deeltjes vormen samen met dit medium een colloïdaal systeem of colloïdaal mengsel. De deeltjes zelf kunnen vast, vloeibaar of gasvormig zijn. De volgende tabel geeft een overzicht van deze mengsels. Tussen hakjes worden wat voorbeelden genoemd:

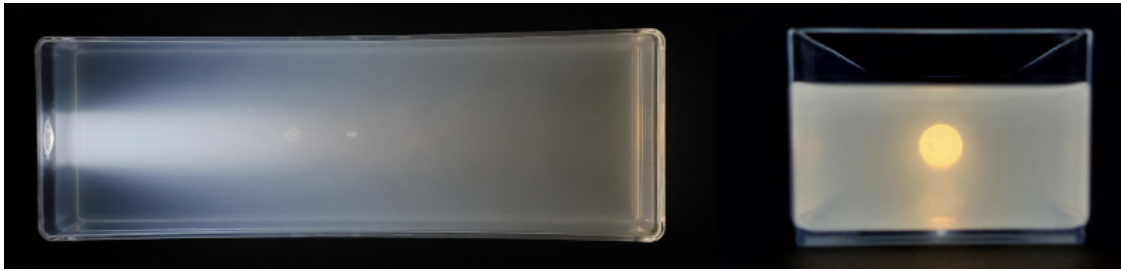
		Colloïdale stof		
		Gas	Vloeistof	Vast
Medium	Gas	bestaat niet	Vloeibare aerosol (mist)	Vaste aerosol (rook)
	Vloeistof	Schuim (scheerschuim)	Emulsie (melk)	Suspensie (inkt)
	Vast	Vast schuim (aerogel)	Gel (gelatine)	Vaste sol (opaliet)

3.1 Melk

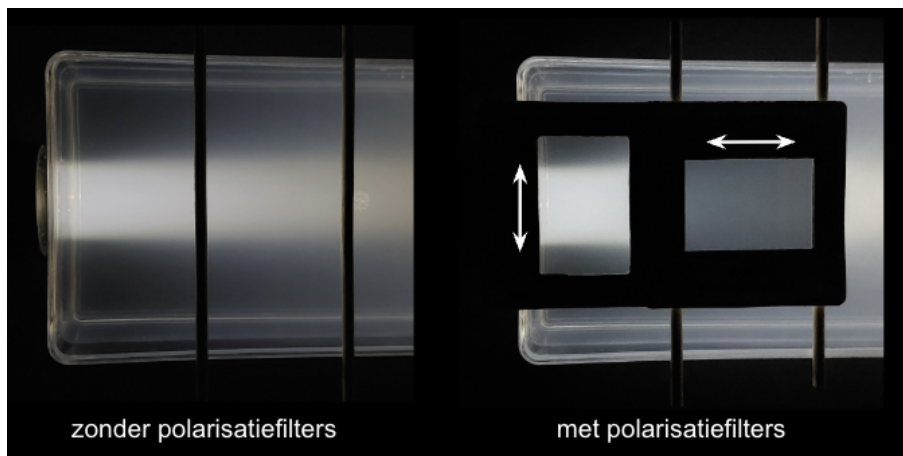
Melk bevat colloïdale vetdeeltjes die licht verstrooien. Wanneer licht door verdunde melk schijnt, veroorzaakt Tyndallverstrooiing een lichtblauwe schijn. We zien op de volgende pagina een bakje met een halve liter water. Ongeveer 12 druppels halfvolle melk zijn hieraan toegevoegd. Een zaklamp schijnt wit licht van links door dit mengsel. Duidelijk is in het eerste deel het blauwe verstrooide licht te zien. Meer naar rechts wordt het blauwe aandeel steeds kleiner. Kijk je op de kopse kant van het bakje dan zie je dat de schijf van de zaklamp duidelijk niet meer wit is maar geel/oranje: Al het blauwe licht is verstrooid en alleen het licht met de grotere golflengtes blijft over. Dit is

⁵John Tyndall (1820-1893) was een natuurkundige uit Ierland.

te vergelijken met onze zon die bij opkomst of ondergang laag boven de horizon staat.



Het is bij dit kleine proefje heel makkelijk te tonen dat het verstrooide licht gepolariseerd is. De foto's onderaan laten het waterbakje met melk zonder en met polarisatiefilters zien. Let op: We kijken van boven op het bakje. Op de opname rechts geven de witte pijltjes de oriëntatie van de filters aan. Het is duidelijk een verschil waar te nemen afhankelijk hoe de filters georiënteerd zijn. Vergelijk dit ook met het polarisatiediagram op pagina 8.

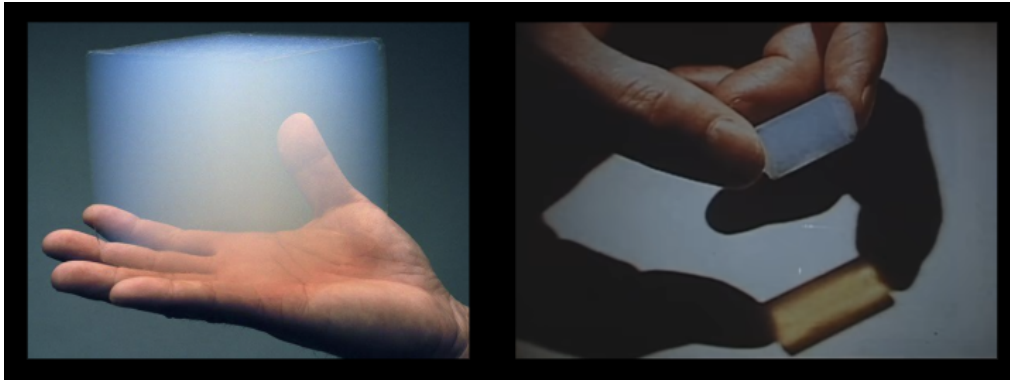


3.2 Aerogel

Aerogel is een synthetisch materiaal dat voornamelijk uit lucht bestaat, met een netwerk van vaste deeltjes dat de structuur vormt. Aerogel bestaat voor 95 - 99,98 % uit lucht, waardoor het een van de lichtste vaste materialen is. Het heeft een extreem poreuze structuur met poriën op nanoschaal, wat verantwoordelijk is voor de lage dichtheid⁶ en isolerende eigenschappen. Aerogel kan deels doorschijnend of opaalachtig zijn. Het blauwe uiterlijk is het gevolg van verstrooiing

⁶De dichtheid ligt tussen 0,0011 en 0,5 g/cm³.

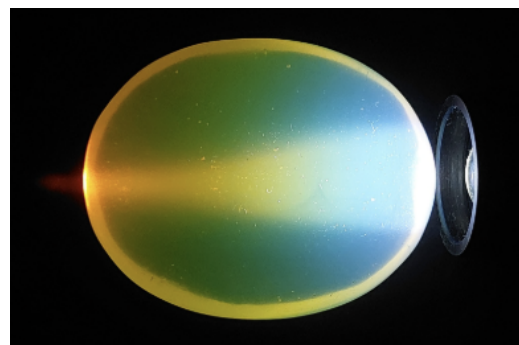
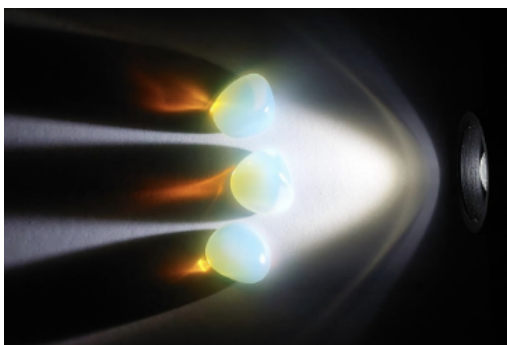
van licht door de nanostructuur. Door de sterke verstrooiing van het blauwe aandeel blijft weer het licht met de roodachtige kleuren over.



De NASA gebruikt aerogel als isolatiemateriaal en als medium om stofdeeltjes uit de ruimte op te vangen (zoals bij de Stardust-missie).

3.3 Opaliet

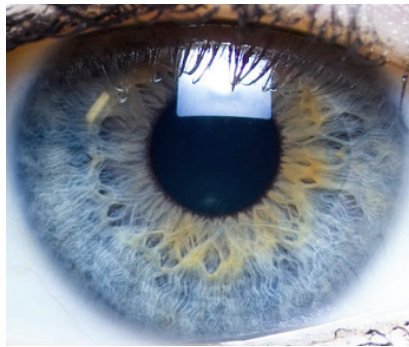
Opaliet is een kunstmatige steen. Het bestaat uit kleine bolletjes siliciumdioxide (SiO_2) die in de vorm van een piramide op elkaar gestapeld zijn. Op de linker foto zie je drie kleine opaliet-steentjes (grootte ca. 20 mm)⁷. Van rechts valt wit licht op deze steentjes. Het is duidelijk te zien dat het blauwe licht het sterkst verstrooid wordt: De steentjes hebben van boven gezien een lichtblauwe kleur. Verder naar links worden de steentjes dan groen en geel. Tenslotte blijft nog rood licht over dat op de zwarte ondergrond valt. De kleurenovergang bij het verstrooiingsproces is nog iets beter te zien bij een grotere opaliet-steen op de rechter foto. De afmetingen van deze steen in de vorm van een ellipsoïde zijn: ca. 7 cm lang, 5 cm breed en 3 cm hoog.



⁷Deze opaliet-steentjes kun je voor weinig geld bijvoorbeeld bij *Ananda* in Den Haag of Utrecht kopen.

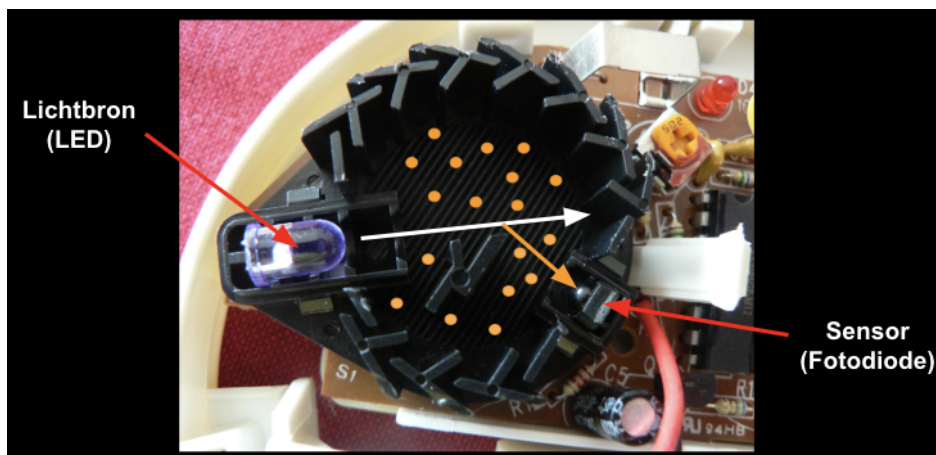
3.4 Blauwe ogen

De kleur van blauwe ogen is te wijten aan de Tyndallverstrooiing van licht door een doorschijnende laag in de iris die talrijke kleine deeltjes met een diameter van ongeveer 0,6 micrometer bevat. Deze deeltjes zijn fijn gesuspenderd in de voorste laag (stroma) van de iris. Bij bruine ogen wordt licht grotendeels geabsorbeerd door het hoge melaninegehalte, waardoor de ogen donker lijken. Op de foto onderaan zien we een oog met een blauwe iris. Deze bevat een heel klein beetje bruine pigmentatie (melanine):



3.5 Rookmelder

In een optische rookmelder bevinden zich een lichtbron (bijvoorbeeld een infrarood-LED) en een lichtgevoelige sensor (bijvoorbeeld een fotodiode). Onder normale omstandigheden valt het licht van de LED niet direct op de sensor (witte pijl). Wanneer er rook (oranje stipjes) in de melder komt, verstrooit de rook het licht. Het verstrooide licht valt dan op de sensor (oranje pijl), die het detecteert en het alarm activeert.



4 Mieverstrooiing

Bij de Rayleighverstrooiing zijn de deeltjes veel kleiner dan de golflengte van het licht: minder dan een tiende van de golflengte, dus minder dan 40 nm (zie pagina 10). Daarentegen zijn de deeltjes bij de Tyndallverstrooiing iets groter dan bij de Rayleighverstrooiing: tussen ongeveer 40 nm en 1 μm (zie pagina 16). Zodra we het met deeltjes te doen hebben die groter zijn dan 1 μm spreken we van Mieverstrooiing⁸.

In tegenstelling tot Rayleighverstrooiing is Mieverstrooiing minder afhankelijk van de golflengte van het licht. Dit betekent dat het de neiging heeft om alle zichtbare golflengtes gelijkmatig te verstrooien. De intensiteit van het verstrooide licht is dus een constante en hangt niet van λ af. Mieverstrooiing is verantwoordelijk voor het witte uiterlijk van wolken. De waterdruppeltjes in de wolken zijn meestal tussen 10 en 1000 μm in diameter.

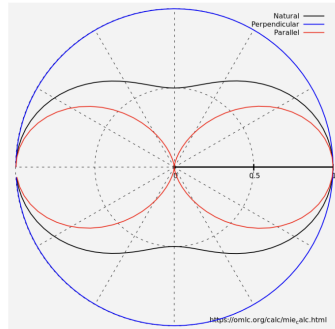
Als voorbeeld voor Mieverstrooiing zien we hier witte wolkjes boven de Oude Sterrewacht op 9 februari 2021.



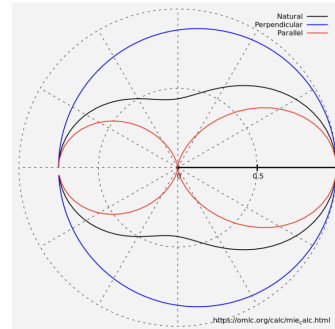
Op pagina 9 hebben we kennis gemaakt met het verstrooiingspatroon van een deeltje dat zo klein is dat we het met Rayleighverstrooiing te doen hebben. Er is geen voorkeursrichting voor de verstrooide lichtdeeltjes: het licht wordt zowel voorwaarts als achterwaarts gelijkmatig verstrooid.

⁸Gustav Mie (1868-1957) was een Duitse natuurkundige.

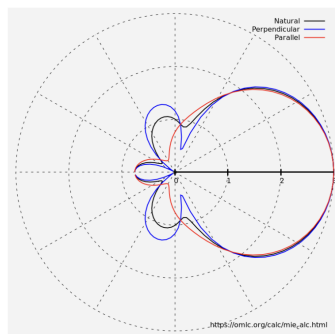
De Mieverstrooiing is veel, veel complexer. Het al eerder genoemde tool op de website https://omlc.org/calc/mie_calc.html helpt ons om het verstrooiingspatroon voor deeltjes met verschillende grootte te berekenen. Licht met een golflengte van 550 nm valt weer van links op een bolvormig deeltje met een brekingsindex van 1,33. De grootte van de deeltjes zijn 10, 100, 550 en 1000 nm:



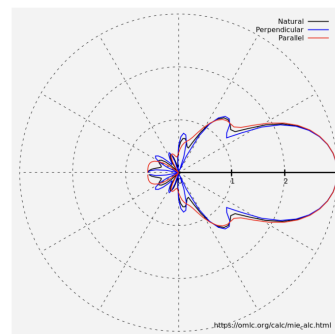
10 nm



100 nm



550 nm



1000 nm

Lichtgolven die door een groot deeltje verstrooid worden, kunnen in bepaalde richtingen interfereren. Door de ruimtelijke verdeling van de verstrooiing en de faseverschillen tussen verschillende delen van het deeltje, is er een sterke constructieve interferentie in de voorwaartse richting. Dit is duidelijk bij het deeltje van 1000 nm te zien en is typisch voor Mieverstrooiing. De diagrammen voor 100 nm en 550 nm laten zien hoe het patroon van Rayleighverstrooiing (10 nm) naar Mieverstrooiing (1000 nm) verandert.

Samenvattend kunnen we constateren dat bij de Mieverstrooiing alle kleuren van het licht gelijkmatig verstrooid worden. De intensiteit van het verstrooide licht hangt dus niet af van de golflengte. Maar het licht wordt met name in de voorwaartse richting verstrooid.

5 Bijzondere verschijnselen

5.1 Wolkenstralen

Wanneer de zon zich achter een wolk met openingen bevindt, ziet men vaak stralen die vanuit de wolk lijken te komen. Deze worden wolkenstralen, zonneharpen of jakobs ladder genoemd. Staat de zon zelf hierbij onder de horizon dan spreek je van crepusculaire⁹ stralen. Ze zijn alleen te zien wanneer de atmosfeer vele kleine waterdruppeltjes en/of stofdeeltjes bevat. De druppeltjes en deeltjes verstrooien het zonlicht. Alle stralen "lopen" in werkelijkheid evenwijdig maar door het perspectief lijken ze vanuit één punt te komen (de zon). Vergelijk dit effect met spoorrails die parallel lopen maar in de verte bij elkaar lijken te komen. De kans "wolkenstralen" te kunnen waarnemen is het grootst bij een laagstaande zon. Het zonlicht moet dan een lange weg door de atmosfeer afleggen (dus meer verstrooiing).

Vanuit mijn woning heb ik op 20 november 2024 deze foto gemaakt. De zon staat al vrij laag achter een wolk boven Den Haag. Duidelijk zijn de wolkenstralen te zien.



5.2 Zodiakaal licht

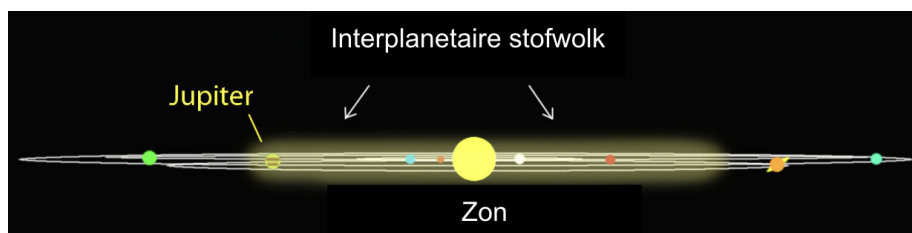
Zodiakaal licht is een zwakke, diffuse gloed die aan de hemel te zien is net na zonsondergang of vlak voor zonsopkomst. Het verschijnsel lijkt op een kegelvormige lichtstraal die uit de richting van de zon komt en zich langs de dierenriem (zodiak) uitstrekt.

⁹Het Latijnse woord *crepusculum* betekent schemering.

De linker foto onderaan is een opname op het Paranal-observatorium in Chili. Je ziet op de grond de Very Large Telescope (VLT). Haaks op de horizon staat links de Melkweg en rechts zie je het zodiakaal licht. De rechter foto is een opname van J. C. Casado op Tenerife (Teide National Park). In het midden zie je het zodiakaal licht en rechts weer onze Melkweg.



Dit licht ontstaat door verstrooiing van zonlicht door stofdeeltjes die zich in het binnenste gedeelte van het zonnestelsel bevinden, voornamelijk in het vlak van de ecliptica, het vlak waarin de planeten om de zon draaien.



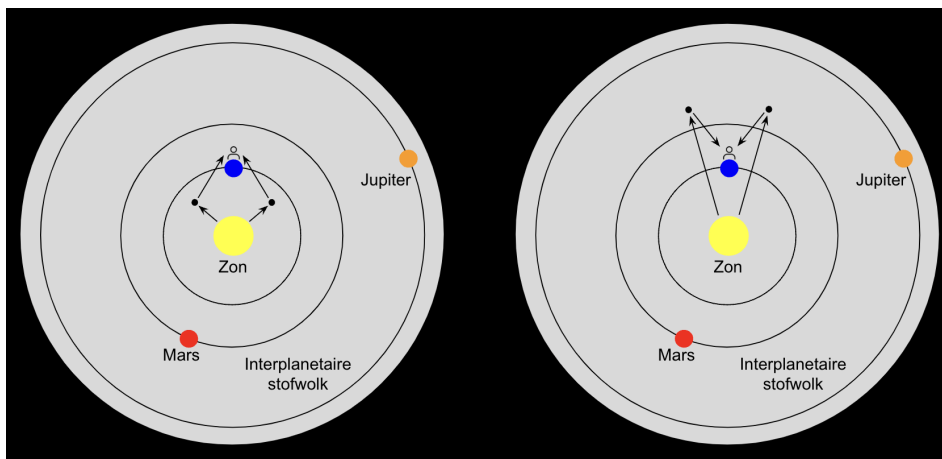
Deze stofdeeltjes, ook wel interplanetair stof genoemd, zijn afkomstig van kometen en botsingen tussen asteroïden. Maar er kan ook nog een andere bron zijn: Inslagen van micrometeorieten op het Juno-ruimtevaartuig tijdens zijn reis naar Jupiter wijzen op een verband tussen de deeltjes en de planeet Mars. Het is nog niet duidelijk met welk mechanisme Mars deze stofdeeltjes in de juiste baan brengt.

De deeltjesgroottes variëren van ongeveer 1 tot 100 micrometer. Wanneer zonlicht op deze stofdeeltjes valt, wordt het licht in verschillende richtingen verstrooid, wat resulteert in de zwakke gloed die we vanaf de aarde kunnen zien. Het zodiakaal licht is op het noordelijk halfrond het beste te zien in de lente net na zonsondergang of in de herfst vlak voor zonsopkomst.

Een verwant verschijnsel is *Gegenschein*¹⁰ (tegenlicht), een zwakke opheldering aan de nachthemel die ontstaat door een vergelijkbaar verstrooiingsfenomeen, maar die aan de tegenoverliggende kant van de zon te zien is (dus precies aan de andere kant van de hemelbol).

De volgende twee diagrammen leggen uit hoe deze fenomenen ontstaan. Het grijze vlak is de interplanetaire stofwolk.

- Linker diagram: Licht van de zon dat aan de aangegeven stofdeeltjes verstrooid wordt kunnen we voor zonsopkomst of na zonsondergang zien. Dit is het zodiakale licht.
- Rechter diagram: Deeltjes die in "oppositie" staan zorgen voor de Gegenschein door het zonlicht terug te strooien.



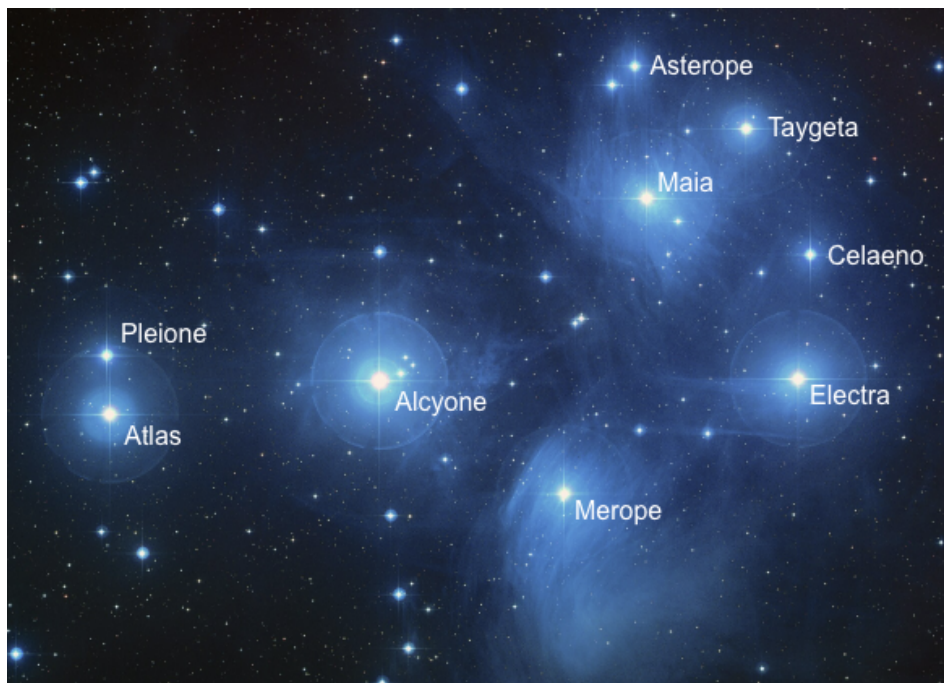
Deze opname op het Paranal-Observatorium in Chili van 7 mei 2008 toont de Gegenschein:



¹⁰De Duitse naam *Gegenschein* werd voor het eerst door Alexander von Humboldt (1769-1859) voor dit fenomeen gebruikt.

5.3 Plejaden

De Plejaden¹¹ (M45), ook wel het Zevengesternte genoemd, lijken blauw vanwege de reflectielevels rondom de sterren en de aard van de sterren zelf.



De Plejaden zijn een jonge sterrenhoop, ongeveer 100 miljoen jaar oud en bevinden zich op ongeveer 440 lichtjaren van de aarde. De sterren in deze groep zijn heet: hun oppervlaktetemperatuur is extreem hoog, tussen de 10.000 en 25.000 graden Celsius (spectraalklasse B). Zulke hete sterren stralen meer licht uit in het blauwe deel van het spectrum (Wet van Wien).

Rondom de sterren in de Plejaden bevindt zich een interstellair nevel van gas en stof. Het licht van deze blauwe sterren wordt gereflecteerd en verstrooid door het omringende stof. De reflectielevel in de Plejaden is trouwens geen restmateriaal van de vorming van de sterrenhoop, maar een gas- en stofwolk waar de sterren momenteel doorheen bewegen.

¹¹De Plejaden zijn genoemd naar zeven zussen uit de Griekse mythologie die door Zeus aan de hemel waren geplaatst. Zij waren de dochters van de reus Atlas en de Oceanide Pleione. De namen van deze zussen zijn: Alcyone, Merope, Maia, Electra, Celaeno, Taygeta en Asterope.

6 Weblinks

6.1 Rayleighverstrooiing

Lezing van Walter Lewin over Rayleighverstrooiing:
<https://www.youtube.com/watch?v=QpGBs307qYs>

Blauwe uur:

https://nl.wikipedia.org/wiki/Blauwe_uur

https://en.wikipedia.org/wiki/Chappuis_absorption

6.2 Tyndall-effect

Algemeen over het Tyndall-effect en vergelijking met Rayleigh- en Mie-verstrooiing:

https://en.wikipedia.org/wiki/Tyndall_effect

Colloïdale mengsels:

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Collo%C3%AFde>

6.3 Mieverstrooiing

Verstrooiingspatroon berekenen:

https://omlc.org/calc/mie_calc.html

6.4 Bijzondere verschijnselen

Crepusculaire stralen:

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Wolkenstralen>

Zodiakaal licht:

https://nl.wikipedia.org/wiki/Zodiakaal_licht

<http://www.putmanmountainobservatory.com/zodiacal-light/>

<https://www.universetoday.com/100514/comet-panstarrs-crosses-paths-with-zodiacal-light/>

Gegenschein:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Gegenschein>

Plejaden:

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Zevengesternte>